

**«Национальный исследовательский ядерный университет**

**«МИФИ»**

**На правах рукописи**



**КУРБАТОВА ЕКАТЕРИНА АЛЕКСЕЕВНА**

**МЕТОДЫ КОМПРЕССИИ ВНЕОСЕВЫХ ЦИФРОВЫХ ГОЛОГРАММ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЧАСТОТНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ,  
СКАЛЯРНОГО, ВЕКТОРНОГО И ВЕЙВЛЕТНОГО СЖАТИЯ**

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:**

**Евтихий Николай Николаевич**

д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Лазерная физика» Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ», Москва

**Официальные оппоненты:**

**Минаев Владимир Леонидович**

д.т.н.

начальник научно-исследовательского отдела «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений» Государственного Научного Метрологического Института

**Петров Николай Владимирович**

д.ф.-м.н., доцент

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

**Путилин Андрей Николаевич**

к.ф.-м.н.

высококвалифицированный ведущий научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией сверхбыстродействующей оптоэлектроники и обработки информации ФИАН

Защита состоится «25» мая 2022 г. в 17:00 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 «\_\_» \_\_\_\_\_ 20 г.

**Учёный секретарь  
диссертационного совета**



к.ф.-м.н.

Краснов В.В.

## Общая характеристика работы

### Актуальность темы

Развитие голографических методов и технологий создания оптико-цифровых систем позволило регистрировать, преобразовывать, хранить, передавать и воспроизводить огромные массивы информации. Размеры файлов цифровых голограмм и голографических изображений составляют несколько десятков мегабайт, а могут составлять и существенно большие значения, поэтому для передачи архивов голографических данных по каналам связи необходимо иметь каналы с высокой пропускной способностью (порядка 2-4 Гбит/с), что больше, чем в используемых в настоящее время стандартных каналах связи. Помимо этого, для хранения архивов голограмм 2D- и 3D-объектов, а также объемных сцен необходимы большие объемы носителей информации. Следовательно, для увеличения скорости передачи цифровых голографических данных, в том числе для дальнейшей оптической реконструкции сцен и снижения объемов архивной памяти, требуемой для их хранения, необходимо проводить компрессию голограмм.

Однако при обработке цифровых голограмм необходимо учитывать ряд особенностей регистрации голографических изображений:

- В цифровых голограммах присутствует множество резких изменений яркости, в то время как большинство существующих методов компрессии ориентировано на обработку изображений с плавными переходами яркости.
- При обработке цифровых голограмм необходимо учитывать визуальное качество не самой голограммы, а восстановленного с нее изображения объекта.
- Обычно голографируемые объекты имеют множество деталей, следовательно, пренебрежение различными спектральными составляющими голограммы, характерное для стандартных методов сжатия, при компрессии голограмм приводит к значительно более серьезному снижению качества

восстановленных со сжатых голограмм изображений, чем в случае сжатия обычных фотоизображений.

Таким образом, использование существующих методов сжатия для компрессии голограмм значительно ограничено. Большинство стандартных методов сжатия с потерями качества исходного файла основано на статистических параметрах изображений и особенностях визуального восприятия человека. Они направлены на устранение избыточной информации в изображениях, которая не улавливается человеческим глазом, путем отбрасывания неинформативных гармоник спектрального представления. Такой подход оправдан для сжатия стандартных фотоизображений. Однако в случае цифровых голограмм данные методы существенно снижают качество восстановления изображений со сжатых голограмм. Следовательно, для цифровых голограмм стандартные алгоритмы сжатия изображений с потерями слабо применимы.

Существует группа методов компрессии без потерь, основанная на численном кодировании изображений. При использовании методов данного типа анализируются значения интенсивности пикселей, размер и положение областей исходного изображения с близкими или отличающимися значениями яркости. Для уменьшения цифрового объема файла цепочки близких по значениям яркости пикселей могут быть перекодированы в единые элементы, содержащие информацию о значениях яркости и их отклонениях, количестве и расположении пикселей в заданной области и т.д. Качество исходного изображения при этом не изменяется. При сжатии стандартных фотоизображений с плавными переходами яркости данный подход позволяет достигать значительного сжатия файлов. Однако в цифровых голограммах ширина интерференционных полос может составлять всего 2-4 пикселей, и в таком случае при обработке голограмм методами сжатия без потерь может достигаться незначительное снижение (до нескольких процентов), а в некоторых случаях и увеличение объема файлов голограмм.

Бинаризация цифровых голограмм позволяет использовать микрозеркальные модуляторы света для оперативного оптического восстановления изображений с голограмм с высокими скоростями отображения кадров (десятки тысяч Гц).

Таким образом, необходима разработка специализированных методов компрессии, обеспечивающих одновременно и высокое качество восстановления изображений со сжатых голограмм, и высокие значения коэффициентов сжатия файлов цифровых голограмм относительно исходных.

**Целью работы** является разработка методов компрессии внеосевых цифровых голограмм для задач хранения и передачи голографической информации, а также оперативного восстановления изображений. Для достижения данной цели были поставлены следующие **задачи**:

- Анализ применимости существующих методов компрессии изображений для сжатия цифровых голограмм.
- Разработка метода квантования цифровых голограмм на основе кластеризации по одинаковому количеству пикселей, обеспечивающего высокие значения дифракционной эффективности.
- Разработка метода компрессии внеосевых цифровых голограмм, обеспечивающего высокие коэффициенты сжатия, на основе комбинации частотной фильтрации голограмм, вейвлет-сжатия, квантования и пороговой обработки.
- Разработка метода бинаризации цифровых голограмм, обеспечивающего высокое качество восстановления изображений.
- Экспериментальная апробация разработанных методов на оптическом восстановлении изображений с цифровых голограмм в лазерном излучении с использованием пространственно-временных модуляторов света.

## **Научная новизна**

1. Предложен и экспериментально апробирован метод компрессии внеосевых

цифровых голограмм, использующий частотную фильтрацию, вейвлеты, квантование и пороговую обработку, позволяющий достичь высоких коэффициентов сжатия цифровых голограмм (до 10÷12 раз выше, чем при использовании аналогов) при сохранении более 70% исходной информации.

2. Предложен и экспериментально апробирован метод квантования цифровых голограмм на основе кластеризации по одинаковому количеству пикселей, превосходящий методы скалярного квантования до 3 раз по количественным метрикам оценки качества восстановления и до 5 раз по значениям дифракционной эффективности, а также позволяющий снизить вычислительную ресурсоемкость по сравнению с векторными методами не менее 100 раз.

3. Предложена и экспериментально апробирована методика повышения качества восстановления изображений с голограмм, бинаризованных методами диффузии ошибки на основе изменений пороговых значений и направления обхода отсчетов голограмм. Использование данной методики позволяет достичь повышения качества восстановленных изображений до 15% по сравнению с немодифицированными аналогами.

4. Предложен и экспериментально апробирован адаптивный метод бинаризации цифровых голограмм на основе комбинации локальной пороговой обработки и процедуры диффузии ошибки, позволяющий обеспечить высокое качество восстановления изображений (до 18% выше по количественным метрикам в сравнении со стандартными методами).

### **Практическая значимость**

1. Применённые в работе подходы и полученные результаты могут быть использованы:

- для задач хранения и передачи файлов голограмм по каналам связи;
- для задач оперативного оптического восстановления изображений с голограмм;

- для повышения коэффициента компрессии как голографических данных, так и данных других близких типов.

2. Разработанный комбинированный метод компрессии цифровых голограмм может быть использован для высокоэффективной компрессии цифровых голограмм, например, для снижения объема баз данных при использовании методик голографической томографии и диагностики.

3. Разработанный метод квантования цифровых голограмм на основе кластеризации по одинаковому количеству пикселей может быть использован для оперативной обработки голограмм перед экспериментальным оптическим восстановлением изображений и для восстановления голограмм с высокой дифракционной эффективностью, в том числе для задач статической и динамической реконструкции 2D- и 3D-сцен.

4. Результаты систематизации и экспериментальной апробации методов бинаризации цифровых голограмм позволяют определить метод бинаризации, обеспечивающий наиболее высокое качество восстановления изображений с бинаризованных голограмм для конкретной задачи, например, для медицинских применений, задач метрологии и интерферометрии.

5. Разработанный адаптивный метод бинаризации голограмм на основе комбинирования локальной бинаризации по порогу и диффузии ошибки может быть использован для повышения качества восстановленных изображений при оперативном оптическом восстановлении бинарных голограмм при помощи высокоскоростных микрзеркальных модуляторов света, в том числе при количественном и качественном изучении параметров клеточных структур биологических объектов.

## **Методы исследования**

Поставленные в работе задачи решались путем численного моделирования и экспериментальных исследований. Аналитические задачи решались в рамках скалярной теории дифракции в приближении Френеля и методов пространственной

фильтрации. Экспериментальное исследование включает в себя создание установок по оптическому восстановлению изображений со сжатых цифровых голограмм, проведение исследований и сравнение полученных результатов с результатами численного моделирования.

### **Основные научные положения, выносимые на защиту**

1. Метод квантования на основе кластеризации по одинаковому количеству пикселей, по результатам применения на модельных и экспериментально записанных в лазерном излучении цифровых голограммах превосходящий скалярные методы до 3 раз по количественным метрикам оценки качества восстановления и до 5 раз по дифракционной эффективности, а векторные методы – не менее, чем в 100 раз по вычислительной ресурсоемкости.

2. Комбинированный метод компрессии на основе частотной фильтрации, вейвлет-сжатия, квантования и пороговой обработки внеосевых цифровых голограмм с варьируемыми параметрами, позволяющий достичь высоких коэффициентов сжатия (до 10÷12 раз выше, чем при использовании аналогов) при сохранении более 70% исходной информации.

3. Совокупность экспериментально подтверждённых оценок качества восстановления изображений с бинаризованных голограмм, сжатых 60 методами на основе пороговой обработки и диффузии ошибки, позволяющая определить методы, обеспечивающие наиболее высокое качество восстановления изображений.

4. Оригинальная модификация методов бинаризации голограмм на основе процедуры диффузии ошибки за счет изменения пороговых значений и матрицы обхода пикселей голограммы, обеспечивающая повышение качества восстановления до 15% по сравнению со стандартными реализациями процедуры диффузии ошибки.

5. Адаптивный метод бинаризации цифровых голограмм на основе комбинации локальной пороговой обработки и процедуры диффузии ошибки, по



результатам моделирования и экспериментального восстановления с помощью микрозеркальных модуляторов света в лазерном излучении позволяющий повысить качество восстановления до 18% по сравнению со стандартными реализациями процедуры диффузии ошибки.

### **Личный вклад**

Все результаты получены лично автором работы или в соавторстве при его непосредственном участии.

### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на 19 международных конференциях: 2018 International Conference Laser Optics (ICLO) (Санкт–Петербург, 2018); Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019 (Bordeaux, 2019); SPIE Photonics West 2021 (San Francisco, 2021); XVI международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO-2019 (Санкт-Петербург, 2019); XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO-2020 (Москва 2020); IV, V, VI, VII, VIII, IX, X Международных конференциях по фотонике и информационной оптике (Москва, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021); IX Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2015» (Санкт–Петербург, 2015); X Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика - 2017» (Санкт–Петербург, 2017); VIII Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2016» (Санкт–Петербург, 2016); X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2018» (Санкт–Петербург, 2018); XI Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2019» (Санкт–Петербург, 2019); XXX Международной Школе-симпозиуме по голографии, когерентной оптике и фотонике (Калининград, 2017); XXXI Международной Школе-симпозиуме по голографии, когерентной оптике и фотонике (Екатеринбург, 2019).

### **Публикации по теме**

По теме диссертации опубликовано 46 печатных работ, среди них: 20 статей в изданиях, включенных в ВАК РФ и/или индексируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 26 – в трудах международных и всероссийских конференций.

Также получено Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2018664086, 12.11.2018. Заявка № 2018662026 от 31.10.2018.

### **Структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет 139 страниц, включая 78 рисунков, 2 таблицы и список литературы из 118 наименований.

### **Содержание работы**

**Первая глава** посвящена систематизации стандартных методов сжатия изображений, а также анализу их применимости к задаче компрессии цифровых голограмм. Систематизированы оценки цифровых голограмм как объектов компрессии для сжатия с использованием различных типов алгоритмов. Определены характерные особенности голографических изображений, которые необходимо учитывать при выборе методов для обработки цифровых голограмм: период интерференционных полос, резкость переходов яркости и др. Приведены результаты анализа применения для компрессии цифровых голограмм методов, основанных на стандартах сжатия изображений, методов скалярного и векторного квантования, вейвлет-сжатия, дополнительного сжатия вейвлет-коэффициентов и сжатия путем фильтрации нежелательных порядков дифракции голограмм. Методы, основанные на стандартах сжатия, принципиально предназначены для изображений с плавными переходами яркости и, следовательно, слабо применимы для задач компрессии цифровых голограмм.

Для группы методов вейвлет-сжатия установлено, что при прямом применении вейвлет-сжатия к компрессии цифровых голограмм достижимо незначительное уменьшение объема исходных голограмм, следовательно, для сжатия цифровых голограмм необходимо использование данных методов в

сочетании с методами дополнительной компрессии вейвлет-коэффициентов.

Проведён обзор методов скалярного и векторного квантования для сжатия цифровых голограмм. Из-за неравномерности гистограмм голографических изображений наиболее подходящими для сжатия цифровых голограмм методами квантования являются итеративные скалярные методы и векторные методы квантования.

Экспериментальная проверка расчётных оценок и результатов сравнения методов компрессии цифровых голограмм по качеству восстановления изображений со сжатых цифровых голограмм описывается в следующей главе.

В **главе 2** приведены результаты по численному моделированию компрессии цифровых голограмм и численному восстановлению изображений с голограмм, сжатых методами вейвлет-сжатия, квантования и фильтрации дифракционных порядков, а также проведена сравнительная оценка качества восстановления для каждой группы методов компрессии. В **§2.1** представлена схема численных экспериментов по моделированию записи цифровых голограмм и оптическому восстановлению изображений с них. Представлены математические расчёты синтеза внеосевых голограмм Френеля, их компрессии и последующего восстановления изображений. Схемы оптической записи внеосевых цифровых голограмм с использованием лазерного излучения и оптического восстановления изображений с них в лазерном излучении представлены на Рисунке 1.

В **§2.2** представлены результаты исследования влияний условий записи цифровых голограмм Френеля и характеристик пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) на качество оптического восстановления изображений с цифровых голограмм, выводимых на ПВМС и на дифракционную эффективность голограмм. Представлена методика численного моделирования оптического восстановления синтезированных цифровых голограмм Френеля с помощью ПВМС. Использование данной методики позволяет выбирать условия записи цифровых голограмм, а также тип ПВМС, исходя из характера решаемой задачи.

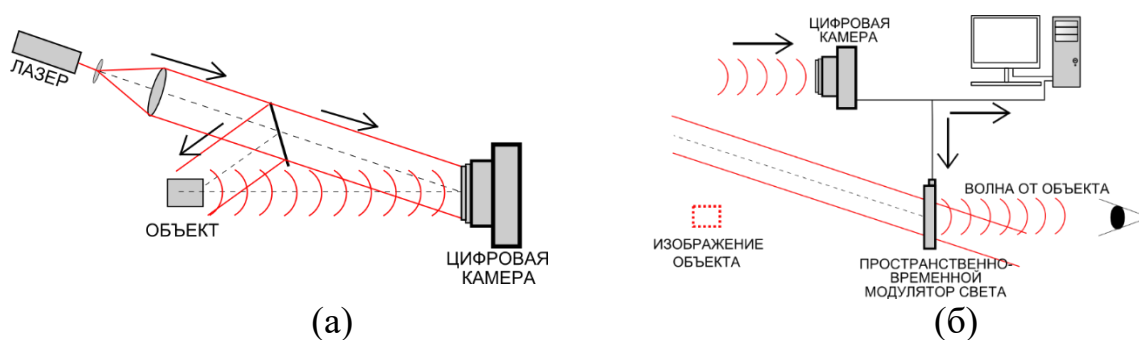


Рисунок 1 – Схемы оптической записи внеосевых цифровых голограмм с использованием лазерного излучения (а) и оптического восстановления изображений с них в лазерном излучении (б)

В §2.3 описаны результаты применения методики численного моделирования и сравнительной оценки методов компрессии цифровых голограмм, а также восстановления изображений со сжатых голограмм. Определены методы, обеспечивающие наиболее высокое качество восстановления: вейвлет-методы Хаара и Мейера и итеративные методы квантования. Продемонстрированы примеры восстановленных изображений и оценки качества восстановления в случае применения различных методов.

На основе анализа методов скалярного и векторного квантования голограмм разработан и реализован оригинальный метод кластеризации по одинаковому количеству пикселей. Алгоритм разработанного метода состоит из следующих шагов:

1. Сортировка всех исходных значений пикселей по возрастанию.
2. Разбиение полученного распределения на группы с равным количеством элементов.
3. Замена значения каждого элемента средним значением элементов соответствующей группы.

Разработанный метод превосходит методы скалярного квантования до 3 раз по качеству восстановления голограмм и до 5 раз по значениям дифракционной эффективности, и позволяет снизить вычислительную ресурсоемкость по сравнению с векторными методами не менее 100 раз (а в среднем до 1000 раз).

Использование данного метода позволяет уменьшить объём файла голограмм до 8 раз.

Полученные результаты в главе 2 демонстрируют возможность реализации комбинированного метода сжатия цифровых голограмм с использованием различных методов итеративного и неитеративного квантования, вейвлет-преобразований и пороговых значений и позволяют перейти к моделированию сжатия внеосевых цифровых голограмм с помощью комбинированного метода компрессии.

**Глава 3** посвящена разработке оригинального комбинированного метода компрессии цифровых голограмм, а также исследованию качества восстановления изображений с внеосевых цифровых голограмм, сжатых разработанным методом. В §3.1 продемонстрирована методика оценки качества восстановления голограмм при комбинировании вейвлет-сжатия и методов дополнительной обработки вейвлет-коэффициентов для компрессии цифровых голограмм. В качестве методов дополнительного сжатия вейвлет-коэффициентов наиболее применимы методы пороговой обработки и квантования вейвлет-коэффициентов.

В §3.2 описан разработанный алгоритм комбинированного метода компрессии цифровых голограмм на основе частотной фильтрации голограмм, вейвлет-сжатия, квантования и пороговой обработки вейвлет-коэффициентов.

Алгоритм данного метода заключается в следующих шагах:

1. Подавление нежелательных порядков дифракции голограммы путем обнуления пространственных частот.
2. Разделение отфильтрованного фурье-спектра голограммы на амплитудную/фазовую или реальную/мнимую компоненты.
3. Вейвлет-преобразование составляющих фурье-спектра голограммы (для увеличения скорости сжатия используются алгоритмы быстрого вейвлет-преобразования).

4. Жесткая пороговая обработка значений коэффициентов вейвлет-разложения голограммы на высоко- и низкочастотные составляющие.

5. Использование методов квантования для снижения разрядности значений коэффициентов разложения голограммы.

Представлено две методики обработки фурье-спектра голограммы: с использованием амплитудной и фазовой, а также реальной и мнимой компонент. Для оценки качества сжатия голограмм разработанным методом рассмотрены экспериментально записанные цифровые и синтезированные голограммы бинарных и полутоновых плоских объектов и объемных сцен размером до  $2048 \times 2048$  пикселей.

В §3.3 представлены результаты численного моделирования оценки качества восстановления изображений при различных параметрах разработанного комбинированного метода. Для метода фильтрации в частотной плоскости при компрессии цифровых голограмм определены размеры области обнуления, оптимальные по качеству восстановленного изображения и значению дифракционной эффективности голограммы.

По результатам сравнительной оценки 51 вейвлет-преобразования при вейвлет-разложении компонент фурье-спектра голограмм установлено, что вейвлет-преобразование Мейера, обратные биортогональные 6,8 вейвлеты, некоторые коифлеты и симлеты можно рассматривать как наиболее универсальные и обеспечивающие высокое качество восстановления изображений с голограмм, сжатых разработанным комбинированным методом.

Таким образом, определены оптимальные параметры разработанного комбинированного метода, используемые для достижения максимальных коэффициентов сжатия при минимальных возможных потерях качества изображений, восстановленных со сжатых данным методом голограмм.

В §3.4 продемонстрированы результаты численного восстановления плоских объектов и объемных сцен с голограмм, сжатых оригинальным комбинированным

методом. На Рисунке 2 представлены примеры результатов численных экспериментов по сжатию реализованным методом цифровых голограмм объемных сцен. В случаях, показанных на Рисунке 1 (д-з), степень сжатия составляет 100 раз. Дальнейшее увеличение порогового значения до 90% и уменьшение числа квантованных градаций вейвлет-коэффициентов реальной и мнимой компонент фурье-спектра до 2 позволяет достичь степени сжатия 380 раз.

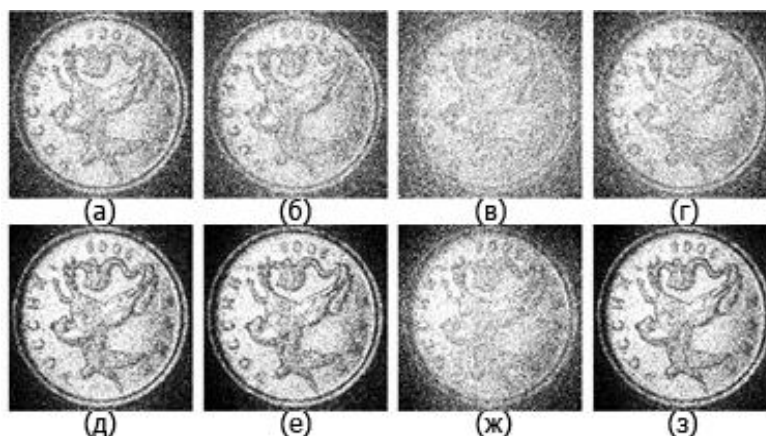


Рисунок 2 – Примеры восстановленных изображения со сжатых синтезированных голограмм при использовании реальной и мнимой (а-б,д-е) и амплитудной и фазовой (в-г,ж-з) компонент фурье-спектра голограммы. Представлены случаи квантования вейвлет-коэффициентов до 2 бит (а-г) и 3 бит (д-з) при 80% (а,в,д,ж) и 70% (б,г,е,з) удаляемых коэффициентов

По результатам сравнительной оценки разделения фурье-спектра голограммы на различные компоненты получено, что использование реальной и мнимой компонент фурье-спектра голограммы позволяет получить значительно более высокое качество восстановления изображений, чем при использовании амплитуды и фазы при аналогичных коэффициентах сжатия голограмм. Средняя разница между значениями метрик качества составляет более десятков процентов в пользу использования реальной и мнимой частей.

Проведена оценка степени сжатия голограмм разработанным методом при различных параметрах метода. Метод позволяет достичь высоких коэффициентов сжатия внеосевых цифровых голограмм (380 раз и более) при сохранении высокого качества восстановления изображений со сжатых голограмм (уровень потерь

менее 30%).

Полученные результаты позволяют перейти к анализу качества оптического восстановления изображений со сжатых разработанным методом цифровых голограмм.

В главе 4 описана экспериментальная реализация методов оптического восстановления изображений со сжатых цифровых голограмм. В §4.1 приведены описание и схема экспериментальной установки для оптического восстановления сжатых полутоновых внеосевых голограмм с использованием фазового жидкокристаллического ПВМС с 256 градациями (схема представлена на Рисунке 3).

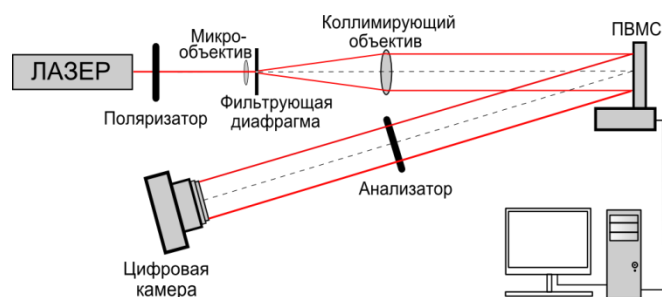


Рисунок 3 – Принципиальная схема экспериментальной установки для оптического восстановления сжатых полутоновых внеосевых голограмм с использованием фазового жидкокристаллического ПВМС

В §4.2 продемонстрированы результаты экспериментов по оптическому восстановлению изображений со сжатых скалярными и векторными методами квантования цифровых голограмм с различным числом градаций. Наилучшее качество восстановления демонстрируют методы динамических ядер, Ллойда-Макса и разработанный метод кластеризации по одинаковому количеству пикселей. Худшее качество восстановления демонстрируют методы округления по числу уровней, равномерного квантования по уровню и метод срединных точек. На Рисунке 4 представлены примеры оптического восстановления бинарных объектов после квантования различными методами. С учетом качества восстановления и вычислительной ресурсоемкости методов предложенный метод является ОПТИМАЛЬНЫМ.



Разработанный комбинированный метод компрессии голограмм был экспериментально апробирован при оптическом восстановлении сжатых данным методом голограмм. В §4.3 приведены примеры экспериментально восстановленных изображений и проверки расчетных оценок качества компрессии цифровых голограмм разработанным методом. Наилучшее качество восстановления демонстрируется при использовании реальной и мнимой компонент фурье-спектра голограмм, пороговом обнулении 80 % вейвлет-коэффициентов и квантовании вейвлет-коэффициентов на 6 бит методом динамических ядер.

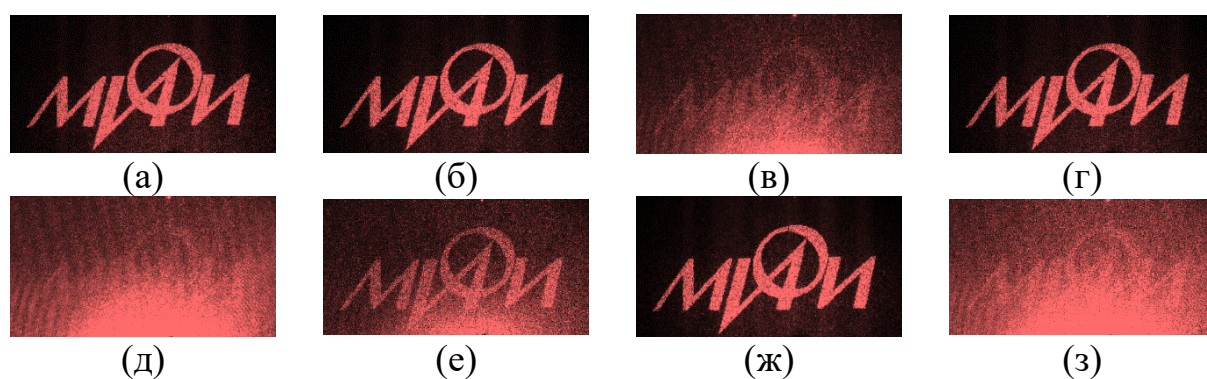


Рисунок 4 – Примеры изображений, оптически восстановленных с квантованных до 2 градаций голограмм с помощью методов: а) динамических ядер, б) медиан, в) срединных точек, г) Ллойда-Макса, д) округления по числу уровней, е) логарифмического неравномерного квантования по уровню, ж) кластеризации по одинаковому количеству пикселей, з) равномерного квантования по уровню

В §4.4 представлены результаты оценки эффективности компрессии внеосевых цифровых голограмм комбинированным методом и зависимости коэффициента сжатия файлов цифровых голограмм, сжатых разработанным комбинированным методом от параметров метода: числа вейвлет-коэффициентов, обнуленных по порогу, и количества их градаций (бит). Наиболее оптимальным уровнем сжатия является пороговое обнуление 80% вейвлет-коэффициентов и их квантование до 3-4 бит. В таком случае потери качества восстановленных изображений находятся на уровне 30%, а коэффициент сжатия достигает 180 раз.

Таким образом, оценки качества экспериментально оптически

восстановленных изображений подтверждают расчетные оценки качества, приведенные в 2 и 3 главах.

В главе 5 рассмотрены возможности высокоскоростной реализации цифровых голограмм с применением микрозеркальных модуляторов. Модуляторы данного типа осуществляют бинарную модуляцию выводимых изображений. В §5.1 приведен обзор существующих методов бинаризации, основанных на пороговой обработке и процедуре диффузии ошибки, а также оценка применимости методов для задач бинаризации цифровых голограмм. Рассмотрены две группы методов пороговой обработки: 18 глобальных методов и 12 локальных методов, а также три группы методов диффузии ошибки: 16 стандартных, 8 точечных и 6 диагональных методов.

В §5.2 представлены результаты сравнительной оценки 18 глобальных методов бинаризации по порогу и 12 локальных методов бинаризации по порогу по качеству восстановления изображений с бинаризованных цифровых голограмм. Наиболее высокое качество восстановления по результатам данного исследования достигается при использовании глобальных методов Киттлера и Ридлера-Кальварда на основе кластеризации, глобальных методов Ли и Отцу на основе анализа энтропии, а также локальных методов Ниблэка и Отцу.

В §5.3 продемонстрированы результаты сравнительной оценки качества восстановления голограмм, бинаризованных с применением 16 методов диффузии ошибки, 8 методов точечной диффузии и 6 методов диагональной диффузии. Получено, что при бинаризации голограмм наиболее высокое качество восстановления достигается в случае применения методов диффузии ошибки, использующих матрицы весовых коэффициентов с большим количеством элементов (6-10) и матриц точечной диффузии ошибки.

Предложена оригинальная модификация процедуры бинаризации голограмм на основе диффузии ошибки. Проведен анализ влияния параметров процедуры диффузии ошибки на качество восстановления изображений с голограмм,

бинаризованных 30 методами диффузии ошибки с 7 пороговыми метриками и 12 направлениями обхода. Порог, вычисленный по методу Отцу, и сложные матрицы направления обхода пикселей Мессе и Кната позволяют повысить качество восстановления до 15% по сравнению со стандартной реализацией диффузии ошибки.

На основе анализа 60 методов бинаризации разработан оригинальный адаптивный метод бинаризации с комбинированием локального порога и процедуры диффузии ошибки, представленный в §5.4. Алгоритм разработанного метода состоит из следующих этапов:

1. Разделение голограммы на блоки пикселей размером  $N \times N$  пикселей.
2. Определение локального порога для каждого блока пикселей на основе выбранного алгоритма локальной бинаризации по порогу.
3. Последовательное сравнение значения яркости каждого пикселя голограммы с вычисленным пороговым значением и определение соответствующего значения ошибки.
4. Диффузия значения ошибки среди соседних к рассматриваемому пикселей с учетом весовых коэффициентов и матрицы обхода пикселей.

Метод экспериментально апробирован в случае сжатия компьютерно-синтезированных и оптически зарегистрированных голограмм. По результатам численных экспериментов достигнуто качество бинаризации для оптически записанных голограмм на 7,5%, а для синтезированных голограмм на 18% выше по сравнению со стандартными методами.

Для проверки расчетных оценок качества восстановления изображений с бинаризованных голограмм проведен вывод голограмм на микрозеркальный ПВМС и оптическое восстановление. Примеры полученных восстановленных изображений представлены в §5.5. На Рисунке 5 приведены значения метрик качества восстановления изображений с оптически зарегистрированных (а) и численно-синтезированных (б) голограмм, бинаризованных методами на основе

диффузии ошибки, бинаризации по порогу и разработанным адаптивным методом. Экспериментально подтверждено, что разработанный метод бинаризации является наиболее универсальным, обеспечивающим стабильно высокое качество восстановления изображений как для цифровых, так и для синтезированных голограмм различных объектов.

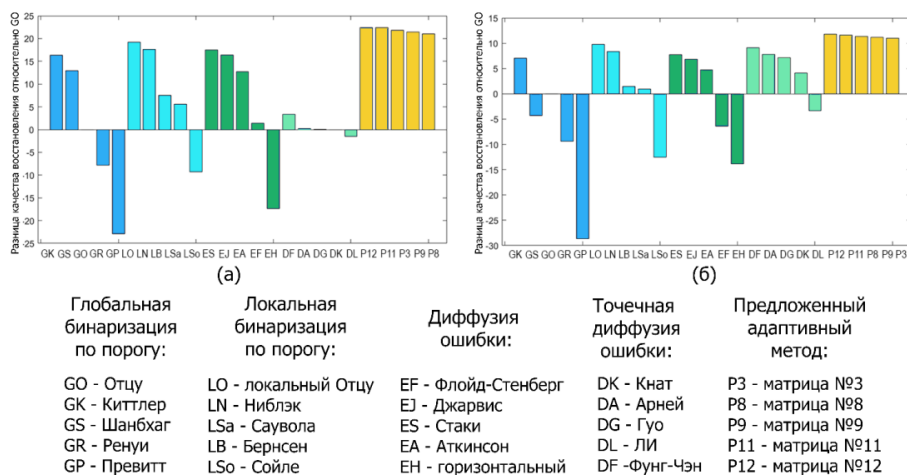


Рисунок 5 – Метрики качества (усредненные значения нормированного среднеквадратического отклонения, пикового отношения сигнал/шум и индекса структурного сходства) восстановленных изображений с голограмм, бинаризованных методами бинаризации по порогу, методами на основе диффузии ошибки и разработанным адаптивным методом бинаризации.

Таким образом, расчётные и экспериментальные результаты по оценке степени компрессии и качества восстановления изображений с голограмм, сжатых предложенными в работе методами демонстрируют возможности повышения степени сжатия голографической информации при минимизации потерь качества при ее восстановлении.

### Заключение

В работе получены следующие основные результаты и выводы:

1. Для компьютерно-синтезированных и оптически зарегистрированных голограмм плоских объектов и объемных сцен систематизированы и дополнены расчётные оценки качества восстановления изображений с голограмм, сжатых

методами частотной фильтрации, скалярного, векторного и вейвлет-сжатия. Все расчётные оценки подтверждены экспериментально.

2. С помощью численного моделирования выполнено сравнение скалярных и векторных методов квантования цифровых голограмм по качеству восстановления изображений со сжатых голограмм Френеля.

3. Предложен метод квантования цифровых голограмм на основе кластеризации по одинаковому количеству пикселей. Проведено сравнение метода со скалярными и векторными аналогами по качеству восстановления, дифракционной эффективности и вычислительной ресурсоёмкости. Предложенный метод является оптимальным по соотношению качества восстановления и ресурсоемкости.

4. Проведена сравнительная оценка методов вейвлет-сжатия и методов дополнительной компрессии вейвлет-коэффициентов цифровых голограмм по качеству восстановления изображений со сжатых голограмм. Определены оптимальные параметры компрессии.

5. Предложен комбинированный метод компрессии внеосевых цифровых голограмм. Разработанный метод экспериментально апробирован при сжатии цифровых голограмм плоских объектов и объемных сцен. Определены оптимальные параметры метода для каждого типа голограмм.

6. Проведена сравнительная оценка разделения фурье-спектра голограммы на амплитудную и фазовую или реальную и мнимую компоненты в предложенном комбинированном методе компрессии внеосевых цифровых голограмм. Использование реальной и мнимой компонент позволяет повысить качество восстановления более чем на 10% по сравнению со случаем использования амплитудной и фазовой компонент.

7. Проведена оценка степени сжатия голограмм разработанным методом при различных параметрах метода. Разделение спектра на реальную и мнимую компоненты позволяет получить степень сжатия голографической информации до  $10\div 12$  раз выше, чем при использовании аналогов.

8. Путем численного моделирования выполнено сравнение 60 методов бинаризации цифровых голограмм. Предложена и экспериментально апробирована оригинальная методика повышения качества бинаризованных голограмм путем модификации параметров процедуры диффузии ошибки. Использование предложенных модификаций способствует повышению качества до 15% по сравнению со стандартными реализациями.

9. Предложен и экспериментально апробирован адаптивный метод бинаризации. Метод апробирован в случае сжатия голограмм плоских объектов и объемных сцен. Метод позволяет повысить качество бинаризации до 18% по сравнению со стандартными методами бинаризации.

10. Экспериментальные количественные оценки качества оптического восстановления изображений в лазерном излучении на созданной экспериментальной установке с использованием микрозеркального и жидкокристаллического ПВМС для всех используемых методов компрессии цифровых голограмм подтверждают расчетные оценки качества восстановленных изображений.

#### Список основных публикаций по теме диссертации

- 1 Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., **Kurbatova E.A.**, Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov R.S. Comparative analysis of off-axis digital hologram binarization by error diffusion // Journal of Optics, Vol. 23 (7), 2021, Pp. 075703. <https://doi.org/10.1088/2040-8986/ac05d1>
- 2 Cheremkhin, P.A., Evtikhiev, N.N., **Kurbatova, E.A.**, Krasnov, V.V., Rodin, V.G. Error diffusion hologram binarization for DMD applications // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2021, 11698, 116980W <https://doi.org/10.1117/12.2579355>
- 3 **Kurbatova E.A.**, Rodin V.G., Cheremkhin P.A. Iterative binarization of digital holograms using error diffusion method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing, Vol. 56, № 2, 2020, Pp. 205-211 <https://doi.org/10.3103/S8756699020020120>

- 4 Cheremkhin P.A., **Kurbatova E.A.** Wavelet compression of off-axis digital holograms using real/imaginary and amplitude/phase parts // Scientific Reports, Vol. 9, 2019, Pp. 7561 <https://doi.org/10.1038/s41598-019-44119-0>
- 5 **Kurbatova E.A.**, Cheremkhin P.A. Binarization of digital holograms by thresholding and error diffusion techniques // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (Optical Society of America), 2019, paper Th3A.22. <https://doi.org/10.1364/DH.2019.Th3A.22>
- 6 Cheremkhin P.A., **Kurbatova E.A.** Comparative appraisal of global and local thresholding methods for binarisation of off-axis digital holograms // Optics and Lasers in Engineering, Vol. 115, 2019, pp. 119-130. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2018.11.019>
- 7 Cheremkhin P.A., **Kurbatova E.A.** Optical dynamic reconstruction of quantized digital and computer-generated holograms // Proceedings of 2018 International Conference Laser Optics (ICLO), 2018, Pp. 203. <https://doi.org/10.1109/LO.2018.8435412>
- 8 Cheremkhin P.A., **Kurbatova E.A.** Quality of reconstruction of compressed off-axis digital holograms by frequency filtering and wavelets // Applied Optics, Vol. 57, Issue 1, 2018, pp. A55-A64. <https://doi.org/10.1364/AO.57.000A55>
- 9 Evtikhiev N.N., **Kurbatova E.A.**, Cheremkhin P.A. Coefficients Quantization at Off-Axis Digital Hologram Wavelet Compression // KnE Energy & Physics, Vol. 3 (3), 2018, Pp. 523-534. <https://doi.org/10.18502/ken.v3i3.2066>
- 10 Cheremkhin P.A., **Kurbatova E.A.** Compression of digital holograms using 1-level wavelet transforms, thresholding and quantization of wavelet coefficients // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging, OSA Technical Digest (Optical Society of America), 2017, Pp. W2A.38. <https://doi.org/10.1364/DH.2017.W2A.38>
- 11 Cheremkhin, P.A., Evtikhiev, N.N., Krasnov, V.V., **Kurbatova, E.A.**, Rodin, V.G. Recording of digital holograms of 3D scenes with depth up to 0.5 meter // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2017, 10127, 1012713 <https://doi.org/10.1117/12.2253686>
- 12 Cheremkhin P.A., **Kurbatova E.A.** Numerical comparison of scalar and vector methods of digital hologram compression // Proceedings of SPIE, Vol. 10022, 2016, Pp. 1002227. <https://doi.org/10.1117/12.2246411>

- 13 **Kurbatova E.A.**, Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N. Methods of compression of digital holograms, based on 1-level wavelet transform // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 737, 2016, Pp. 012071. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012071>
- 14 Evtikhiev, N.N., Cheremkhin, P.A., Krasnov, V.V., **Kurbatova E.A.**, Porshneva, L.A., Rodin, V.G. Simple method of modelling of digital holograms registering and their optical reconstruction // Journal of Physics: Conference Series, 2016, 737(1), 012073 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/737/1/012073>
- 15 Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., **Kurbatova E.A.**, Starikov R.S., Starikov S.N. Integral estimation of number of resolvable signal levels of digital cameras // Journal of Physics: Conference Series, Vol. 735, 2016, Pp. 012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/735/1/012007>
- 16 Cheremkhin, P.A., Evtikhiev, N.N., Krasnov, V.V., Kulakov M.N., **Kurbatova E.A.**, Molodtsov, D.Y., Rodin, V.G. Demonstration of digital hologram recording and 3D-scenes reconstruction in real-time // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2016, 9889, 98891M <https://doi.org/10.1117/12.2227767>
- 17 Starikov, S.N., Cheremkhin, P.A., Krasnov, V.V., **Kurbatova, E.A.**, Starikov, R.S. Method of Improvement of Signal-to-noise Ratio of Registered Shots using Dark and Light Spatial Noise Portraits of Camera's Photosensor // Physics Procedia, 2015, 73, стр. 264–268 <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.168>
- 18 **Kurbatova E.A.**, Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Starikov S.N. Methods of Compression of Digital Holograms // Physics Procedia, Vol. 73, 2015, Pp. 328–332. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2015.09.150>
- 19 Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheremkhin P.A., **Kurbatova E.A.** Evaluation of diffraction efficiency and image quality in optical reconstruction of digital Fresnel holograms // Radiophysics and Quantum Electronics, Vol. 57, No. 8-9, 2015, Pp. 635-649. <https://doi.org/10.1007/s11141-015-9549-6>
- 20 Cheremkhin, P.A., Krasnov, V.V., **Kurbatova, E.A.**, Rodin, V.G., Starikov, S.N. Estimation of number of resolvable signal levels of photo- and videocameras // Journal of Physics: Conference Series, 2014, 536(1), 012023 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/536/1/012023>