

На правах рукописи



**Турсунов Иброхим**

**РАЗРАБОТКА УСТРОЙСТВ УПРАВЛЕНИЯ ФОРМОЙ ВОЛНОВОГО  
ФРОНТА НА ОСНОВЕ МАТРИЧНОГО МОДУЛЯТОРА СВЕТА**

Специальность 05.11.07 – **Оптические и оптико-электронные  
приборы и комплексы**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном электро-техническом университете «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) (СПбГЭТУ «ЛЭТИ») на кафедре лазерных измерительных и навигационных систем (ЛИНС)

Научный руководитель:

**Венедиктов Владимир Юрьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник кафедры ЛИНС СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

Официальные оппоненты:

**Петров Виктор Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник лаборатории «Квантовой информатики» федерального автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики»

**Погода Анастасия Павловна**, кандидат физико-математических наук, доцент федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Балтийский государственный технический университет "ВОЕНМЕХ" имени Д.Ф. Устинова»

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук», г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая 26

Защита состоится «17» декабря 2019 г. в «15<sup>30</sup>» часов на заседании диссертационного совета Д 212.238.08 Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) по адресу: 197376, Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина) и на сайте СПбГЭТУ: [www.eltech.ru](http://www.eltech.ru)

Автореферат разослан «16» октября 2019 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.238.08,  
кандидат технических наук



\_\_\_\_\_ Е.А. Смирнов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Возможность управления формой волнового фронта имеет огромное значение для верификации научных гипотез в волновой оптике, в частности, в цифровой голографической интерферометрии. Возможность деформировать волновой фронт по заранее известному закону также имеет большое значение для решения задач медицины, архитектуры, связи, астрономии. Сегодня одним из наиболее удобных и доступных способов управления формой волнового фронта в лабораторных условиях является применение матричного модулятора света.

Чаще всего матричные модуляторы применяются в голографической интерферометрии. В результате дифракции лазерного пучка на интерферограмме восстанавливается объектная волна, содержащая в себе информацию об объекте исследования. При использовании матричного модулятора модуляция формы волнового фронта задается с помощью цифрового изображения интерферограммы, тогда как применение классической схемы на основе фоточувствительных материалов сопряжено с определенными трудностями. Во многом это объясняет тот факт, что сегодня экспериментальная часть многих исследований голографической интерферометрии основана на применении матричного модулятора света, что подтверждается научными публикациями.

В голографической интерферометрии смещение полос на результирующей интерференционной картине, вызванное фазовым сдвигом от объекта исследования, может достигать порядка нескольких нанометров, поэтому важно добиться как можно большего увеличения смещения полос в итоговой интерференционной картине. Для решения этой задачи используется большое число методов повышения чувствительности интерференционной картины, причем предложены эти методы изначально были в то время, когда элементная база оптической лаборатории значительно отличалась от современной, главным образом отсутствовали доступные цифровые средства: компьютеры, цифровые камеры и пространственные модуляторы света. С этой точки зрения огромный интерес представляет возможность создания методов повышения чувствительности интерференционной картины на современной элементной базе. В основе своей методы должны быть аналогичны классическим.

При распространении светового сигнала по оптическому каналу связи неизбежны появления искажений, вызванные aberrациями от элементов регистрирующей системы. При повышении чувствительности итоговой интерференционной картины также увеличиваются и искажения от aberrаций. Для решения этой проблемы отечественными и зарубежными авторами было предложено большое число способов компенсации искажений. Большая их часть не нашла широкого распространения из-за сложностей, связанных с регистрацией интерференционной картины на фоточувствительных материалах, а также из-за сложности последующей обработки записанных таким способом интерферограмм. Применение цифровой обработки изображений и пространственного модулятора света помогает обойти эти сложности.

Большой интерес сегодня представляют оптические вихри - оптические пучки с уникальной топологией распространения электромагнитной энергии: центр пучка с нулевой интенсивностью, а фазовое распределение вокруг этого центра образует структуру, аналогичную спирали Архимеда. Благодаря своим топологическим особенностям оптические вихри представляют большой интерес в задачах передачи информации по оптическому каналу связи на открытой трассе. Голографический метод формирования оптических вихрей сегодня один из самых распространенных в научных публикациях. Интерферограмма оптического вихря, называемая также маской-интерферограммой, может быть синтезирована на компьютере, а формирование оптического вихря происходит при дифракции на пространственном модуляторе света, на который предварительно было записано цифровое изображение маски-интерферограммы. Один из способов повышения дифракционной эффективности интерферограммы заключается в изменении профиля штриха с синусоидального на треугольный.

В одном пучке может распространяться несколько оптических вихрей, благодаря чему можно добиться многоканальной передачи данных в одном световом пучке. На стороне приемника излучения при этом возникает задача распознавания топологического заряда оптического вихря. Сегодня подобные задачи все интенсивнее решаются с помощью систем машинного обучения и компьютерного зрения.

Практическая реализация устройств управления формой волнового фронта была осуществлена на кафедре ЛИНС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Программная часть была реализована преимущественно с помощью языка программирования Python и свободно-распространяемых библиотек.

Актуальность проделанных экспериментальных исследований по управлению формой волнового фронта с помощью разработанных устройств на основе пространственного модулятора света связана как с потребностями оптических лабораторий и развитием областей исследований, связанных с увеличением сдвига полос интерференционной картины, так и с сопутствующей задачей компенсации искажений системы регистрации, вызванных генерацией оптических вихрей, и последующей регистрацией их топологического заряда.

**Целью** данной работы является разработка устройств цифровой голографической интерферометрии на основе матричного модулятора света: устройство для повышения чувствительности интерферометрических измерений; устройство для компенсации искажений от аберраций системы регистрации; устройство для повышения дифракционной эффективности интерферограммы оптического вихря; устройство для распознавания топологического заряда оптического вихря на основе данных с датчика волнового фронта.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие **задачи**:

- разработка способа повышения величины изгиба полос интерференционной картины (усиления голограммы) с применением современной элементной базы;
- компенсация искажений системы регистрации при повышении чувствительности интерференционной картины (усилении голограммы);
- генерация оптического вихря с помощью синтезированной голограммы;
- повышение дифракционной эффективности голограммы оптического вихря;
- разработка схемы распознавания топологического заряда оптического вихря и ее экспериментальная реализация.

**Научная новизна.** С помощью пространственного модулятора света Hologee LC2002 экспериментально удалось добиться увеличения глубины прогиба полос интерферограммы в 2 раза для объекта исследования с размерами порядка нескольких десятков нанометров – таким образом показана возможность реализации процедуры повышения чувствительности интерферометрических измерений с помощью пространственного модулятора.

Модифицирована классическая схема голографической интерферометрии по компенсации аберраций системы регистрации путем пространственного

перекрытия интерферограмм. Сложная в исполнении процедура пространственного физического перекрытия интерферограмм заменена цифровой обработкой изображений интерферограмм – для этой процедуры была написана программа для ЭВМ. Сферическое зеркало удалось заменить плоским, что также упростило схему эксперимента. В ходе экспериментальной проверки показана возможность компенсации искажений с помощью предложенной модификации классической схемы.

Математически синтезированы интерферограммы оптического вихря. Экспериментально исследована возможность генерации оптических вихрей голографическим способом на основе матричного модулятора света.

На основе синтезированных интерферограмм оптического вихря удалось синтезировать интерферограммы с асимметричным профилем штриха, для чего использовался метод асимметризации на основе сугубо локальной информации. Экспериментально удалось установить, что асимметризация профиля штриха интерферограммы оптического вихря повышает дифракционную эффективность интерферограммы на 20% по сравнению с дифракционной эффективностью интерферограммы с синусоидальным профилем.

Предложена методика распознавания топологического заряда оптического вихря на основе машинного обучения по данным с датчика волнового фронта. Работа обученного классификатора была проверена на экспериментальной выборке из 400 измерений и показала близкую к 100% точность на тестовом и обучающем наборах.

**Практическая значимость.** Результаты исследований могут быть использованы при проведении экспериментов в цифровой голографической интерферометрии, а также при создании устройств на основе пространственного модулятора света. В работе показана возможность использования слегка модифицированных классических методов голографической интерферометрии в оптической лаборатории, оснащённой современной элементной базой, при помощи современного программного обеспечения: цифровых камер, модуляторов, цифровой обработки изображений, машинного обучения.

Исследования по повышению чувствительности интерферограмм и компенсации искажений системы регистрации могут быть использованы в нанометрологии для создания высокочувствительных систем измерения объектов с размерами порядка нескольких нанометров. Путем увеличения

быстродействия схемы можно добиться создания системы, работающей в реальном времени.

Выполненные исследования оптических вихрей демонстрируют возможность их генерации с помощью пространственного модулятора света голографическим способом, а асимметризация профиля интерферограммы позволяет повысить дифракционную эффективность голограммы.

Предложенный метод распознавания топологического заряда оптического вихря представляет интерес в системах коммуникации для решения задачи демультимплексирования оптических вихрей с разным значением топологического заряда в оптическом канале связи.

**Методология и методы исследования.** Работа выполнена на основе теоретических принципов волновой оптики и концепции построения приборов в цифровой голографической интерферометрии. Исследования были основаны на программном моделировании с помощью разработанных алгоритмов и программных средств (список свидетельств о регистрации программ для ЭВМ приведен в конце), а экспериментальная проверка результатов была проведена на кафедре ЛИНС Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Повышение чувствительности интерферометрических измерений в цифровой голографической интерферометрии возможно благодаря перезаписи интерферограмм объекта исследования на основе пространственного модулятора света и лазерного микроинтерферометра Линника.
2. Компенсации искажений можно добиться цифровой обработкой изображений интерферограмм с последующей записью результата в память пространственного модулятора света.
3. Повышения дифракционной эффективности интерферограммы оптического вихря можно добиться за счет асимметризации профиля полос маски-интерферограммы на основе сугубо локальной информации. Дифракционная эффективность маски-интерферограммы с асимметричным профилем, записанной на матричный модулятор, на 20% превосходит дифракционную эффективность маски-интерферограммы с синусоидальным профилем.

4. Построение классификатора для распознавания топологического заряда оптического вихря возможно благодаря применению датчика волнового фронта Шака-Гартмана и машинного обучения.

**Достоверность.** Достоверность полученных в работе результатов и выводов не вызывает сомнения, так как в ходе работы применялись ранее апробированные и физически обоснованные методы, характеризующиеся высокой воспроизводимостью.

**Апробация работы.** Основные результаты работы были представлены на конференциях:

- Международная конференция «SPIE Security + Defence» (2015), Тулуза, Франция.
- Международная конференция «Оптика лазеров» (2014), Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция «Оптика лазеров» (2016), Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция «Оптика лазеров» (2018), Санкт-Петербург, Россия.
- Международная конференция «Holography: Advances and Modern Trends V» (2017), Прага, Чешская республика.
- Международная конференция «Holography: Advances and Modern Trends VI» (2019), Прага, Чешская республика.
- Международная конференция «Holography, Diffractive Optics, and Applications VII» (2016), Пекин, Китай.
- Международная конференция «Holography, Diffractive Optics, and Applications VIII» (2018), Пекин, Китай.

**Личный вклад.** Автор выполнил экспериментальную работу; разработал программное обеспечение для синтеза интерферограмм оптических вихрей, программное обеспечение для процедуры перекрытия интерферограмм; предложил метод распознавания оптических вихрей на основе машинного обучения и данных с датчика волнового фронта; реализовал предложенный метод с помощью языка программирования Python и программных пакетов для него.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 10 статей в иностранных изданиях, входящих в базы цитирования SCOPUS и Web of Science, а также 5 свидетельств о регистрации программы для ЭВМ.



## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулирована цель работы, указаны задачи, которые необходимо решить для достижения поставленной цели, показана научная новизна и практическая значимость работы.

В **первой главе** дается обзор особенностей цифровой голографической интерферометрии.

Сделан обзор методов цифровой голографической интерферометрии. Приведено сравнение цифровой и классической голографической интерферометрии, указаны особенности каждой области. Описано современное состояние цифровой голографической интерферометрии. Приведен обзор современных средств и программного обеспечения, применяемых в типовой оптической лаборатории университета сегодня.

Каждый этап работы основан на применении пространственного модулятора. В экспериментальной части работы использовался модулятор LC 2002.

**Вторая глава** посвящена решению проблемы повышения чувствительности интерферометрических измерений.

В ходе работы проведен информационно-патентный поиск существующих методов решения задачи повышения чувствительности интерференционных голографических измерений, описано современное состояние этого вопроса. В главе также описаны принципы повышения сдвига полос в различных классических методах, сложности практической реализации этих методов, достоинства и недостатки разных подходов. В результате проведенного обзора существующих методов выяснилось, что многие из них приводят к схожим результатам, но практическая реализация некоторых оптических схем бывает затруднена из-за сложности юстировки оптических элементов.

Принцип повышения чувствительности интерферометрических измерений продемонстрирован при помощи метода перезаписи одним пучком света. Схема установки показана на рисунке 1.

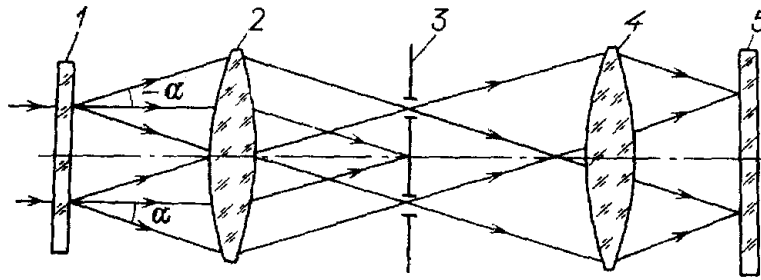


Рис. 1 - Оптическая схема перезаписи голограмм одним пучком света: 1 – исходная голограмма; 2,4 – объективы телескопической системы; 3 – диафрагмы; 5 – вторичная голограмма

Если для приведенной схемы процедуру повышения чувствительности повторить  $N$  раз, то амплитудный коэффициент пропускания последней интерферограммы будет иметь вид:

$$\tau_0(\mathbf{r}) \sim 1 + \cos((2n)^N \mathbf{k}_0 \mathbf{r} + (2n)^N \varepsilon + (2n)^N \varphi) \quad (1)$$

Выражение (1) описывает интерференционную картину с увеличенной чувствительностью.

Для повышения чувствительности в экспериментальной работе был выбран метод увеличения сдвига полос интерферограммы с помощью цифрового микроинтерферометра. Принципы работы этой схемы были исследованы с применением пространственного модулятора света (см. рис. 2).

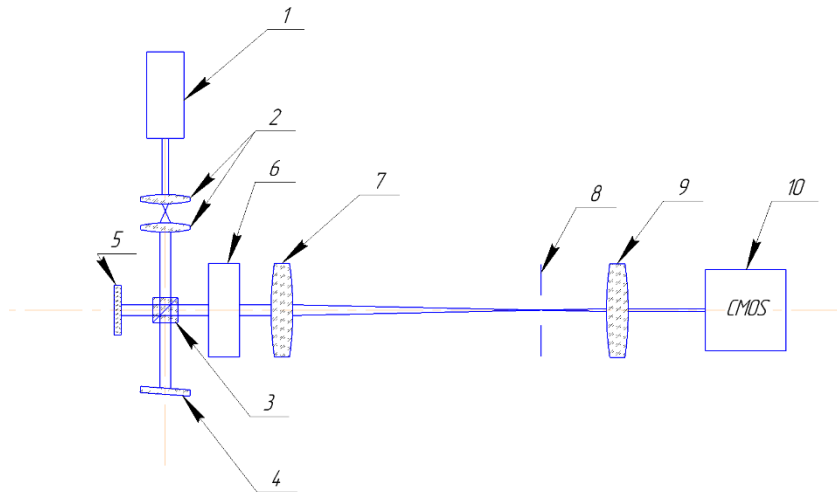


Рис. 2 - Схема перезаписи интерферограмм с помощью матричного модулятора.

1 – He-Ne лазер; 2 – коллиматор; 3 – светоделительный куб; 4, 5 – зеркала; 6 – модулятор света; 7,9 – объективы; 8 – диафрагма; 10 – цифровая камера

Проделанная работа подтвердила достоинства этого способа перезаписи: схема перезаписи мало чем отличается от схемы для записи интерферограмм. В качестве объекта исследования выступала наноразмерная ступенька на керамической пластине. В результате перезаписи удалось добиться повышения сдвига полос итоговой интерференционной картины в два раза.

**Третья глава** посвящена проблеме коррекции искажений при повышении чувствительности интерференционных измерений.

Был проведен обзор существующих методов коррекции искажений системы регистрации, рассмотрены принципы компенсации, сделаны выводы о достоинствах и недостатках различных схем. В качестве способа компенсации была выбрана схема компенсации искажений путем пространственного сложения интерферограмм, так как процедуру пространственного сложения интерферограмм можно легко выполнить с помощью цифровой обработки изображений. Схема была модифицирована для работы с матричным модулятором (см. рис. 3).

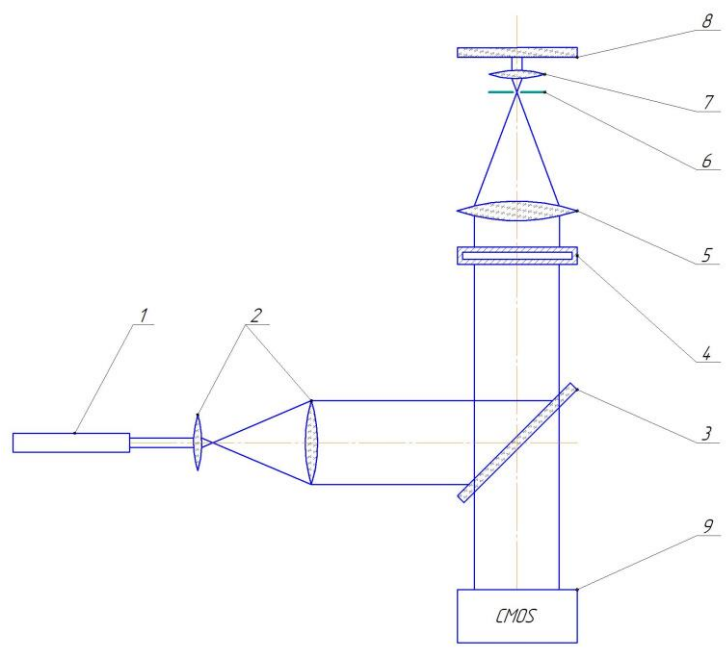


Рис. 3 - Оптическая схема цифрового способа компенсации на основе совмещенных интерферограмм. 1 – He-Ne-лазер; 2 – коллиматор; 3 – полупрозрачная пластинка; 4 – пространственный модулятор света; 5,7 – телескопическая система; 6 – диафрагма; 8 – плоское зеркало; 9 – цифровая камера

В результате компенсации искажений от аберраций, которые для эксперимента были внесены искусственно для большей наглядности результата, удалось добиться эффекта компенсации искажений.

**Четвертая глава** посвящена генерации оптических вихрей, методу повышения дифракционной эффективности оптического вихря, а также проблеме распознавания топологического заряда оптического вихря.

Проведен анализ существующих методов по генерации оптических вихрей. Описана физика процесса и суть явления оптической сингулярности. Показаны возможные пути применения оптических вихрей.

В главе дано определение и раскрыта физическая суть понятия топологического заряда.

В качестве способа генерации оптических вихрей был выбран голографический способ как наиболее простой в реализации в оптической лаборатории и при использовании пространственного модулятора света (см. рис. 4). Для реализации метода были синтезированы интерферограммы оптического вихря на основе аналитического выражения, задающего закон изменения глубины фазовой модуляции в зависимости от координаты.

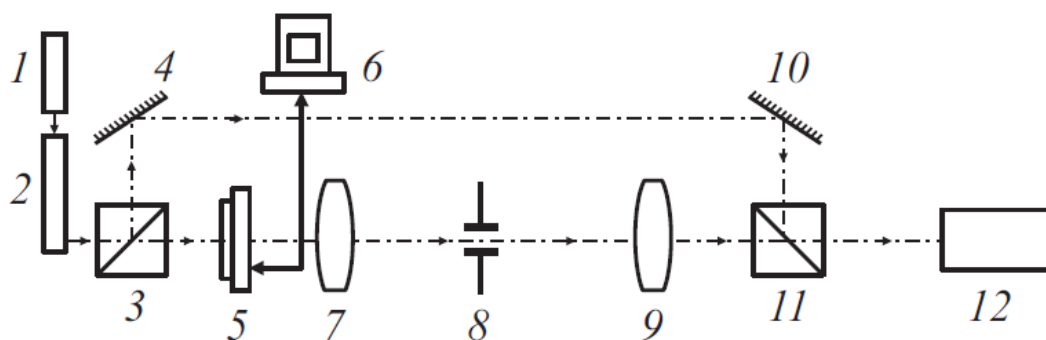


Рис. 4 - Схема экспериментальной установки генерации оптических вихрей. 1 – He-Ne лазер; 2 – коллиматор; 3,11 – светоделительные кубы; 4,10 – плоские зеркала; 5 – пространственный модулятор света; 6 – персональный компьютер; 7,9 – телескопическая система; 8 – диафрагма; 12 – цифровая камера

В результате экспериментальных исследований выяснилось, что, используя пространственный модулятор света, в первом порядке дифракции можно генерировать оптические вихри со значением топологического заряда до 10 порядка включительно.

Голографический способ прост в исполнении, но в ходе исследования также подтвердился главный недостаток этого способа, суть которого заключается в том, что большая часть энергии при дифракции рассеивается. Одним из способов повышения энергетического выхода объектной волны при дифракции на интерферограмме заключается в том, чтобы использовать не синусоидальный профиль интерференционной картины, а профиль, по форме максимально аппроксимированный треугольной функцией. В этом случае говорят об асимметризации профиля интерференционной картины.

Проведенные исследования показали, что для целей цифровой голографической интерферометрии в экспериментах с применением пространственных модуляторов подходит способ асимметризации на основе метода сугубо локальной информации. Анализ показал, что для построения асимметричного профиля достаточно синтезировать две маски-интерферограммы, фазы которых сдвинуты друг относительно друга на девяносто градусов.

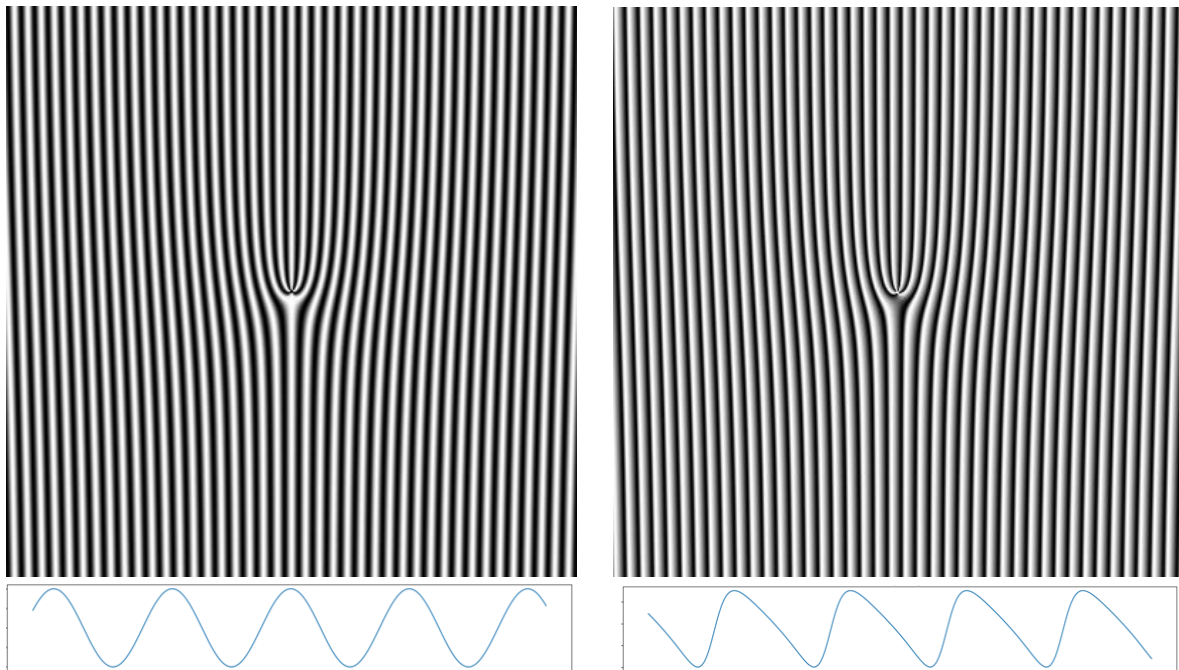


Рис. 5 - Слева представлена маска-голограмма с синусоидальным профилем для вихря с топологическим зарядом  $m=4$ , справа - с треугольным профилем. Снизу представлены графики изменения глубины модуляции фазы вдоль оси  $x$  при  $y=0$

На основе описанного способа были синтезированы маски-интерферограммы с асимметричным профилем штриха. Пример асимметризации представлен на рис. 5. Экспериментально было проведено сравнение двух идентичных интерферограмм с синусоидальным и асимметричным профилем штриха. Дифракционная эффективность маски-интерферограммы с треугольным профилем была приблизительно на 20% выше, чем дифракционная эффективность аналогичной маски-интерферограммы с синусоидальным профилем.

В главе рассмотрены способы применения оптических вихрей на практике. В ходе исследования выяснилось, что перспективным способом передачи данных является кодирование информации напрямую в оптическом

пучке при распространении этого пучка в среде на открытой трассе (например, передача данных в городе от одного здания к другому в зоне прямой видимости). Сложности, которые при этом возникают, связаны с искажением пучка из-за случайных aberrаций среды (например, атмосферных турбулентностей). Ослабить воздействие этих aberrаций можно путем применения оптических вихрей.

При передаче сигнала по оптическому каналу на стороне приемника излучения возникает задача распознавания топологического заряда оптического вихря. В ходе исследования был предложен способ распознавания оптических вихрей на основе данных измерений датчика волнового фронта Шака-Гартмана и с использованием системы машинного обучения.

На основе серии полученных данных был построен линейный классификатор методом машинного обучения с учителем для распознавания топологического заряда оптического вихря. Построение классификатора было произведено на языке программирования Python с помощью библиотек numpy и scikit-learn. В качестве алгоритма использовался метод логистической регрессии LogisticRegression из библиотеки scikit-learn. Была произведена проверка классификатора как на тестовом наборе, так и на обучающей выборке. Классификатор распознал все оптические вихри, которые были зарегистрированы с помощью датчика волнового фронта Шака-Гартмана. Последующие переобучение и случайные разбиения на тестовый и обучающий наборы показали аналогичные результаты.

В заключении приведены основные результаты работы:

- были рассмотрены методы классической голографической интерферометрии и проведена модификация некоторых из них, а также проведена экспериментальная проверка работы этих схем с использованием пространственного модулятора света;
- предложена схема устройства повышения чувствительности на основе лазерного микроинтерферометра Линника и проведено экспериментальное исследование ее работы;
- разработана схема устройства на основе модификации классической схемы компенсации искажений за счет пространственного сложения интерферограмм с использованием пространственного модулятора света;
- исследован голографический способ генерации оптических вихрей с применением пространственного модулятора света, проведено сравнение

дифракционной эффективности масок-интерферограмм с синусоидальным и асимметричным профилями;

- предложен метод по распознаванию топологического заряда оптического вихря на основе машинного обучения по данным с датчика волнового фронта Шака-Гартмана. Объем обрабатываемых этим методом данных намного меньше (в отношении разрешения раstra датчика к разрешению матрицы цифровой камеры) объема обрабатываемых данных при использовании прямого обучения на картинах оптических вихрей, что является неоспоримым достоинством метода. На основе этого метода предложено устройство по распознаванию топологического заряда оптического вихря.

#### ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Формирование оптических вихрей с помощью голограмм с асимметричным профилем штриха / *Аксенов В.П., Венедиктов В.Ю., Севрюгин А.А., Турсунов И.М.* // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124. – В. 2 – С. 274–279
2. Detection of optical vortices using cyclic, rotational and reversal shearing interferometers / *Gavril'eva K.N., Mermoul A., Sevryugin A.A., Shubenkova E.V., Touil M., Tursunov I.M., Efremova E.A., Venediktov V.Y.* // Optics and Laser Technology. – 2019 – Vol. 113. – P. 374–378
3. Comparative study of holographic, interferometric, and other tools for vortex beam analysis / *Gavril'eva K.N., Mermoul A., Sevryugin A.A., Tursunov I.M., Venediktov V.Yu* // Proceedings of SPIE. – 2018. – V. 10818
4. Investigation of optical vortex propagation in the artificial atmospheric path / *Gavril'Eva K., Mermoul A., Sevryugin A., Shubenkova E., Touil M., Tursunov I., Venediktov V.* // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10787
5. Phase-only LCOS modulator as a correcting element in digital holographic interferometers / *Balbekin N., Petrov N., Pul'kin S., Shoev V., Sevryugin A., Tursunov I., Venediktov D., Venediktov V.* // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10818
6. Digital holographic interferometer with correction of distortions / *Balbekin N., Petrov N., Pul'kin S., Sevryugin A., Shoev V., Tursunov I., Venediktov D., Venediktov V.* // Proceedings of SPIE. – 2018. – Vol. 10799

7. *Sevryugin A.A.* Formation of phase vortices by means of holograms with asymmetric pattern / *Sevryugin A.A., Tursunov I.M., Venediktov V.Yu.* // IEEE. – Progress in Electromagnetics Research Symposium - Fall (PIERS - FALL). – 2017.
8. Application of digital holography in Jamin-Rozhdestvenskiy interferometer / *Pul'kin S., Shoev V., Sevryugin A., Tursunov I., Venediktov D., Venediktov V.* // IEEE. – Progress in Electromagnetics Research Symposium - Spring (PIERS). – 2017.
9. Transformation of Rozhdestvensky hooks in digital holographic interferometer / *Borisov E., Pul'kin S., Sevryugin A., Shoev V., Tursunov I., Venediktov D., Venediktov V.* // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10233
10. Digital holographic amplification of interferograms in the Michelson interferometer using the phase-only LCOS modulator / *Balbekin N., Petrov N., Pul'kin S., Shoev V., Sevryugin A., Tursunov I., Venediktov D., Venediktov V.* // Proceedings of SPIE. – 2017. – Vol. 10438
11. Digital holographic interferometer with correction of distortions / *Sevryugin A.A., Pulkin S.A., Tursunov I.M., etc.* // Proceedings of SPIE. – 2015. – Vol. 9648
12. Digital holographic Michelson interferometer for nanometrology / *Sevryugin A.A., Korotkov V.I., Pulkin S.A., Venediktov D.V., Venediktov V.Yu.* // Proceedings of SPIE. – 2014. – Vol. 9271
13. *Венедиктов В.Ю., Турсунов И.М.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2016618570. «Программа для ручной и автоматической настройки параметров цифровых изображений интерферограмм HologramAdjuster» // Заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (RU). – опубл. 08 июня 2016, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
14. *Венедиктов В.Ю., Турсунов И.М.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018615510. «Программа для синтеза интерферограмм для голографических экспериментов» // Заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (RU). – опубл. 08 июня 2016, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
15. *Венедиктов В.Ю.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617115. «Программа для моделирования пространственного сложения двух интерферограмм HalfFrame» / *Венедиктов В.Ю., Севрюгин А.А., Турсунов И.М.* // Заявитель и



- правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (RU). – опубл. 05 мая 2015, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
16. *Венедиктов В.Ю., Турсунов И.М.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018660170. «Программа машинного обучения для классификации оптических вихрей» // Заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (RU). – опубл. 02 июля 2015, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.
17. *Венедиктов В.Ю., Турсунов И.М.* Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019618723. «Программа для синтеза дифракционных оптических элементов» // Заявитель и правообладатель СПбГЭТУ «ЛЭТИ» (RU). – опубл. 18 июня 2019, Реестр программ для ЭВМ. – 1 с.