

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Черёмхин Павел Аркадьевич

Цифровые и интеллектуальные методы регистрации  
и обработки световых распределений  
в высокопроизводительных фотонных информационных  
системах

1.3.6 – оптика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Автор



Москва 2025

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете  
«МИФИ»

Научный консультант:

**Стариков Ростислав Сергеевич**, доктор физико-математических наук, кафедра лазерной физики (№ 37) Института лазерных и плазменных технологий НИЯУ МИФИ, профессор

Официальные оппоненты:

**Шандаров Станислав Михайлович**, доктор физико-математических наук, профессор, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, главный научный сотрудник

**Сюй Александр Вячеславович**, доктор физико-математических наук, доцент, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), главный научный сотрудник

**Цыпкин Антон Николаевич**, доктор физико-математических наук, доцент, Университет ИТМО, директор научно-образовательного центра фотоники и оптоинформатики, доцент

**Минаев Владимир Леонидович**, доктор технических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-физических измерений», начальник отделения

Защита состоится «15» октября 2025 года в 15:00 на заседании диссертационного совета МИФИ.1.01 при Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе, д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и на сайте <http://ds.mephi.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года.

Учёный секретарь

диссертационного совета МИФИ.1.01  
кандидат физико-математических наук

Петрова Е.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

Прогресс последних лет в развитии оптико-цифровых методов и технологий обеспечивает широкие возможности фотонных систем как по скорости передачи, регистрации, обработки и отображения информации, так и по её объему. Такие системы обеспечивают модуляцию излучения, регистрацию данных (однопиксельным или многопиксельным приемником), дискретизацию и квантование сигнала, а также цифровую постобработку зарегистрированных световых распределений, в том числе шумоподавление, повышение динамического диапазона, интерполяцию, сжатие, распознавание и выделение отдельных объектов и др. Подобные фотонные информационные системы имеют ряд преимуществ по сравнению с исключительно цифровыми аналогами: скорость регистрации, бесконтактность, миниатюрность. Применение цифровых и интеллектуальных методов в таких системах обеспечит расширение возможностей как современных, так и перспективных технологий по скорости передачи когерентных и некогерентных световых распределений, их информативности, качеству регистрации и обработки, в том числе для численного и оптического формирования объёмных сцен, цифровых и дифракционных нейросетевых методов сегментации и классификации, систем криптографического кодирования данных, оптической передачи сигналов и др.

Повышение скорости регистрации, необходимость фиксации быстропротекающих процессов, условия низкой освещённости, использование инфракрасного излучения и др. приводят к существенному снижению качества регистрируемой информации. В связи с этим необходимы учёт различных параметров элементов фотонных информационных систем, негативно влияющих на качество фиксируемых световых распределений, и их компенсация. Среди таких параметров можно отметить: темновые и световые временные шумы, темновые и световые пространственные шумы, ограниченность динамического диапазона, спектральные характеристики. При этом подавляющее большинство современных специализированных прикладных задач использует интерполированный вид представления регистрируемой информации, что дополнительно снижает качество относительно съёмки в формате сырых данных.

Ключевым компонентом большинства подобных систем являются твердотельные матричные фотосенсоры, которые в настоящее время обладают высоким разрешением: на уровне десятков и сотен мегапикселей (Мп) при площади пиксела порядка  $1 \text{ мкм}^2$  или даже меньше. Данные фотосенсоры имеют высокие значения квантовой эффективности, что позволяет производить высокоскоростную регистрацию интенсивности световых распределений, либо низкий уровень шумов, что обеспечивает точную регистрацию таких

распределений.

Цифровые и интеллектуальные интерферометрические и голографические методы и техники вычислительной визуализации позволяют осуществить восстановление фазовой составляющей в оптико-цифровых системах.

В совокупности это позволяет получить полную амплитудно-фазовую информацию о регистрируемом световом распределении.

Для восстановления с регистрируемых дифрактограмм и интерферограмм световых распределений с высоким отношением сигнал/шум (ОСШ) важно знание шумовых параметров фотонных систем, в первую очередь регистрирующих цифровых камер. Точное знание шумовых параметров камер необходимо и для определения источника изображения и подтверждения факта его постобработки, идентификации камер по снимкам и других задач, в том числе направленных на защиту авторского права и противодействие незаконной деятельности. Даже при наблюдении невооружённым глазом качество снимков ограничивается временными и пространственными шумами используемых средств регистрации.

Дополнительно, конкретные фотонно-цифровые системы могут предъявлять дополнительные требования. Например, в когерентных системах необходимо компенсировать не только шумы регистраторов, но и оптические шумы, в первую очередь спекл-шумы, а при восстановлении информации с цифровых голограмм требуется подавлять влияние нежелательных порядков дифракции. Современные системы преобразования волновых фронтов требуют точного знания шумовых параметров используемых систем регистрации для обеспечения высокоточной обработки с высокой скоростью. Примером подобных систем являются системы на основе принципа кодирования волнового фронта, применяющиеся для отображения двумерных изображений и трёхмерных сцен, коррекции aberrаций и увеличения глубины резкости, формирования и преобразования пучков, распознавания образов, сокрытия информации и т.д. В задачах, использующих кодирование волнового фронта, требуется численное восстановление зарегистрированных кодированных изображений. В результате качество восстановления в значительной степени зависит от уровня шумов. В системах, основанных на методах цифровой голографии, знание шумовых характеристик позволит заранее, на основе одного только численного моделирования, оценить качество восстановления, достижимое с использованием конкретного фоторегистратора.

Методы, применяющиеся для повышения качества регистрации и обработки световых распределений в высокопроизводительных фотонных информационных системах, активно развиваются и являются предметом большого количества исследований. Современные

цифровые шумоподавляющие фильтры (в том числе наиболее эффективные – BM3D и NLM) обеспечивают снижение шумов, но ограничиваются аппроксимацией по световому шуму. При этом формально темновые шумы учитываются, но только как одно фиксированное значение, и поэтому не могут быть подавлены в полной мере. Помимо этого, большинство характеристик камер, необходимых для эффективного шумоподавления, априори неизвестны так как не измеряются производителями. Для высокотехнологичных научных камер и камер технического зрения, применяющихся при решении ряда современных задач, знание этих характеристик необходимо, они требуют оперативного и точного измерения. Во всех указанных случаях, требующих учёта различных параметров элементной базы фотонных информационных систем, важнейшую роль будут играть аспекты создания и практического использования цифровых аппаратных средств, цифровых алгоритмических и интеллектуальных методов.

Таким образом, в настоящее время актуальны исследование, разработка и апробация принципов и методов, обеспечивающих высокоскоростную, высококачественную и высокоинформативную регистрацию, обработку и визуализацию световых распределений. В связи с этим создание оптико-цифровых, цифровых и интеллектуальных методов для решения различных задач, в том числе рассмотренных выше, является чрезвычайно важным и практически-ориентированным направлением и определяет их высокий потенциал для применения в высокопроизводительных фотонных информационных системах с размерностями сигналов на уровне десятков Мп и пропускной способностью на уровне десятков Гбит/с.

### **Цель работы и основные задачи исследования**

Целью работы является создание принципов построения высокопроизводительных фотонных информационных систем с использованием инструментов цифровой регистрации, алгоритмической и интеллектуальной обработки когерентных и некогерентных пространственно-временных световых распределений, скоростной адаптации и модификации данных.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1) Выявление основных факторов, ограничивающих пропускную способность и точность современных и перспективных фотонных систем регистрации и передачи информации. Оценка принципиальной возможности повышения информативных качеств пространственно-временных световых распределений, обрабатываемых в таких системах.

2) Оценка достижимых и предельных технических возможностей высокопроизводительных фотонных систем регистрации световых распределений с большой пространственно-частотной базой. Определение принципов построения фотонных систем

высокопроизводительной обработки и отображения аналоговых и цифровых данных с учётом специфики используемых оптоэлектронных компонентов.

3) Разработка теоретического описания и математических моделей процессов регистрации и восстановления световых распределений с учётом особенностей аппаратной реализации оптической системы, возможностей современной и перспективной элементной базы, параметров регистрируемых и восстанавливаемых распределений. Апробация моделей, созданных в рамках данного подхода, на регистраторах различного типа и назначения.

4) Создание методов характеристики высокопроизводительных регистраторов световых распределений мегапиксельного разрешения. Разработка высокоточных и высокоскоростных методов измерения временных шумов по контролируемому объёму регистрируемой информации. Разработка методов повышения отношения сигнал/шум регистрируемых световых распределений на основе извлечения портрета световых пространственных шумов.

5) Разработка принципов скоростной цифровой обработки световых распределений высокой информационной ёмкости и их модификации в соответствии с требованиями систем отображения и передачи данных. Исследование возможности применения интеллектуальных методов обработки в оптико-цифровых дифракционных системах для повышения качества регистрации и восстановления световых распределений. Разработка высокоскоростных методов сжатия, бинаризации и квантования компьютерно-синтезированных и цифровых голограмм.

6) Обоснование принципов цифровой коррекции регистрируемого сигнала в высокоскоростных фотонных системах. Оценка возможностей цифровой посткомпенсации нелинейных искажений сигнала в сверхширокополосных сверхвысокочастотных аналоговых оптических трактах. Исследование особенностей формирования изображений в высокоскоростных системах регистрации, основанных на применении методов сжатого зондирования.

7) Развитие и совершенствование методов представления данных и обработки световых распределений в некогерентных оптико-цифровых дифракционных системах пространственной фильтрации с целью обеспечения высокой скорости обработки информации в таких системах.

### **Научная новизна**

1) Разработаны принципы построения фотонных систем передачи, обработки и отображения данных, обеспечивающие пропускную способность до десятков Гбит/с. На основе сформулированных принципов обоснованы и разработаны методы цифровой,

интеллектуальной и аппаратной обработки пространственно-временных световых распределений.

2) Впервые разработана математическая модель цифровой голографии диффузных объектов, учитывающая возможные случайные распределения фазов в плоскости голографической регистрации. Получена многопараметрическая зависимость отношения сигнал/шум восстанавливаемых с цифровых голограмм световых распределений от размера голографируемого объекта, интенсивностей опорной и объектной волн, неоднородностей фоточувствительности и темнового сигнала, темнового временного и фотонного дробового шумов и динамического диапазона регистрирующего фотосенсора.

3) Обоснованы и разработаны оптико-цифровые высокоточные методы характеристики фотосенсоров цифровых камер мегапиксельного разрешения. Разработанные методы обеспечивают высокоскоростное измерение временных шумов фотосенсоров с рекордной точностью.

4) Принцип высокоскоростной интеллектуальной обработки цифровых голограмм, основанный на подавлении дополнительных порядков дифракции и применении свёрточной нейронной сети с разветвленной архитектурой, обеспечил рекордную точность реконструкции световых распределений. Показана возможность реконструкции подобной нейронной сетью наборов сечений трёхмерной сцены напрямую из зарегистрированной цифровой голограммы мегапиксельного разрешения с точностью, на 40% превышающей передовые интеллектуальные методы.

5) Разработаны новые методы адаптации и модификации цифровых данных, получаемых в результате регистрации световых распределений. Предложены методы пространственно-частотного сжатия цифровых голограмм, обеспечивающие коэффициент компрессии более 300. Созданы новые методы квантования компьютерно-синтезированных и цифровых голограмм, обеспечивающие повышение точности восстановления световых распределений до 3 раз (по различным стандартным метрикам) по сравнению с традиционными цифровыми методами и как минимум 10-кратное ускорение относительно передовых итерационных методов. Впервые разработаны многопараметрические методы бинаризации компьютерно-синтезированных и цифровых голограмм, специализированные для высокоскоростных фотонных систем на основе микрозеркальных модуляторов света.

6) Разработан экспериментальный метод определения предельно допустимого уровня пространственных потерь интенсивности в системах однопиксельной регистрации изображений, учитывающий особенности метода сжатого зондирования и параметры аппаратной реализации. Продемонстрировано, что при формировании изображения

бинарного объекта в данной системе пиковое отношение сигнал/шум снижается незначительно при уровне потерь до 50%.

7) Разработан принцип и экспериментально реализована техника оптического кодирования цифровой информации в пространственно-некогерентном свете, допускающая использование ключей кодирования с эквивалентной длиной не менее 128 кбит. Обоснована возможность эффективного применения в оптико-цифровых криптографических системах матричных контейнеров цифровых данных с 20-кратно увеличенной информационной емкостью.

### **Научная и практическая значимость**

заключается в том, что результаты работы являются теоретической и экспериментальной основой для построения высокопроизводительных фотонных систем, решающих задачи регистрации, анализа, передачи, хранения и обработки световых распределений с высокими пространственным и временным разрешениями. Разработанные методы оценки параметров фотосенсоров, использующие доступную элементную базу, обеспечивают быструю и точную характеристику цифровых камер различных типов: от любительских камер и камерофонов до научных регистраторов; и позволяют оценить возможности их применения в исследовательских и прикладных задачах, включая: оптико-цифровые системы визуализации и обработки данных; улучшение качества регистрируемых световых распределений; повышение скорости съемки, в том числе быстропротекающих процессов, в сложных погодных условиях и условиях низкой освещенности. Разработанные методы могут быть использованы для повышения качества как восстановленных с цифровых голограмм 2D- и 3D-световых распределений, так и при их регистрации другими методами (в том числе в птихографии и когерентной дифракционной визуализации), а также при регистрации произвольных пространственных световых распределений, в том числе сфокусированных изображений, дифрактограмм и спеклограмм. Метод характеристики, являющийся зарегистрированным программным продуктом, показал высокий класс по скорости и точности оценки параметров фотосенсоров цифровых фото- и видеокамер. Предложенный метод измерения портретов пространственных шумов может быть использован в различных прикладных задачах, включая охрану авторских прав, идентификацию цифровых камер и анализ достоверности изображений, в том числе в социальных сетях. Методы повышения качества оптической реконструкции обеспечат развитие методов трёхмерной визуализации, улучшение эффективности работы оптических пинцетов и трёхмерной печати на основе аддитивных технологий. Разработанные методы бинаризации и квантования цифровых голограмм позволят как существенно сжимать объемы информации для хранения и передачи по каналам связи, так и преобразовывать их для

вывода на высокоскоростные модуляторы света (например, микрозеркального типа) для разработки голографических дисплеев, оптических корреляторов, оптического кодирования информации. Разработанные методы сжатия данных обеспечат высокоэффективную компрессию голограмм, получаемых в рамках голографической диагностики, видеонаблюдения, регистрации микро- и макрообъектов в медико-биологических задачах и др., что позволит использовать доступные носители для хранения этих данных. Метод является зарегистрированным программным продуктом. Метод оптического кодирования с повышенной информационной ёмкостью обеспечит защищённую передачу изображений по открытым каналам связи, восстановление сцен по сигналам распознавания в корреляторах, увеличение глубины резкости изображений, а также позволит снизить стоимость, массу и габариты кодирующих систем. Результаты оценки возможностей цифровой посткомпенсации нелинейных искажений сигнала в сверхширокополосных сверхвысокочастотных аналоговых оптических трактах и предложенные техники обеспечат продвижение в области высокопроизводительных фотонных информационных систем, в том числе с компенсацией искажений и шумов в режиме реального времени. Результаты исследований были применены при создании радиотехнической системы на основе фотонных аналого-цифровых преобразователей, которая успешно прошла полевые испытания. Проведённая оценка предельно допустимого уровня пространственных потерь интенсивности в системе однопиксельной регистрации с использованием сжатого зондирования позволит эффективно использовать данный метод в задаче получения информации в случае динамически изменяющихся сред (в том числе со значительной потерей света из-за различных воздействий), регистрируемых как в видимом, так и инфракрасном диапазоне.

Результаты работ использовались в ряде научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ: РНФ № 22-79-10340 (руководитель), РНФ № 20-79-00291 (руководитель), РНФ № 18-79-00277 (руководитель), РНФ № 24-19-00899 (основной исполнитель), РНФ № 23-12-00336 (исполнитель), РНФ № 22-29-00603 (исполнитель), РНФ № 14-19-01751 (основной исполнитель), РФФИ № 16-07-00389 (руководитель), РФФИ № 17-07-00829 (исполнитель), РФФИ № 14-29-08174 (исполнитель), РФФИ № 13-07-00395 (исполнитель), государственное задание № 2.5674.2011 (исполнитель), государственное задание № FSWU-2023-0070 (исполнитель), государственное задание № 3.2066.2014/К (исполнитель), «Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере» №368гу1/2013 (руководитель), ФЦП № 14.В37.21.0248 (исполнитель), ФЦП № П874 от 26.05.2010 г. (исполнитель), а также хоздоговорных тем.

## Основные положения, выносимые на защиту

1) Разработанные принципы построения оптико-цифровых дифракционных систем формирования, регистрации и обработки пространственно-временных световых распределений высокой информационной емкости обеспечивают достижение пропускной способности до  $10^{11}$  бит/с при организации до  $10^7$  дискретных информационных каналов с частотой обновления до  $10^4$  Гц в каждом.

2) Построенные многопараметрические математические модели цифровой голографии диффузных объектов одновременно учитывают влияние неоднородностей фоточувствительности и темнового сигнала, темнового временного и фотонного дробового шумов, динамического диапазона фотосенсора цифровой камеры, размер голографируемых объектов, интенсивности опорной и объектной волн. Для широкого диапазона камер различного назначения созданные модели демонстрируют высокую (отклонение не более 5%) точность определения отношения сигнал/шум восстановленного светового распределения без необходимости предварительно макетировать полную оптическую систему.

3) Созданные оптико-цифровые методы характеризации фотосенсоров цифровых камер мегапиксельного разрешения, основанные на автоматической сегментации регистрируемых изображений, обеспечивают оценку временных шумов с рекордно низкой ошибкой (менее 0,2%). Дополнительная модификация таких методов гарантирует высокоскоростную и высокоточную (ошибка менее 2%) характеризацию фотосенсоров по результатам регистрации 2 изображений одной сцены, имеющих широкий динамический диапазон интенсивности. Разработанные методы, основанные на извлечении портрета световых пространственных шумов с улучшенной техникой подавления темновых шумов, с высокой точностью идентифицируют камеры по критерию свой/чужой (соотношение коэффициентов корреляции не менее 60).

4) Разработанные принципы скоростной интеллектуальной обработки цифровых голограмм, основанные на алгоритмическом подавлении дополнительных порядков дифракции и нейросетевом восстановлении вспомогательных световых распределений, позволяют достичь рекордной точности реконструкции. Интеграция разработанной сверхточной нейронной сети с разветвленной архитектурой в систему реконструкции световых распределений демонстрирует 40% (по стандартным метрикам) повышение точности восстановления по сравнению с существующими передовыми интеллектуальными методами при отсутствии характерной для традиционных алгоритмических подходов потребности во вспомогательной информации.

5) Предложенные методы адаптации и модификации цифровых данных, получаемых в результате регистрации световых распределений, существенно повышают возможности

фотонных систем отображения и передачи информации. Разработанные алгоритмы сжатия цифровых голограмм позволяют достичь коэффициента компрессии более 300 без существенных потерь в качестве восстановления. Методы квантования и бинаризации компьютерно-синтезированных и цифровых голограмм делают возможной высокоскоростную (более  $10^{10}$  бит/с) передачу голографических данных.

6) Разработанные принципы цифровой коррекции регистрируемого сигнала обеспечивают высокоскоростную передачу и регистрацию информации в фотонных системах. Показаны возможности методов цифровой линеаризации для посткомпенсации искажений сигнала сверхширокополосных сверхвысокочастотных аналоговых оптических трактов. Определен предельно допустимый уровень пространственных потерь интенсивности (до 50%) в системах однопиксельной регистрации изображений методом сжатого зондирования, при котором качество зарегистрированных изображений снижается менее чем на 2 дБ по величине пикового отношения сигнал/шум.

7) Применение разработанных методов пространственной фильтрации световых распределений обеспечивает для оптико-цифровых криптографических систем с пространственно-некогерентным освещением пропускную способность более  $10^{10}$  бит/с при эквивалентной длине ключа кодирования не менее 128 кбит. Предложенный метод кодирования матричных контейнеров цифровых данных рекордной информационной емкости (в 20 раз превышающей достигнутую ранее) снижает относительную ошибку декодирования более чем в 2 раза по сравнению с системами с когерентным освещением.

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на международных конференциях IS&T/SPIE Electronic Imaging (Берлингейм, США, 2012, 2014, 2015), SPIE Photonics Europe (Брюссель, Бельгия, 2012, 2014, 2016; Страсбург, 2018), «Оптика лазеров» (Санкт-Петербург, 2018), «ХОЛОЭКСПО» (Москва, 2010; Минск, 2011; Суздаль, 2012; Москва, 2013; Ярославль, 2016; Звенигород, 2017; Нижний Новгород, 2018; Москва, 2020; Геленджик, 2021); по Фотонике и Информационной оптике (г. Москва, 2012-2025 гг.); Школы-симпозиума по голографии и когерентной оптике (Нижний Новгород, 2013; Калининград, 2017; Екатеринбург, 2019; Санкт-Петербург, 2022); SPIE Photonics West (Сан-Франциско, 2014, 2015, 2017, 2018, 2020, 2021); Speckle metrology (Янов-Подласки, Польша, 2018), Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics (Москва-Самара, 2011; Хабаровск, 2016); SPIE Security & Defence (Амстердам, 2014; Тулуза, 2015; Варшава, 2017), SPIE Optics & Photonics (Сан-Диего, 2014), SPIE Optics+Optoelectronics (Прага, 2015), SPIE Photonics Asia (Пекин, 2016), Digital Holography & 3-D Imaging (Чеджу, Республика Корея, 2017; Бордо, 2019), «Оптика» (Санкт-Петербург, 2011, 2013, 2015, 2017);

«Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт–Петербург, 2012, 2014, 2016, 2018, 2019); Научных сессиях НИЯУ МИФИ (г. Москва, 2010, 2011); Всероссийских научных конференциях по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, 2010); «Молодежь и наука» (Москва, 2010-2013); по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники (Москва, 2011, 2012, 2014, 2019, 2022, 2024); молодёжных Самарских конкурсах-конференциях научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, 2011-2013); 2-й Школе-семинаре «Фотоника нано– и микроструктур» (Владивосток, 2013). Результаты работы были многократно отмечены научным сообществом, в том числе получена первая премия имени Ю.И. Островского за лучшую научную работу в области оптической голографии и интерферометрии (2022 г.), присуждена медаль ВВЦ «За успехи в научно-техническом творчестве» (2013 г.), неоднократно занято первое место за доклады на всероссийских и международных конференциях.

### **Публикации по теме работы**

По теме работы опубликовано 200 печатных работ, среди них 28 статей в рецензируемых журналах из списка ВАК; 98 – в изданиях из баз данных Scopus и Web of Science, в том числе в 19 периодических рецензируемых изданиях уровня Q1, 14 уровня Q2, 8 уровня Q3, 7 уровня Q4; 117 – в трудах международных конференций, 23 – в трудах всероссийских конференций, 1 раздел в монографии и 4 результата интеллектуальной деятельности.

### **Структура и объём работы**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 296 страниц, включая 146 рисунков, 8 таблиц и список литературы из 333 наименований.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность работы, формулируется цель и основные задачи. Излагается научная новизна, основные положения, выносимые на защиту. Отмечена теоретическая и практическая ценность и некоторые другие основные результаты.

**Первая глава** посвящена анализу, систематизации и перспективам методов цифровой регистрации пространственных световых распределений. Огромный пласт современных и перспективных технологий требует скоростной, высокоинформативной и качественной регистрации световых распределений, а также её передачи и обработки: численное и оптическое формирование объемных сцен, системы кодирования, нейросетевые методы анализа и др. Для этого необходимо использование оптико-цифровых систем, обеспечивающих модуляцию излучения, регистрацию однопиксельным или многопиксельным приёмником, дискретизацию, квантование полученных сигналов, а также

их цифровую постобработку, в том числе шумоподавление, повышение динамического диапазона, интерполяцию, сжатие, распознавание и выделение отдельных объектов и др. Такие системы имеют ряд преимуществ: скорость регистрации, бесконтактность, миниатюрность, автоматическая работа.

Развитие технологий применения средств регистрации в дифракционных оптико-цифровых системах на данный момент следует в направлении повышения оперативности и точности их использования, со специализацией под конкретные задачи. Скорости передачи информации в таких системах достигли величин 10 Гбит/с. При этом только совместный выбор параметров:

- формирования световых сигналов,
- их регистрации,
- обработки,
- шумоподавления и повышения качества,
- отображения полученных световых распределений

до проведения экспериментов позволяет получать высокую информативность и высокое качество восстановления при высоких скоростях обработки и передачи данных.

Высокая информативная ёмкость регистрации световых распределений в цифровом виде обеспечила широкие возможности для развития методов 3D-реконструкции, восстановления характеристик объектов по объему среды и отслеживания их динамики. К ним относятся: цифровая голография, микроскопия, восстановление фазы, птихография и когерентная дифракционная визуализация, безлинзовая визуализация, вычислительная визуализация, сжатое зондирование и др. Развиваются и новые форматы фоторегистрации, в том числе и на основе новых методов, использующих принципы непрямой регистрации световых распределений – вычислительной фотографии: камеры светового поля (пленоптические камеры), однопиксельные камеры и камеры с кодирующей апертурой. Они позволяют получать изображения со сравнимым или даже повышенным качеством относительно стандартной регистрации, в различных специфических условиях: малые размеры среды, невидимый спектр излучения, отставание автофокусировки, сложность создания фокусировки и др.

Отмечается, что современные оптико-цифровые регистраторы излучения обладают большим динамическим диапазоном и большим числом градаций яркости (разрядностью аналого-цифрового преобразователя). Однако информация о важнейшем ограничителе качества – шуме – часто отсутствует даже для продвинутых камер или представляется производителями не полностью, хотя необходима для информированного подбора регистратора под определенную задачу. Кроме того, эта информация чрезвычайно полезна

для применения алгоритмов улучшения качества, которые обеспечивают сохранение в изображении максимального количества полезной информации.

Шумы фотосенсоров принято делить на случайные по времени (временной шум) и псевдослучайные по пикселям (пространственный шум). Выражение для оценки полного шума для уровня сигнала  $S$  можно представить в виде:

$$\sigma_{\Sigma}(S) = \sqrt{(\sigma_{dt})^2 + (\sigma_{lt})^2 + (\sigma_{ds})^2 + (\sigma_{ls})^2} = \sqrt{(\sigma_{dt})^2 + \frac{S}{C} + (DSNU)^2 + (PRNU \cdot S)^2}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{dt}$  – темновой временной шум,  $\sigma_{lt}$  – световой временной шум,  $C$  – константа пересчёта в цифровые единицы (ц. е.) сигнала,  $\sigma_{ds}$  – темновой пространственный шум,  $DSNU$  – неоднородность темнового сигнала,  $\sigma_{ls}$  – световой пространственный шум,  $PRNU$  – неоднородность фоточувствительности пикселей.

Проведен анализ основных групп методов измерения временных и пространственных шумов, радиометрических функций и спектральных характеристик фотосенсоров цифровых камер. Показано, что стандартные методы измерения шумов времязатратны и вычислительно ресурсоемки, а методы оценки шума с использованием одного снимка не подходят для точного измерения шумов камеры. Отмечается, что методы прецизионного детектирования световых распределений ориентированы в первую очередь на любительские снимки и не используют все особенности темновых и световых временных и пространственных шумовых параметров.

Систематизированы методы и техники повышения качества регистрации пространственно-временных световых распределений. Они используют совместное применение усреднения кадров и/или различных шумоподавляющих фильтров как аппаратно, так и программно. Так, наиболее качественные современные цифровые фильтры шумоподавления BM3D и NLM позволяют производить расчеты за единицы или десятки минут. При этом обычно подавляются шумы, подчиняющиеся определенной статистике: зависящие от сигнала, распределенные по закону Пуассона или Гаусса. Главными же ограничивающими факторами в когерентных системах являются спекл-шумы, неинформативные порядки дифракции и шумы регистраторов. Только совместный учёт данных параметров мог бы существенно повысить качество восстановления информации.

Для повышения качества цифровых голограмм используются: методы частотной фильтрации; фильтры, расположенные в плоскости голограммы или восстановленного светового распределения; применение машинного обучения; оптические методы, в том числе с применением цифровых техник постобработки. Использование данных методов позволяет снижать дробовой шум (световой временной шум), темновой временной шум и спекл-шум, но пространственные шумы оказываются практически незатронутыми. При этом цифровые

методы, обладая преимуществом по скорости применения для одной голограммы, часто приводят к снижению разрешения восстановленных световых распределений.

Отмечается, что доля интеллектуальных алгоритмов в ближайшие годы будет возрастать за счет получения большего числа данных, увеличения количества накопленной информации с существующих аппаратов, а также нестандартных статических или динамических решений при конструировании оптической части регистратора, которая позволит повысить качество световых распределений.

В результате проведенного анализа показано, что развитие методов компенсации шумов определяет их высокий потенциал для применения в высокопроизводительных фотонных информационных системах с размерностями сигналов на уровне десятков Мп и пропускной способностью на уровне десятков Гбит/с.

**Глава 2** посвящена разработанным методам характеристики высокоразрешающих средств регистрации пространственных световых распределений, включающим методы оценки шумовых и спектральных параметров регистраторов.

Для экспериментального измерения световых и темновых шумов, как пространственных, так и временных, а также радиометрических характеристик фото- и видеокамер была создана установка, схема которой представлена на рис. 1. Установка применялась как для реализации уже существующих методов характеристики, так и для апробации разработанных.

Источником излучения являлся лазер, работающий в видимом диапазоне длин волн. Вращающийся рассеиватель разрушал пространственную когерентность (спекл-структуру), чтобы не образовывалась интерференционная картина на фотосенсоре. Дополнительный статический рассеиватель позволял добиться однородности освещения без существенных потерь энергии. Тестовое изображение использовалось для измерения временного шума камер. Во всех измерениях, за исключением измерения временного шума, фото- и видеокамеры использовались без объектива.

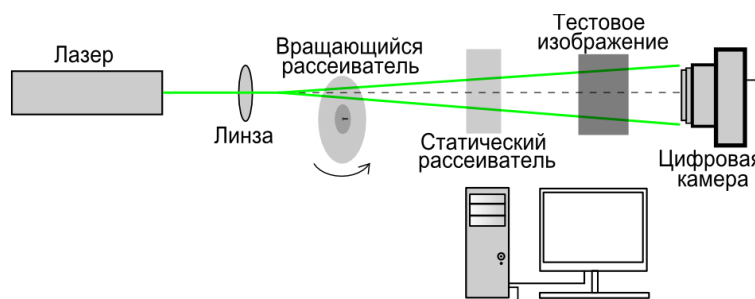


Рисунок 1 – Экспериментальная установка для измерения пространственных и временных шумовых и радиометрических характеристик фото- и видеокамер

Разработан метод измерения временного шума фотосенсоров цифровых камер, который позволяет находить как темновые, так и световые временные шумы для всех уровней сигнала фотосенсора по результатам съёмки нескольких кадров (2 и больше) всего одной сцены, что в десятки раз меньше, чем требуется по стандарту измерения шумов. При этом необходимо, чтобы регистрируемое изображение данной сцены на фотосенсоре имело диапазон освещённости, превышающий динамический диапазон сенсора.

За оценку временного шума для выбранного сигнала  $S$  берётся среднее значение среднеквадратических отклонений сигналов по пикселям, имеющим значения от  $S - 0,5$  до  $S + 0,5$ :

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{1}{M(N-1)} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N (z_n(x_m) - \bar{z}(x_m))^2}, \quad (2)$$

где  $N$  – число кадров,  $M$  – число пикселей с сигналами  $[S - 0,5; S + 0,5)$ ,  $n$  – счетчик кадров,  $m$  – счетчик пикселей с сигналами  $[S - 0,5; S + 0,5)$ ,  $x_m$  – положение пикселей с сигналами  $[S - 0,5; S + 0,5)$ ,  $z_n$  –  $n$ -ый снимок,  $\bar{z}$  – усредненный снимок. Данная процедура выполняется для всех уровней сигнала от 0 ц. е. до сигнала, соответствующего насыщению камеры. Ошибка измерения временного шума для разработанного метода определяется однородностью гистограммы снимков и количеством снимков:

$$RE(\sigma(S = Y)) = \frac{1}{\sqrt{2(N-1) \cdot M(S=Y)}}. \quad (3)$$

Для типичной камеры разрешением 6 Мп и разрядностью 10 бит относительная погрешность измерения в случае 2 кадров составит 0,9%. При обработке 64 кадров погрешность будет составлять 0,16%.

С использованием метода были измерены характеристики камер четырёх типов: бытовой цифровой Canon EOS 400D, научной измерительной MegaPlus II ES11000, технического зрения PixeLink PL-B781F и камеры видеонаблюдения с аналоговым выходом Watec LCL-902C. На рис. 2 показаны примеры полученных зависимостей временного шума от сигнала. Также показаны расчётные корневые зависимости, полученные исходя из предположения о том, что фотоны падают на поверхность фотоприёмника по распределению Пуассона – данные оценки справедливы при применении до областей насыщения. Экспериментально полученные и расчётные корневые хорошо согласуются с измерениями.

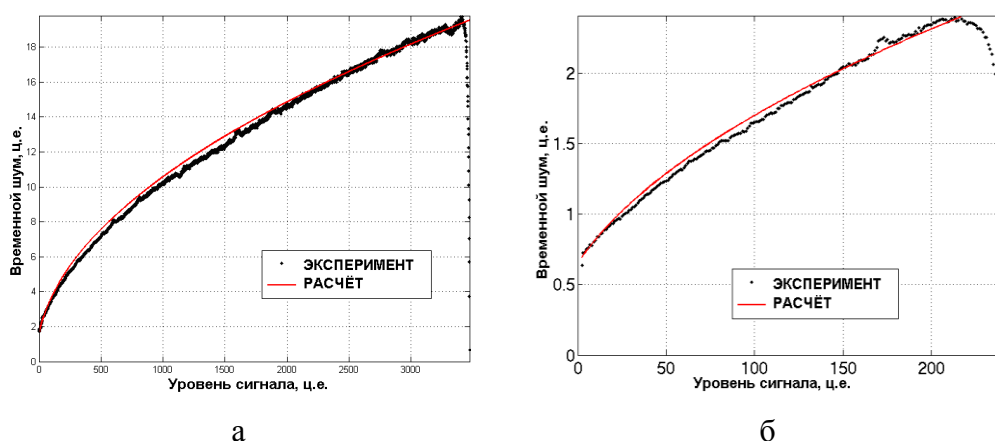


Рисунок 2 – Экспериментально полученные значения временного шума разработанным методом для камер Canon EOS 400D (а) и Watec LCL-902C (б) и аппроксимированные корневые зависимости временных шумов от сигнала

При использовании 2 снимков даже с неоднородной гистограммой относительная ошибка измерения светового временного шума составила 1,6% для камеры MegaPlus II ES11000 и 1,0% для камеры PixeLink PL-B781F, что соответствует или даже меньше, чем в случае длительных измерений с использованием стандарта EMVA 1288. Полученные значения темнового временного шума как аппроксимированного значения временного шума для сигнала, равного уровню черного камеры, из зависимостей, так и из темновых снимков совпадают друг с другом в пределах погрешности измерений.

Разработан метод измерения пространственных шумов и показаны результаты его применения для камер четырёх типов. Метод отличается пониженными требованиями к пространственной однородности используемого освещения за счет сегментации обрабатываемых изображений. Получены величины неоднородности фоточувствительности исследуемых камер:  $0,0042 \pm 0,0002$  (Canon),  $0,0053 \pm 0,0008$  (MegaPlus),  $0,0067 \pm 0,0003$  (PixeLink) и не более  $0,0053 \pm 0,0002$  (Watec). Использовалось освещение с пространственной неоднородностью  $0,015 \div 0,03$ , что примерно в три-шесть раз выше, чем неоднородности фоточувствительностей.

Разработан метод измерения спектральных характеристик бытовых камер отдельно по цветовым каналам массива Байера. Он использует регистрацию снимков при последовательной смене длины волны источника излучения, деление полученных снимков в соответствии с цветовыми массивами Байера, учёт калибровочной кривой спектрометра и константы пересчёта в цифровые единицы. На основе разработанного метода получены спектральные параметры каналов по цвету сенсоров цифровых камер. Используя разработанный метод, предложена техника повышения качества цифровых голограмм: необходимо выбрать три длины волн излучения, спектральные отклики для которых будут

наименьшими в других цветовых каналах. Это обеспечивает снижение уровня шума. Таким образом за одну экспозицию регистрируются сразу три цифровые голограммы и восстанавливается цветное световое распределение.

Разработан метод измерения портрета световых пространственных шумов фото- и видеокамер. Метод отличается упрощённым способом создания освещения (с помощью стандартного компьютерного монитора) и улучшенным методом удаления темновых шумов. Портрет световых пространственных шумов  $K^m[x,y]$  для каждого канала находится следующим образом:

$$K^m[x,y] = \frac{\sum_{n=1}^N P_n^m[x,y]/N - \sum_{n=1}^N D_n^m[x,y]/N}{Filt\{\sum_{n=1}^N P_n^m[x,y]/N\}}, \quad (4)$$

где  $Filt\{\}$  – цифровой фильтр,  $m$  – номер цветового канала,  $[x,y]$  – координаты пиксела,  $N$  – число кадров,  $P_n$  –  $n$ -ый световой снимок однородной сцены,  $D_n$  –  $n$ -ый темновой снимок. С использованием предложенного метода получен портрет световых пространственных шумов экземпляра камеры Canon EOS 400D. Он представлен на рис. 3. Относительная ошибка определения элементов портрета составила 15÷20%.



Рисунок 3 – Фрагмент портрета световых пространственных шумов синего цветового канала экземпляра камеры Canon EOS 400D. Светлые точки соответствуют пикселям, имеющим большую фоточувствительность, тёмные – меньшую

Для оценки состоятельности полученного портрета проведён эксперимент по идентификации источника снимков, сделанных в формате сырых данных. Сюжеты носили случайный характер. Результаты идентификации были успешными для всех снимков. При использовании одного цветового канала минимальное отношение коэффициентов корреляции свой снимок / чужой снимок составило 60.

По измеренным шумовым и радиометрическим характеристикам построены графики зависимостей временных, пространственных и полных шумов, а также соответствующих ОСШ от величины сигнала (см. рис. 4). Для удобства сравнения характеристик камер, значения сигналов и шумов приведены в одинаковом масштабе (нормированы на

максимальный линейный сигнал для каждой камеры). Как видно, пространственный шум начинает превалировать над временным только для камеры MegaPlus и при значениях сигнала, превышающих 3200 ц. е. Для камеры Watec пространственный шум не достигает даже половины уровня временного, что связано с меньшей в сравнении с другими камерами разрядностью аналого-цифрового преобразователя. При этом бытовые зеркальные фотокамеры (как Canon) во многих применениях могут лишь незначительно (по всем параметрам, кроме быстродействия) уступать камерам технического зрения и специализированным для научных измерений.

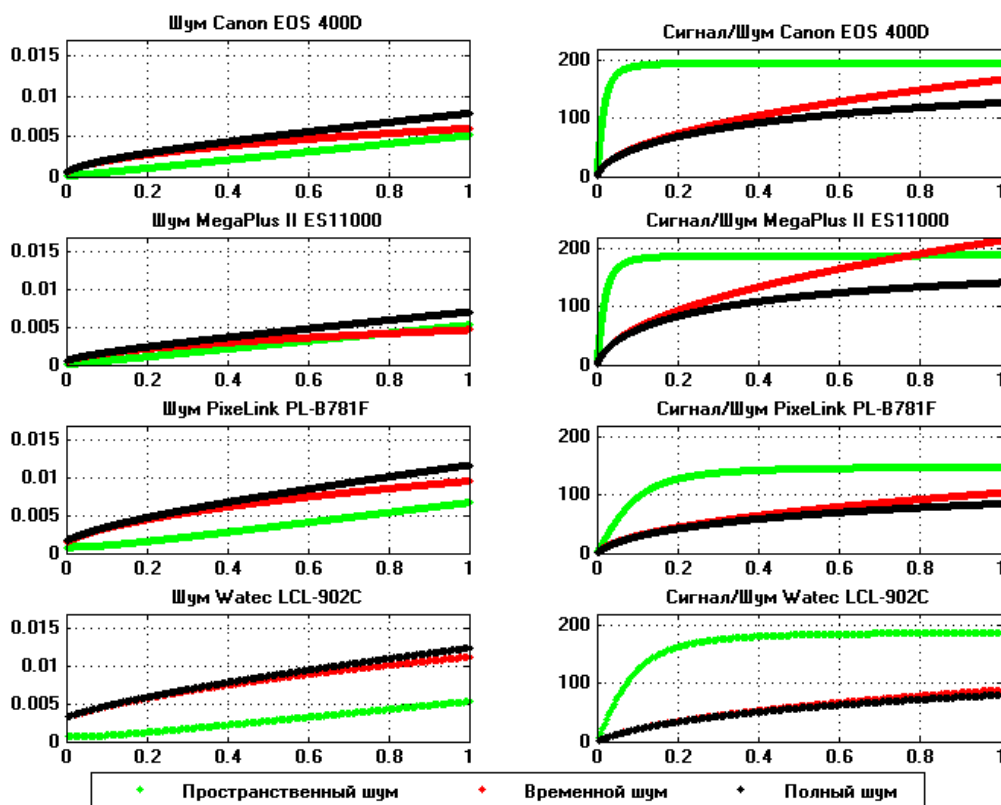


Рисунок 4 – Графики нормированных зависимостей временных, пространственных и полных шумов и отношений сигнал/шум от значений нормированных сигналов

Полученные результаты позволили перейти к разработке и апробации методов улучшения качества регистрируемых световых распределений.

В главе 3 представлены разработанная модель процесса прецизионного детектирования световых распределений и результаты её применения для расчёта оценок качества регистрируемых и восстанавливаемых световых распределений, в том числе после применения различных методов улучшения. Предложен метод моделирования снимка, сделанного цифровой камерой:

$$I[x, y] = ro \left\{ \left( ro\{Gauss[x, y](0, (DSNU \cdot C)^2)\} + ro\{Gauss[x, y](0, (C \cdot \sigma_{dt})^2)\} + \right. \right. \\ \left. \left. Poisson \left( ro \left\{ \frac{ro\{CS_{MaxLin}\}}{max\{I[x, y]\}} I_0[x, y] \right\} + \right. \right. \right. \\ \left. \left. \left. ro \left\{ \frac{ro\{CS_{MaxLin}\}}{max\{I[x, y]\}} I_0[x, y] \right\} Gauss[x, y](0, PRNU^2) \right\} \right) \right) / C \right\}, \quad (5)$$

где  $I_0[x, y]$  – распределение интенсивности без шумов,  $ro\{\}$  – округление до ближайшего целого,  $max\{\}$  – максимум по всем пикселям,  $S_{MaxLin}$  – максимальный линейный сигнал с вычтенным уровнем чёрного,  $Gauss[x, y](a, b)$  обозначает массив с реализацией случайной выборки значений, подчиняющихся распределению Гаусса со средним  $a$  и дисперсией  $b$ ,  $Poisson[x, y](d[x, y])$  – массив с реализацией случайной выборки значений, подчиняющихся распределению Пуассону со средними  $d[x, y]$ . Метод позволяет моделировать регистрацию любого светового распределения, в том числе сфокусированных изображений или интерференционных картин. Результаты успешно согласуются с расчетами на основе среднего ОСШ, полученного из выражения (1).

Отмечается, что метод многократной экспозиции позволяет уменьшить уровень временных шумов. Для дальнейшего увеличения ОСШ предложено использовать компенсацию пространственных шумов с использованием разработанного метода нахождения портретов световых и темновых пространственных шумов фотосенсора. Среднее ОСШ с учётом относительных ошибки определения портретов можно оценить как:

$$SNR_E = \frac{\sum_{n=1}^N P_n[x, y]/N}{\sqrt{\frac{\sigma_{dt}^2}{N} + \frac{\sum_{n=1}^N P_n[x, y]/N}{C \cdot N} + (E_{ds} \cdot \sigma_{ds})^2 + (E_{ls} \cdot PRNU \cdot \sum_{n=1}^N P_n[x, y]/N)^2 + \frac{1}{12}}}, \quad (6)$$

где  $E_{ls}$  и  $E_{ds}$  – относительные ошибки определения портретов световых и темновых пространственных шумов фотосенсора камеры соответственно. В случае относительных ошибок, составляющих 20%, как это имело место при измерениях портретов пространственных шумов, описанном в разделе 2, максимальное ОСШ при компенсации пространственных шумов будет в 5 раз выше, чем при подавлении только временных шумов.

Результаты численного моделирования на примере камеры Canon EOS 400D показывают, что использование только покадрового усреднения без компенсации пространственных шумов позволяет увеличить ОСШ примерно в 2 раза. Компенсация приближёнными портретами увеличивает ОСШ до 10 раз без снижения детализации. При этом для достижения ОСШ, близкого к максимальному, достаточно усреднения нескольких сотен снимков.

Для экспериментальной проверки увеличения ОСШ за счёт компенсации пространственных шумов с помощью их портретов была проведена съёмка 400 темновых снимков камерой MegaPlus. На рис. 5 приведены полученные расчётно и экспериментально зависимости шума от числа усредняемых снимков как без удаления, так и с удалением

портретов темновых пространственных шумов. Видно, что результаты согласуются между собой. Величина среднего нормированного среднеквадратического отклонения (НСКО) экспериментальных точек от расчётных без удаления портрета темновых пространственных шумов составила 0,029, а с удалением – 0,034.

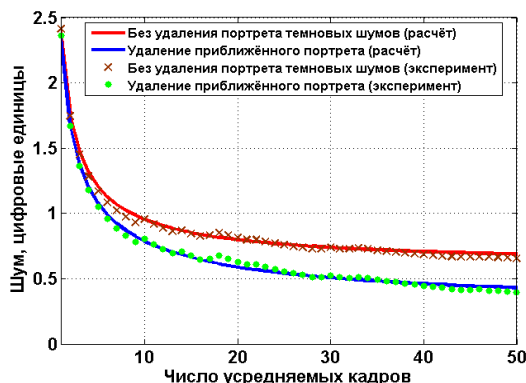


Рисунок 5 – Расчётная и экспериментальная зависимости величины шума от числа усреднённых темновых снимков как без удаления, так и с удалением портретов темновых пространственных шумов

Наиболее популярным методом повышения ОСШ является многократная экспозиция – вычисление среднего по кадрам изображения. Этот метод позволяет уменьшить уровень временных шумов пропорционально квадратному корню из числа кадров и, следовательно, увеличить ОСШ по сравнению с одиночным снимком. При этом значение ОСШ остаётся ограничено величиной пространственных шумов. Основной недостаток данного подхода – времязатратность.

Отмечается, что для повышения ОСШ применяется не только временное, но и пространственное усреднение. В этом случае регистрируется всего один снимок. Недостатком этого метода является снижение общего числа пикселей снимка, что для многих практических применений не является серьёзным ограничением. Выделены особенности метода, позволяющие достичь максимального повышения ОСШ. Получены экспериментальные обоснования увеличения ОСШ с помощью пространственного усреднения по соседним пикселям. Так, увеличение ОСШ составило  $1,91 \pm 0,17$  (для усреднения  $2 \times 2$  отсчета, расчётное максимальное значение 2),  $2,8 \pm 0,3$  ( $3 \times 3$ , расчётное максимальное значение 3) и  $3,9 \pm 0,4$  ( $4 \times 4$ , расчётное максимальное значение 4). В пределах погрешности значения совпадают с расчётными максимальными.

Для дальнейшей апробации разработанной модели были зарегистрированы цифровые голограммы «плоских» объектов и объёмных сцен. Схема экспериментальной установки показана на рис. 6. Источником излучения является твердотельный лазер с диодной накачкой

532 нм. Лазерный луч расширяется, коллимируется, зеркалом 1 перенаправляется на светоделительную призму и делится на объектную и опорную волны. Ослабляющий фильтр используется для выравнивания интенсивностей опорной и объектной волн. Число отсчётов в голограммах составляло от единиц до десятков млн, элемент разрешения голограммы –  $3,5 \div 11,4$  мкм в зависимости от используемой камеры. Расстояние от объекта до голограммы –  $200 \div 1400$  мм.

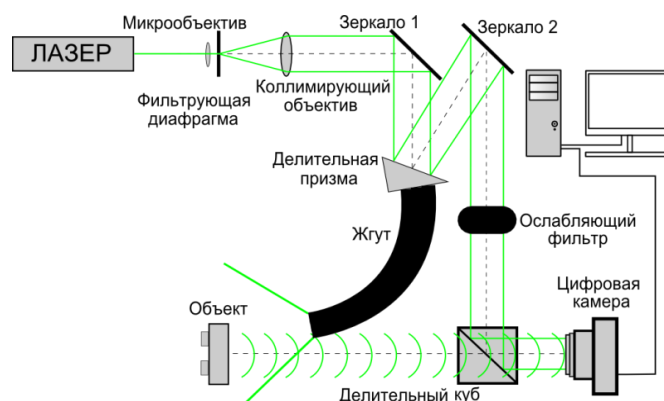
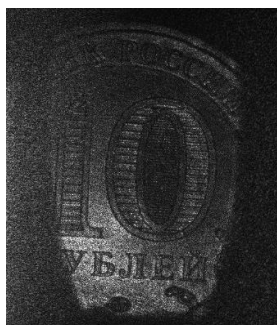


Рисунок 6 – Схема экспериментальной установки по записи цифровых голограмм Френеля в режиме освещения объекта «на отражение»

Пример численно восстановленных световых распределений с голограммы в режимах освещения «на отражение» без жгута волной с плоским волновым фронтом и рассеянным излучением с использованием волоконно-оптического жгута показаны на рис. 7. Получено согласование измеренных в процессе записи голограмм и рассчитанных величин из восстанавливаемых световых распределений. Так поперечный размер объекта для рис. 7б по измерениям составил  $10,90 \pm 0,05$  мм, а рассчитанный с помощью восстановленного распределения –  $11,0 \pm 0,3$  мм.



а



б

Рисунок 7 – Численно восстановленные световые распределения с голограмм, записанных при освещении плоской волной (а) и рассеянным светом (б)

Проведено сравнение методов численного восстановления световых распределений с рассчитанных и экспериментально записанных цифровых голограмм Френеля. При численном моделировании использовались диффузные объекты, отличающиеся по линейным размерам до 4 раз, расстояние между объектом и голограммой варьировалось в 100 раз при расположении в дальней зоне дифракции Френеля, число отсчётов голограммы –  $512 \times 512 \div 2048 \times 2048$ . Получено, что наилучшим по критериям качества восстановления и скорости расчетов для используемых параметров среди существующих методов является метод прямого расчёта дифракции Френеля.

Разработан метод улучшения качества восстановленных с голограмм световых распределений путём подавления нежелательных порядков дифракции нелинейной фильтрацией. Он использует логарифмирование голограммы, фурье-преобразование, подбор маски в фурье-спектре и обратные операции. Проведено сравнение метода с: фильтрацией в пространственной плоскости вычитанием из голограммы её среднего значения, средних значений по группам элементов голограммы, значений, полученных медианной фильтрацией голограммы; фильтрацией в частотной плоскости выбором области обнуления частот, обнулением частот по порогу, вычислением лапласиана, использованием оконного фильтра; нелинейной фильтрацией по квадрантам в частотной плоскости. Метод разработанной нелинейной фильтрации демонстрирует наилучшие результаты по критерию НСКО, особенно в случае сильного перекрытия порядков дифракции на восстановленном поле.

Ранее в литературе исследовалось отдельно влияние спекл-шума, нежелательных порядков дифракции, дискретизации сигнала, шума квантования на реконструкцию световых распределений в цифровой голографии. Влияние дробового шума и радиометрических параметров камеры шума камеры было проанализировано лишь для некоторых конкретных случаев: низкая интенсивность, разные размеры объектов и изменения отдельного типа шума. Поэтому необходимо было разработать общее выражение для оценки влияния различных параметров на качество восстанавливаемых световых распределений.

С использованием статистического распределения комплексных амплитуд объектной волны в плоскости голограммы как суммы случайных фазоров, получены аналитические зависимости величины ОСШ восстановленных с цифровых голограмм световых распределений диффузных объектов от их размеров и характеристик фотосенсора:

$$SNR_H = \frac{I_o \cdot I_R}{\left( \frac{1}{12C^2} + \frac{1}{12} + \sigma_{dt}^2 + \sigma_{ds}^2 + \frac{I_o + I_R}{C} + PRNU^2 \cdot (I_R^2 + 4I_R \cdot I_o + 2I_o^2) \right)} \left( \frac{L \times M}{L_S \times M_S} \right) \times \frac{1}{\sqrt{1 + 2 \frac{I_o \cdot I_R}{\left( \frac{1}{12C^2} + \frac{1}{12} + \sigma_{dt}^2 + \sigma_{ds}^2 + \frac{I_o + I_R}{C} + PRNU^2 \cdot (I_R^2 + 4I_R \cdot I_o + 2I_o^2) \right)} \left( \frac{L \times M}{L_S \times M_S} \right)}} \quad (7)$$

где  $I_O$  и  $I_R$  – средние интенсивности объектной и опорной волн,  $L_S \times M_S$  – число отсчетов объекта на восстановленном поле,  $L \times M$  – полное число отсчетов восстановленного поля. Это выражение является наиболее общим для оценок ОСШ и зависит от шумов камер, средних интенсивностей объектной и опорной волн, а также площади объекта, нормированной на площадь восстановленного поля.

Получены и упрощенные выражения для ОСШ. Если средние интенсивности волн почти одинаковы, и с учётом того, что обычно шумы квантования значительно меньше пространственных и временных, а также того, что при среднем уровне сигнала, составляющем порядка десятых долей от максимального линейного уровня сигнала, темновыми шумами обычно можно пренебречь, то выражение (7) может быть представлено в следующем виде:

$$SNR_{HL} = \sqrt{\frac{I_O}{2\left(\frac{2}{c} + 7I_O \cdot PRNU^2\right)}} \times \sqrt{\frac{L \times M}{L_S \times M_S}} = \frac{1}{\sqrt{2\left(\frac{2}{cI_O} + 7PRNU^2\right)}} \times \sqrt{\frac{L \times M}{L_S \times M_S}}. \quad (8)$$

Постоянное значение  $7PRNU^2$  не зависит от значения сигнала голограммы. Оно определяется пространственным световым шумом фотосенсора. Другая часть выражения зависит от интенсивности и определяется фотонным дробовым шумом.

Получено, что ОСШ восстановленных с голограмм световых распределений зависит от используемой части динамического диапазона как квадратный корень. Этот закон может нарушаться для плохо освещенных интерференционных картин, для голограмм, зарегистрированных камерами с высоким уровнем шума, и для случая существенно различающихся интенсивностей объектной и опорной волн. В случае трехмерных сцен ОСШ можно посчитать для каждого сечения объекта отдельно.

Примеры восстановленных фазовых распределений объектов показаны на рис. 8. Представлены результаты для 5%, 10% и 100% динамического диапазона камеры Watec LCL-902С. ОСШ увеличилось с 2,9 дБ (рис. 8а) и 6,0 дБ (рис. 8б) до 15,6 дБ (рис. 8в). Полученные значения ОСШ близки к значениям для амплитудных объектов, если их сравнивать в равных единицах (относительных единицах или дБ). Таким образом, для приближенного учёта влияние шума камеры на реконструкцию фазового объекта можно оценить в относительных единицах с помощью выражения (7). Это обусловлено тем, что интенсивности объектных волн и, волн, обусловленных шумом, одинаковы для амплитудных и фазовых распределений.

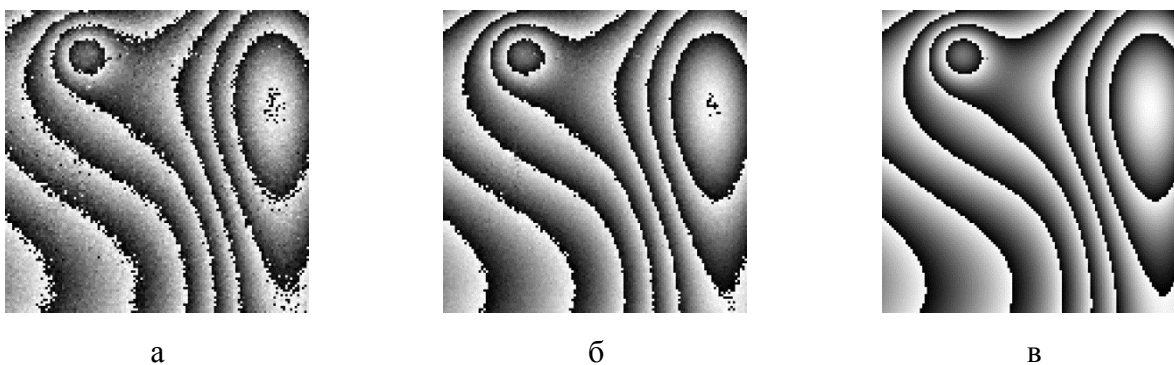


Рисунок 8 – Реконструированные фазовые распределения (128×128 пикселей) при использовании 5% (а), 10% (б) и 100% (в) динамического диапазона камеры Watec LCL-902С

Получены расчётные оценки увеличения ОСШ в световых распределениях, восстановленных с цифровых голограмм, при использовании разработанного метода компенсации пространственных шумов с помощью их портретов:

$$SNR_{HE} = \frac{I_O \cdot I_R}{\left( \frac{1}{12C^2} + \frac{1}{12} + \frac{E_{ds}^2 \sigma_{dt}^2}{N} + \sigma_{ds}^2 + \frac{I_O + I_R}{NC} + E_{ls}^2 PRNU^2 \cdot (I_R^2 + 4I_R \cdot I_O + 2I_O^2) \right)} \left( \frac{L \times M}{L_S \times M_S} \right) \times \sqrt{1 + 2 \frac{I_O \cdot I_R}{\left( \frac{1}{12C^2} + \frac{1}{12} + \frac{E_{ds}^2 \sigma_{dt}^2}{N} + \sigma_{ds}^2 + \frac{I_O + I_R}{NC} + E_{ls}^2 PRNU^2 \cdot (I_R^2 + 4I_R \cdot I_O + 2I_O^2) \right)} \left( \frac{L \times M}{L_S \times M_S} \right)} \quad (9)$$

Результаты, полученные при численном моделировании с использованием характеристик камеры Canon EOS 400D, хорошо согласуются с расчётными оценками. При компенсации приближёнными (относительная ошибка 20%) портретами пространственных шумов максимальное увеличение ОСШ может составлять до 10 раз по сравнению с голограммой, полученной однократной экспозицией. Для достижения ОСШ, близкого к максимальному, достаточно усреднения 300 ÷ 500 снимков.

Для сопоставления результатов численного моделирования по определению расчётных зависимостей ОСШ с характеристиками реальных цифровых голограмм проведены эксперименты по записи голограмм с использованием различных камер. Качество восстановления световых распределений с голограммы, записанной камерой MegaPlus, превосходит результат восстановления светового распределения с голограммы, зарегистрированной камерой Watec, что согласуется с полученными значениями. Экспериментальные оценки ОСШ составляют  $34 \pm 2$  (MegaPlus) и  $17 \pm 2$  (Watec). Результат для камеры Watec близок к результатам моделирования (ОСШ = 18) и расчётов (ОСШ = 21). Для камеры MegaPlus он оказался на 5% ниже ожидаемого при учете вклада оптических шумов. Степень согласования результатов с расчётными обуславливается наличием спеклов

и отсутствием возможности проведения усреднения восстановленных световых распределений по совокупности реальных голограмм.

**Глава 4** посвящена задачам развития современной цифровой голографии. Наиболее популярный вариант оптического восстановления световых распределений с голограмм – применение пространственно-временных модуляторов света (ПВМС) для их отображения. При освещении ПВМС, например, лазерным излучением производится восстановление поля. В зависимости от типа ПВМС (амплитудный, фазовый, амплитудно-фазовый) существуют различные методы предобработки цифровых голограмм, позволяющие получить их в представлении, оптимизированном под конкретный модулятор. Наиболее распространены жидкокристаллические (ЖК) ПВМС и микрозеркальные модуляторы света (МЗМ). Другой вариант восстановления цифровой голограммы – её печать, например, на прозрачной плёнке и последующее освещение лазерным излучением.

Экспериментально проведено восстановление световых распределений с цифровых голограмм. Схема установки для оптического восстановления представлена на рис. 9. Источником излучения является гелий-неоновый лазер (633 нм). Излучение, отражаясь от экрана ПВМС, формирует оптическую реконструкцию световых распределений.

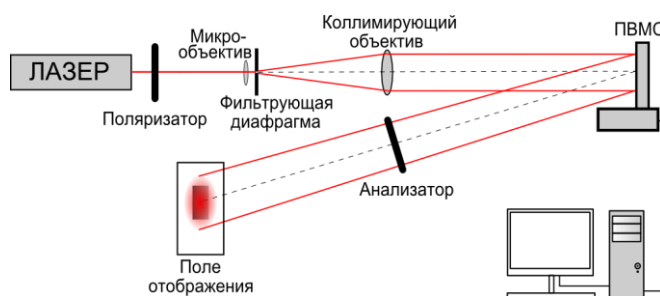


Рисунок 9 – Схема экспериментальной установки по оптическому восстановлению световых распределений с цифровых голограмм Френеля

Проведены эксперименты по оптическому восстановлению световых распределений с синтезированных голограмм и киноформов (фазовых голограмм, восстанавливающих единственный – информативный – порядок дифракции). Результаты, полученные при реальном восстановлении с фазового ПВМС, находятся в качественном согласии с результатами, полученными при численном моделировании.

Предложен метод улучшения качества восстановления с использованием уменьшения диапазона модуляции фазы ПВМС. Записанная цифровая голограмма представляет собой двумерный массив, содержащий значения интенсивности. Пусть диапазон значений интенсивности выводимой голограммы уменьшен в сравнении с исходным, соответствующим глубине модуляции фазы  $2\pi$ , в  $q$  раз. Тогда полученная фазовая модуляция

будет приблизительно соответствовать амплитудной при восстановлении световых распределений с голограммы:

$$HX[x, y] = A \exp\left(i \frac{\varphi[x, y]}{q}\right) \approx A \left(1 + i \frac{\varphi[x, y]}{q}\right) = A + Ai \frac{\varphi[x, y]}{q} = A + \frac{2\pi i A}{256q} H[x, y], \quad (10)$$

где  $H[x, y]$  – массив со значениями интенсивностей зарегистрированной голограммы,  $X[x, y]$  – дополнительный фазовый набег,  $A$  – амплитуда освещающей плоской волны,  $\varphi[x, y]$  – массив со значениями фазы. Следовательно, при выводе амплитудной голограммы на фазовый ПВМС можно улучшить качество восстановленного распределения путём уменьшения глубины модуляции фазы выводимых на ПВМС распределений, в том числе уменьшая количество градаций. Применение метода позволило достичь уменьшения НСКО восстановленного распределения от оригинала до 5 раз.

Предложен метод улучшения качества оптического восстановления световых распределений путём численного итеративного преобразования цифровой голограммы в киноформ. Это позволило достичь меньшего уровня зашумлённости восстановленного распределения и повысить его дифракционную эффективность в 4 раза.

В последние годы в задачах фотоники и информационной оптики активно развиваются интеллектуальные методы, основанные на машинном обучении. Нейронная сеть – это математическая модель, дизайн которой направлен на имитацию работы головного мозга человека. Так, принцип работы свёрточных нейронных сетей имитирует работу зрительной коры. В области голографии нейронные сети могут обеспечить значительное ускорение времени расчетов, а также облегчить получение качественных световых распределений.

Разработан интеллектуальный метод повышения качества восстановленных световых распределений с голограмм на основе нейросетевой реконструкции комплексной амплитуды волны. В основе метода лежит извлечение из голограммы амплитуды и фазы только информативного порядка дифракции. Эти амплитуда и фаза могут быть затем использованы для расчета восстановленного распределения объекта или сечений 3D-сцены. При этом качество восстановленных распределений будет повышено, т.к. они будут свободны или практически свободны от нежелательных порядков дифракции. Основой метода является глубокая свёрточная нейросеть с промежуточными связями. Предложенный метод показал более высокое качество реконструкции по всем метрикам (в 3,4 раза по коэффициенту корреляции и в 1,7 раза по индексу структурного сходства), чем прямой расчет дифракции.

Для одновременного улучшения и восстановления световых распределений с голограмм предложен метод, использующий разветвленную нейронную сеть. Данная сеть восстанавливает сразу набор отдельных объектных плоскостей или сечений сцены с голограммы, которая является для неё входными данными. На выходе нейронная сеть предоставляет набор восстановленных световых распределений объектов или сечений 3D-

сцены. Архитектура нейросети представлена на рис. 10а. Здесь А, В, С обозначены промежуточные связи, которые идут к каждой ветви. Обрабатывается голограмма сцены, состоящей из N сечений.

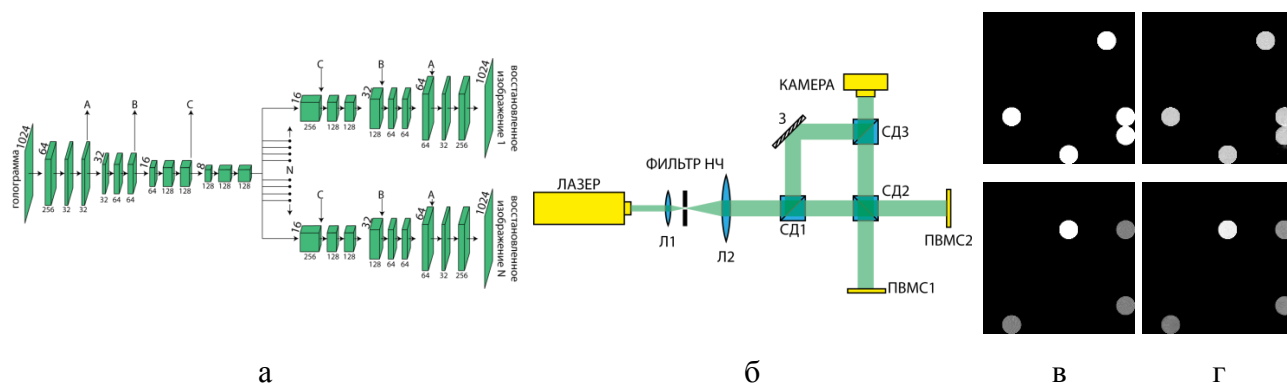


Рисунок 10 – Схема архитектуры нейросетевой реконструкции сечений 3D-сцены для разработанного метода повышения качества восстановления (а); схема экспериментальной установки для записи цифровых голограмм 3D-сцен (б); оригиналы (в) и восстановленные световые распределения сечений разработанным методом (г)

Проведена численная и экспериментальная апробация предложенного метода. Пример схемы экспериментальной установки для регистрации цифровых голограмм фазовых 3D-сцен показан на рис. 10б. Лазерное излучение (Nd:YAG 532 нм) светоделителем СД1 делится на опорную и объектную волны. Светоделитель СД2 делил объектную волну на два направления: в сторону модуляторов света ПВМС 1 и ПВМС 2. Изображения объектов отображались на ПВМС. Полученная интерференционная картина регистрировалась цифровой камерой. На рис. 10в-г представлены примеры оригиналов и восстановленных с голограмм световых распределений сечений 3D-сцен разработанным методом. Как с визуальной точки зрения, так и количественно по метрикам (коэффициент корреляции составил более 0,99) качество восстановления на высоком уровне. Результаты сравнивались с другим перспективным нейросетевым методом – использованием модели Dense-U-net: предложенный метод обеспечил на 40% более высокое качество восстановления по метрике коэффициента корреляции.

Высокоскоростная оптическая цифровая голографическая реконструкция является перспективным подходом для разработки 3D-телевидения и формирования излучения специальной формы. Этот подход может быть реализован с использованием высокоскоростных МЗМ, отличительной особенностью которых является бинарная модуляция. Проведено сравнительное численное и экспериментальное исследование применимости методов бинаризации цифровых и компьютерно-синтезированных голограмм:

30 пороговых и 30 методов, базирующихся на операции диффузии ошибки. На основе полученных результатов предложен метод подбора весовых коэффициентов операции диффузии ошибки для бинаризации голограмм. Он использует последовательную корректировку весов операции диффузии ошибки. Проведена численная и оптическая верификация разработанного метода бинаризации путем отображения голограмм на МЗМ (см. рис. 9). Зарегистрированные изображения оптических реконструкций показаны на рис. 11: голограмма бинаризовалась наиболее используемым методом - Флойда-Стенберга (а) и разработанным методом (б). Применение метода обеспечило повышение качества восстановления по сравнению со стандартным на 16% по величине пикового ОСШ.



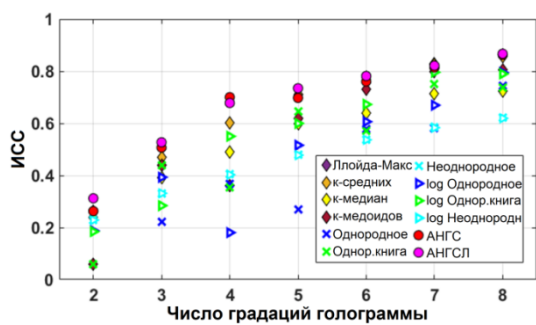
Рисунок 11 – Оптически восстановленные световые распределения с голограмм, бинаризованных методом Флойда-Стенберга (а) и разработанным методом (б)

Разработан метод бинаризации голограмм, использующий комбинацию локальной пороговой обработки, блочного разделения и процедуры диффузии ошибки. Проведены численные эксперименты и оптическая реконструкция с использованием МЗМ. Получено, что качество реконструкции в среднем на 22% и 19% выше по сравнению со стандартными методами пороговой бинаризации и диффузии ошибки соответственно.

Предложен метод сжатия голограмм на основе частотной фильтрации, разделения спектра, вейвлет-разложения и обработки коэффициентов. Наиболее универсальными вейвлетами можно считать вейвлеты Мейера и обратные биортогональные 6.8, несколько койфлетов и некоторые симлеты. Получено сжатие голографической информации более 300 раз (в случае исключения 90% спектра, квантования на две градации и обнуления 90% коэффициентов вейвлет-разложения). Использование распространенных методов сжатия обеспечивает коэффициенты сжатия, равные 30, при большей потере информации.

Предложены два метода квантования голограмм: адаптивное неоднородное квантование на основе обработки гистограмм со сдвигом пиков (АНГС) и добавление логарифмического компандирования (АНГСЛ). На рис. 12а показаны зависимости качества

восстановленных световых распределений из квантованных голограмм от количества градаций. Примеры реконструированных световых распределений показаны на рис. 12б-в. Предложенные методы дали высокое качество восстановления. Получено, что по сравнению с неитеративным равномерным квантованием для 2 градаций качество повышено больше, чем в 5 раз, а для диапазона 2-5 градаций – более 3 раз. Особенно хорошо предлагаемые методы работают для малого числа градаций. При этом время квантования предложенными методами примерно соответствует простейшим неитеративным методам, а качество восстановления оказывается значительно лучше. Самый быстрый итеративный метод Ллойда-Макса более чем в 10 раз медленнее предложенных методов. Другие итеративные методы в сотни раз медленнее предложенных методов.



а

б

в

Рисунок 12 – Зависимость качества восстановленных световых распределений с квантованных голограмм от количества градаций по метрике индекса структурного сходства (а), примеры восстановленных распределений после равномерного квантования (б) и разработанного метода квантования голограммы (в)

**Глава 5** посвящена задаче регистрации информации в системах пространственной фильтрации. Высокоточная регистрация позволяет существенно повысить качество регистрируемых световых распределений, в том числе и в подобных системах. Предложены различные методы, позволяющие осуществлять оптическое кодирование информации с использованием оптико-цифровых систем.

Предложен и экспериментально реализован метод оптического кодирования цифровой информации с использованием пространственно-некогерентного излучения. Кодирование основано на оптической свертке кодируемого светового распределения с функцией рассеяния точки киноформа, которая служит ключом кодирования. Математически оптическое кодирование с пространственно-некогерентным излучением с учетом аддитивного шума можно описать как:

$$g[x, y] = f[x, y] \otimes h[x, y] + w[x, y], \quad (11)$$

где  $g$  – зарегистрированное распределение интенсивности света,  $f$  – распределение интенсивности света, соответствующее кодированному световому распределению,  $h$  – функция рассеяния точки дифракционного оптического элемента (киноформа),  $w$  – аддитивный шум,  $x, y$  – индексы, соответствующие координатам пикселей светового распределения.

Для стабилизации некорректной задачи цифрового декодирования использовался обратный фильтр с регуляризацией Тихонова (эффективный метод стабилизации, позволяющий менять значение параметра регуляризации в соответствии с текущими экспериментальными условиями). Сглаживающей функция является максимум спектра мощности функции рассеяния точки. Предложенный метод кодирования не имеет недостатков, присущих когерентным системам (в первую очередь – затруднённая аппаратная реализация, требующая интерферометрической схемы записи), поскольку использует только распределение интенсивности света.

Схема экспериментальной установки представлена на рис. 13. Пространственная когерентность гелий-неонового лазера (633 нм) разрушается вращающимся рассеивателем ВР, и луч освещает экран ПВМС1, отображающий кодируемый объект (например, QR-код). На ПВМС2 отображается киноформ, содержащий ключ кодирования. Линза Л4 расположена таким образом, что ПВМС2 находится в ее задней фокальной плоскости, а камера – в передней фокальной плоскости. Когда ПВМС2 выключен и действует как зеркало, он формирует изображение ПВМС1 на фотосенсоре камеры. Если на ПВМС2 отображается киноформ, то в плоскости фотосенсора формируется оптическая свертка изображения ПВМС1 и функции рассеяния точки киноформа. Данная свертка и является кодированным световым распределением.

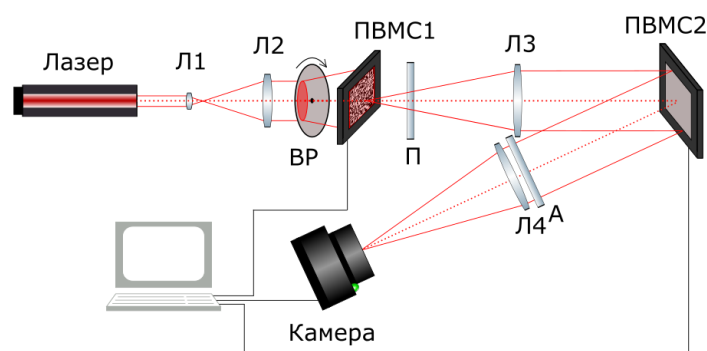


Рисунок 13 – Схема оптического кодирования световых распределений с пространственно-некогерентным излучением

Два ЖК ПВМС использовались для реализации динамического цифрового ввода информации и динамической же смены ключей кодирования. Ввод информации осуществлялся амплитудным ЖК ПВМС. Фазовый ЖК ПВМС отображал кодирующий киноформ. Реализованная схема оптического кодирования проще и легче в экспериментальной реализации по сравнению со схемами на основе классических когерентных методов из-за отсутствия голографической схемы регистрации, позволяет использовать меньше оптических элементов и не требует виброизоляции.

Были проведены эксперименты по кодированию информации, размещённой в QR-кодах. Все кодированные изображения были успешно декодированы. Пример QR-кода размером  $129 \times 129$  отсчётов, использованного в экспериментах, показан на рис. 14а. Он был сгенерирован с уровнем коррекции ошибок М (компенсация до 15% повреждений). QR-код был отображен на ПВМС без увеличения и оптически кодирован (рис. 14б). Декодированное световое распределение показано на рис. 14в. Количество повреждённых отсчётов в QR-кодах в результате оптического кодирования и процедуры цифрового декодирования не превышало 0,05%, что более чем на два порядка ниже максимального допустимого повреждения. Это гарантировало успешное декодирование данных. Все полученные QR-коды были успешно распознаны смартфоном с помощью бесплатного программного обеспечения для сканирования (рис. 14г).

На основе предложенной экспериментальной схемы осуществлена оценка параметров, достижимых при совместном применении методов регистрации, обработки и декодирования: быстрая (с частотой цифровой камеры) регистрация световых распределений, высокоточная компенсация неоднородностей откликов пикселей фотосенсора и дробовых шумов (снижение отношения сигнал/(временной шум) и сигнал/(пространственный шум)), цифровая пост-обработка и декодирование кодированных видеопотоков. Разработан метод, осуществляющий итерационный подбор оптимальных параметров декодирования, отвечающих конкретной реализации системы кодирования: уровень пороговой фильтрации кодированного светового распределения, параметр регуляризации, коэффициенты преобразования растра ключей кодирования. В результате коррекции световых пространственных шумов сенсора камеры получено снижение шумов регистрации на 15%. При многократной экспозиции величина шума регистрации снижается: на 36% при 2 экспозициях, на 47% при 3, и более 5 раз при числе экспозиций более 100.

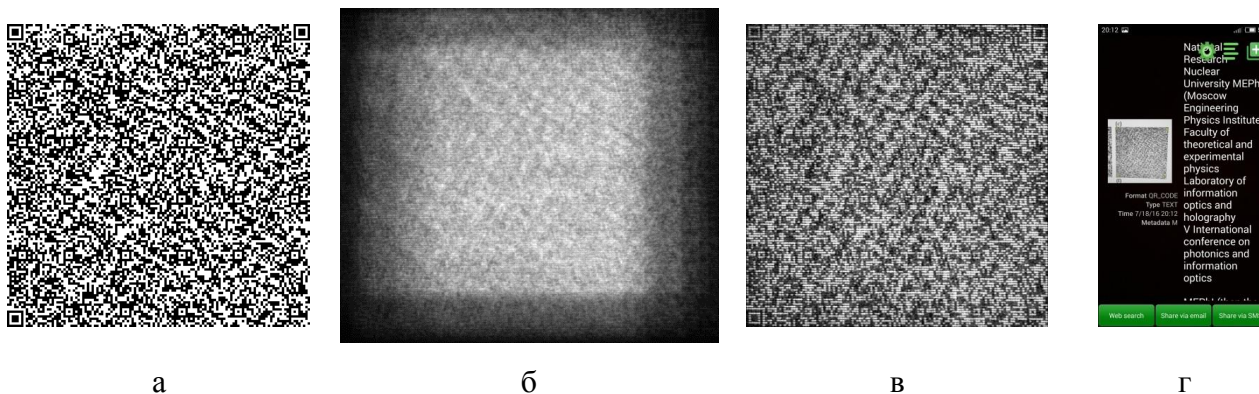


Рисунок 14 – Оригинал (а), оптически кодированный (б) и декодированный (в) QR-код размером  $129 \times 129$  отсчётов и скриншот успешного сканирования (г)

Широко используемые в настоящее время методы численного кодирования, реализованные в виде программного обеспечения или специализированных электронных устройств, обеспечивают быстродействие  $10^4 \div 10^{10}$  бит/с при длине ключа  $10 \div 10^3$  бит. Разработанные оптические методы обеспечивают увеличение длины ключа до 128 кбит в сочетании с быстродействием на уровне десятков Гбит/с, достижимым при использовании существующих средств высокоскоростной модуляции излучения.

Проведено сравнение полученных результатов с результатами для когерентных методов. Для этого использовалось декодированное изображение QR-кода, кодированного с помощью пространственно-когерентного излучения, однако даже после специальной процедуры шумоподавления уровень спекл-шума оставался значителен. Величина НСКО составила 0,60, что более чем в два раза выше чем в предложенном методе, а следовательно, ОСШ оказывается примерно в  $2,3 \div 2,5$  ниже. Таким образом, преимущества представленного метода включают: более высокое ОСШ, что позволило декодировать QR-код в 20 раз большего размера, чем использовался ранее, и более простую экспериментальную реализацию из-за регистрации только распределения интенсивности света.

В **Глава 6** проведено исследование особенностей детектирования сигналов широкополосных и сверхширокополосных аналоговых оптических трактов (АОТ). Развитие технологий передачи информации с использованием волоконной оптики, совершенствование технологий производства лазеров, электрооптических модуляторов и фотоприемников, позволило существенно повысить характеристики АОТ. В связи с этим АОТ нашли своё применение в широком диапазоне задач: фазированные антенные решетки, фотонные аналого-цифровые преобразователи, телевидение, обработка сигналов, дистанционное зондирование и др.

Стандартный АОТ состоит из трех основных составляющих: источника излучения, электрооптического модулятора (ЭОМ) и фотоприемника, а также оптического волокна для

их соединения. Радиочастотный сигнал, который необходимо передать, подаётся на ЭОМ (см. рис. 15). Источником излучения обычно является непрерывный лазер. В большинстве АОТ используется одиночный модулятор Маха-Цандера амплитудного, фазового либо поляризационного типа. Помимо использования ЭОМ в АОТ, используются направленные ответвители, а также модуляция источника излучения. Модуляция с использованием ЭОМ или ответвителя называется «внешней», а с использованием источника излучения – «непосредственная». Полученный сигнал с модулирующего устройства передаётся через волоконно-оптическую линию и регистрируется фотоприемником.

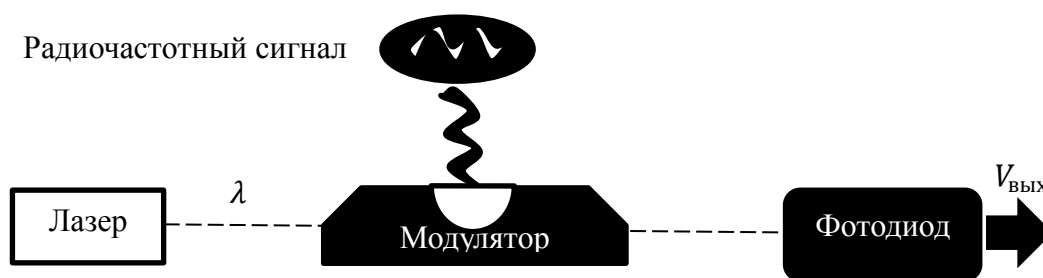


Рисунок 15 – Типовая схема АОТ

Из-за нелинейности отклика АОТ в регистрируемом сигнале создаются новые частотные компоненты: гармонические и интермодуляционные (взаимомодуляционные) нелинейные искажения. Передаточную характеристику цепи можно представить в виде разложения в ряд Тейлора:

$$V_{out} = KV_{in} = \sum_{i=0}^{\infty} a_i V_{in}^i, \quad (12)$$

где  $K$  – оператор отклика цепи. Степень снижения искажений оценивается свободным динамическим диапазоном, определяемым как максимальное ОСШ на выходе, получаемое при сохранении мощности искажений ниже шума.

Представлены описание основных тенденций и достигнутые результаты по повышению свободного динамического диапазона АОТ. Проведена систематизация современных методов повышения динамического диапазона (линеаризации) широкополосных и сверхширокополосных АОТ. Выделены две основные группы методов: аппаратные и цифровые. Электронные аппаратные методы направлены на создание контура, способного компенсировать нелинейность системы до начала модуляции сигнала. Они делятся на три подгруппы: предкомпенсационные (внесение предискажения), с обратной связью и с прямой связью. Предкомпенсация основывается на внесении искажения таким образом, чтобы полученная передаточная функция модулятора и предискажателя оказывалась более линейной, чем в случае использования только модулятора. При использовании обратной

связи некоторая часть сигнала с модулятора регистрируется, анализируется и сравнивается с оригинальным сигналом; после этого система компенсирует нелинейность отклика путём добавки к получаемому сигналу найденного искажения. Прямая связь является более сложной в реализации и использует несколько модулирующих устройств. В оптических аппаратных методах используется несколько модулирующих устройств либо один с усложненной формой, чтобы повысить линейность передаточной функции. Посткомпенсационные цифровые методы снижают искажения сигнала при его регистрации либо непосредственно после регистрации.

Таким образом, аппаратные методы – электронные с предусканиванием и оптические на основе сдвига фазы – являются наиболее простыми для реализации, а также наиболее дешёвыми. Наиболее перспективными методами являются цифровые с использованием посткомпенсации сигнала. Однако их использование ограничивается доступными полосой аналого-цифрового преобразования и пропускной способностью цифровых средств.

Проведена экспериментальная оценка возможностей использования сверхвысокочастотного мультиплексора в качестве полосового фильтра при создании оптоэлектронной системы генерации гармонического сигнала, включающей в себя оптический тракт и электрическую обратную связь. Результаты измерений показывают, что реализованный генератор с мультиплексором позволяет получить сигнал на частоте 926 МГц мощностью 3 дБм и уровнем фазовых шумов ниже  $-130$  дБн/Гц при отстройке 10 кГц. Полученные фазовые шумы в большей степени определяются добротностью канала мультиплексора. Эксперименты свидетельствуют, что для классической схемы реализации генератора использование канала серийного мультиплексора как фильтра менее эффективно по сравнению со специально изготовленным узкополосным фильтром из-за меньшей добротности и пропускания вне полосы основных каналов. С другой стороны, использование специально изготовленных и/или оптимизированных мультиплексоров остаётся привлекательным при построении оптоэлектронных генераторов для генерации на нескольких частотах с возможностью дискретной перестройки частоты.

Для ускорения передачи данных и повышения свободного динамического диапазона АОТ предложен интеллектуальный метод. На рис. 16а изображена схема метода цифровой линеаризации с предобработкой и обучением. Первый шаг работы системы – это ответвления сигналов на входе и выходе оптического тракта, второй шаг – это обучение предобработчика на основе минимизации ошибки  $e$ . Используя модель нелинейностей в виде упрощенного фильтра Вольтера, можно обучить систему предобработки, то есть получить коэффициент предусканивания. На примере сигнала Wi-Fi и передачи через тракт длиной

волокна 9 км метод обеспечил снижение векторной ошибки, причем для некоторых входных мощностей – на более чем 5 Дб.

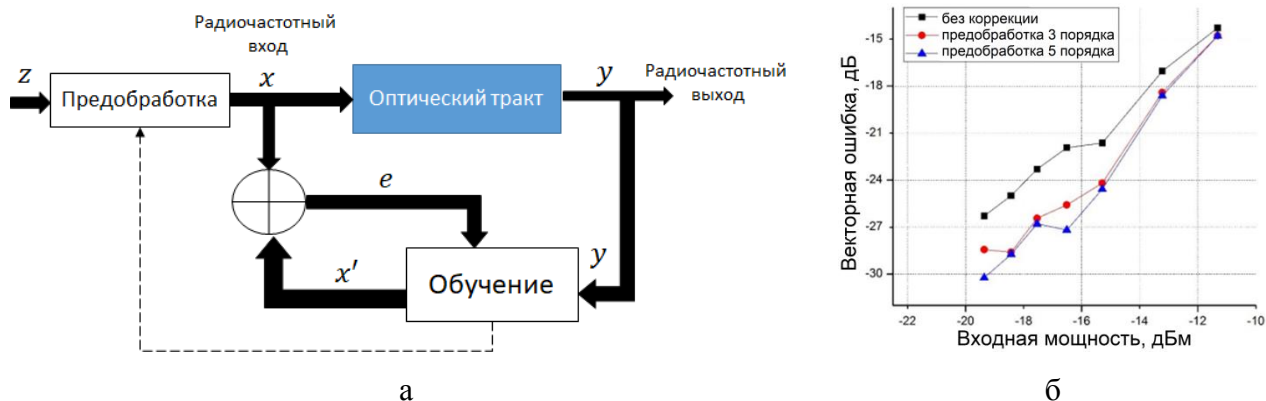


Рисунок 16 – Схема цифровой линейризации оптического тракта с помощью предобработки (а) и значения векторной ошибки при передаче сигнала Wi-Fi (б)

**Глава 7** посвящена реконструкции световых распределений методами сжатого зондирования (СЗ). В настоящее время для регистрации информации широко используются цифровые камеры, количество отсчетов которых составляет от единиц до десятков млн. При этом обычно в спектре изображений лишь небольшая часть гармоник имеет высокие амплитуды. На основе этого наблюдения развились технологии компрессии снимков, а также техники СЗ. Т. к. регистрируемые данные можно рассматривать в разреженном виде в некотором базисе, то осуществляя небольшое число измерений относительно стандартного снимка (т. е. относительно числа пикселей), можно восстановить световое распределения с достаточно высоким качеством. Это реализуется путем рассмотрения набора регистраций как представленных в другом базисе – базисе измерений, который не будет иметь взаимной зависимости с базисом разрежения.

Оптическим примером применения данного метода является реконструкция сцен с использованием «однопиксельной камеры», которая включает в себя однопиксельный детектор, набор оптических элементов и прореживание, например, быстрым МЗМ. На МЗМ отображаются бинарные массивы: случайные массивы единиц и нулей. Детектор фиксирует общую интенсивность излучения, которая представляет собой покомпонентное произведение объектного распределения излучения и выведенных значений на МЗМ. Количество регистраций составляет несколько сотен или тысяч, что на 4-5 порядков меньше числа пикселей современных цифровых камер. Восстановление светового распределения осуществляется методами оптимизации, обычно рассматриваемых в следующем виде:

$$\operatorname{argmin}_v \frac{1}{2} \|Cv - y\|_2^2 + \tau \phi(v), \quad (13)$$

где  $v$  – вектор значений искомого сигнала,  $C$  – матрица (часто как набор случайных значений),  $y$  – набор измерений,  $\varphi(v)$  – функция регуляризации и  $\tau \geq 0$  – параметр регуляризации.

Методы восстановления на основе СЗ можно разделить на следующие основные группы: выпуклая оптимизация, жадные алгоритмы, пороговые подходы, комбинаторный подход, невыпуклая оптимизация и байесовские подходы. Современные методы восстановления СЗ включают в себя сразу несколько групп алгоритмов, что помогает снизить степень ошибки и восстанавливать объекты с лучшим качеством, даже если потери значительны.

Проведены численные эксперименты по восстановлению двумерных бинарных и полутоновых объектов с помощью методов СЗ минимизацией нормы  $L_1$ . Получено, что объект становится визуально различим при нормированном числе регистраций на число отсчетов объекта, составляющем менее 0,2, для полутоновых объектов и менее 0,05 для бинарных. Это обеспечивает большое преимущество над другими способами восстановления, т. к. при уменьшении количества регистраций снижается ресурсоемкость и увеличивается скорость восстановления объектов. Проведено сравнение с использованием теоремы Мура-Пенроуза о псевдообратной матрице: качество восстановления оказывается в среднем в 5 раз хуже по величине НСКО.

Проведены оптические эксперименты по регистрации бинарного объекта вариантом однопиксельного детектора. В качестве объекта использовалось бинарное световое распределение размером  $128 \times 128$  пикселей. Схема установки представлена на рис. 17. В установке использовался гелий-неоновый лазер, МЗМ с разрешением  $1024 \times 768$  пикселей (однако использовался лишь участок размером  $128 \times 128$  пикселей) и камера технического зрения PixeLink PL-B781F с изменяемым числом используемых пикселей.

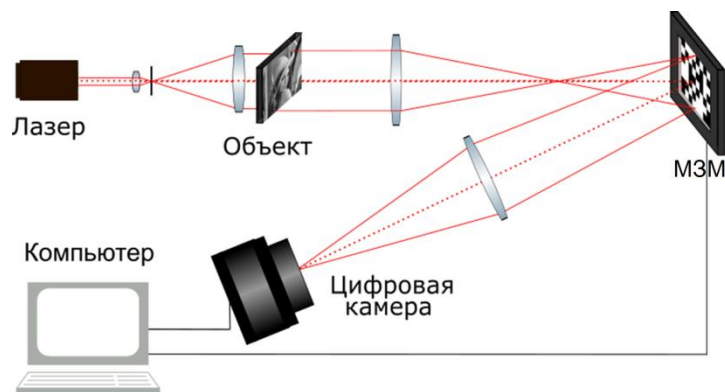


Рисунок 17 – Схема экспериментальной установки для регистрации интенсивности при изменении величины апертуры

Было произведено до 1600 регистраций, что составило менее 10% информативности (т.е. менее 10% числа пикселей исходного объекта). Восстановление осуществлялось с помощью метода выпуклой оптимизации – шумоподавления на основе выбора базиса – с использованием прямо-двойственного алгоритма. Результаты восстановления бинарного распределения (а) представлены на рис. 18 из 1200 регистраций (7,3% информативности, б) и 800 регистраций (4,9% информативности, в).

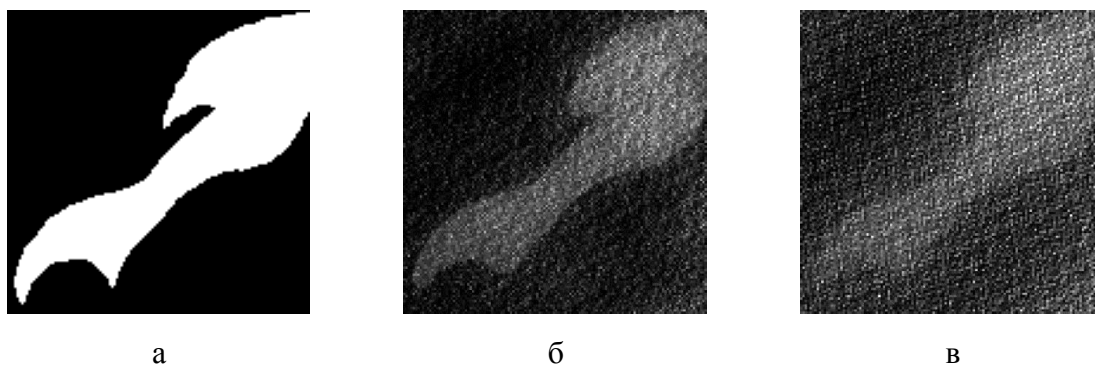


Рисунок 18 – Восстановленные световые распределения (а) СЗ из 1200 (б) и 800 (в) оптических регистраций

Получено, что с количества регистраций меньше 5% относительно количества пикселей исходного объекта объект имеет удовлетворительное качество по величине пикового ОСШ восстановленного светового распределения от числа регистраций. С визуальной точки зрения получено приемлемое качество восстановления (при информативности меньше десяти процентов).

В настоящее время отсутствуют однозначные оценки устойчивости метода однопиксельного детектирования с применением СЗ к пространственным потерям регистрируемой интенсивности. Решение данной задачи необходимо для оценок возможностей применения метода: при динамически меняющемся положении регистратора излучения, при значительных по площади потерях сигнала между МЗМ и детектором, наличии динамических и рассеивающих сред между МЗМ и детектором и др.

Разработан экспериментальный метод определения предельно допустимого уровня пространственных потерь интенсивности в системах однопиксельной регистрации изображений, учитывающий особенности метода сжатого зондирования и параметры аппаратной реализации. Реализовано однопиксельное детектирование и восстановление световых распределений из набора оптических регистраций при использовании ограничивающих детектор апертур, имеющих различный размер, форму и соосность положения. Ограничение суммарной интенсивности производилось по времени

и пространству. Регистрировались целые кадры камерой с возможностью удаления части пикселей. Получено, что даже существенные пространственные потери интенсивности не оказывают значительного влияния на качество восстановленных световых распределений. Так, при пространственных потерях в 50% пиковое ОСШ снизилось на 2,2 дБ, а при потерях в 30% – лишь на 0,7 дБ. Это объясняется тем, что при восстановлении используется только набор интегральных значений интенсивности.

Проведено моделирование схемы регистрации разреженного сигнала с помощью однопиксельного детектора МЗМ в задачах цифровой голографии. Для создания интерференции использовался интерферометр Маха-Цандера. После того как излучение проходило через объект, возникала интерференция с опорной волной, суммарная волна отражалась от МЗМ и фокусировалась в плоскости однопиксельного детектора, который регистрировал суммарное значение интенсивности излучения (образованной голограммы). Реконструкция распределения по голограмме производилась с помощью алгоритмов СЗ, а световое распределение численно восстанавливалось обратным преобразованием Френеля. Получено, что достаточно использовать число регистраций, равное 15% от количества пикселей исходного светового распределения, чтобы восстановить различимый с визуальной точки зрения объект.

Проведено моделирование восстановления светового распределения с использованием фазового модулятора и однопиксельного детектирования в задачах цифровой голографии. В фазосдвигающей голографии объект восстанавливается из ограниченного набора интерферограмм, каждый из которых добавляет постоянную фазовую задержку между объектной и опорной волнами. Получено дополнительное улучшение качества по метрике коэффициента корреляции относительно схемы с МЗМ на 20%.

### **Основные результаты и выводы работы**

1. Разработаны и экспериментально апробированы оптико-цифровые методы характеристики фотосенсоров цифровых камер мегапиксельного разрешения, основанные на автоматической сегментации регистрируемых изображений одной сцены, имеющей динамический диапазон, превышающий динамический диапазон фотосенсора. Данные методы позволяют находить временные шумы для всех сигналов фотосенсора с рекордно низкой ошибкой, составляющей менее 0,2%. Дополнительная модификация таких методов гарантирует высокоскоростную и высокоточную (ошибка менее 2%) характеристику при регистрации только 2 изображений одной сцены.

2. Разработаны и экспериментально апробированы методы нахождения портретов световых пространственных шумов фотосенсоров цифровых камер, отличающиеся

улучшенной техникой подавления темновых пространственных и временных шумов. Разработанные методы с высокой точностью идентифицируют камеры по критерию свой/чужой (соотношение коэффициентов корреляции не менее 60).

3. Разработаны и экспериментально апробированы методы определения пространственных шумов фотосенсоров цифровых камер, основанные на регистрации темновых и световых кадров при освещении квазиоднородным излучением. Методы отличаются пониженными требованиями к пространственной однородности используемого освещения, но обеспечивают высокую точность определения шумов.

4. Разработаны многопараметрические математические модели цифровой голографии диффузных объектов, одновременно учитывающие влияние неоднородностей фоточувствительности и темнового сигнала, темнового временного и фотонного дробового шумов, динамического диапазона фотосенсора цифровой камеры, размер голографируемых объектов, интенсивности опорной и объектной волн. Для широкого диапазона камер различного назначения созданные модели демонстрируют высокую (отклонение не более 5%) точность определения отношения сигнал/шум восстановленного с голограмм светового распределения без необходимости предварительного макетирования полной оптической системы.

5. Разработан метод компенсации пространственных шумов фотосенсоров цифровых камер в комбинации с многократной экспозицией, обеспечивающий значительное увеличение ОСШ. Так, при компенсации приближёнными (относительная погрешность 20%) портретами пространственных шумов максимальная степень увеличения ОСШ может составлять до 10 раз по сравнению с одиночным снимком.

6. Разработанные принципы скоростной интеллектуальной обработки цифровых голограмм, основанные на алгоритмическом подавлении дополнительных порядков дифракции и нейросетевом восстановлении вспомогательных световых распределений, позволяют достичь рекордной точности реконструкции. Метод позволяет получить фазовую и амплитудную объектную информацию из одиночной голограммы за одну итерацию, без применения дополнительных методов фильтрации и без необходимости регистрировать дополнительные изображения или голограммы. Интеграция разработанной свёрточной нейронной сети с разветвленной архитектурой в систему восстановления световых распределений демонстрирует 40% повышение точности восстановления по сравнению с существующими передовыми интеллектуальными методами при отсутствии характерной для традиционных алгоритмических подходов потребности во вспомогательной информации.

7. Разработан итеративный адаптивный метод подбора весовых коэффициентов операции диффузии ошибки для бинаризации цифровых голограмм. Метод апробирован на

численно и оптически восстановленных изображениях отражающих объектов, восстановленных с экспериментально зарегистрированных цифровых голограмм. Метод обеспечил повышение качества восстановления по сравнению со стандартными техниками на 16% по величине пикового отношения сигнал/шум, допуская возможность высокоскоростной (более  $10^{10}$  бит/с) передачи голографических данных.

8. Предложен метод сжатия цифровых голограмм на основе совместной обработки во временном, частотном и частотно-временном представлении. Разработанные алгоритмы позволяют достичь коэффициента компрессии более 300 без существенных потерь в качестве восстановления.

9. Предложены два метода квантования голограмм: адаптивное неоднородное квантование на основе обработки гистограмм со сдвигом пиков и добавление логарифмического компандирования. По сравнению с неитеративным равномерным квантованием качество восстановленных с квантованных голограмм световых распределений повышено более чем в 3 раза. Наиболее значительное улучшение получено для малого (1-3 бита) числа градаций.

10. Разработан принцип и экспериментально реализована техника оптического кодирования цифровой информации в пространственно-некогерентном свете, допускающая пропускную способность более  $10^{10}$  бит/с при эквивалентной длине ключа кодирования не менее 128 кбит. Обоснована возможность эффективного применения в оптико-цифровых криптографических системах матричных контейнеров цифровых данных с 20-кратно увеличенной информационной ёмкостью.

11. Предложен вариант реализации оптоэлектронного генератора сигналов, позволяющий дискретно регулировать частоту генерируемого сигнала или генерировать сигнал одновременно на нескольких заданных частотах. Разработаны интеллектуальные методы повышения качества передачи информации с помощью аналоговых оптических трактов со снижением векторной ошибки до 5 дБ в режиме реального времени.

12. Разработан экспериментальный метод определения предельно допустимого уровня пространственных потерь интенсивности в системах однопиксельной регистрации изображений, учитывающий особенности метода сжатого зондирования и параметры аппаратной реализации. Продемонстрировано, что при формировании изображения бинарного объекта в данной системе пиковое отношение сигнал/шум снижается незначительно при уровне потерь до 50%.

### Основные публикации по теме работы

1. Rymov D.A., Svistunov A.S., Cheremkhin P.A., et al. 3D-CGH-Net: Customizable 3D-hologram generation via deep learning // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2025. — Vol. 184. — Pp. 108645.
2. Kerov A.A., Ovchinnikov A.S., Cheremkhin P.A., et al. Enhancing iterative hologram generation by mutual accounting quantitative metrics // *Journal of Optics*. — 2025. — Vol. 27, No. 5. — Pp. 055703.
3. Kozlov A.V., Rodin V.G., Cheremkhin P.A., et al. A family of methods based on automatic segmentation for estimating digital camera noise: A review // *IEEE Sensors Journal*. — 2024. — Vol. 24, No. 11. — Pp. 17353-17365.
4. Kozlov A.V., Cheremkhin P.A., Svistunov A.S., et al. Interpolation-Filtering Method for Image Improvement in Digital Holography // *Applied Sciences*. — 2024. — Vol. 14, No. 19. — Pp. 8790.
5. Черёмхин П.А., Рымов Д.А., Свистунов А.С. и др. Нейросетевые методы в цифровой и компьютерной голографии. Обзор // *Оптический журнал*. — 2024. — Т. 91. № 3. — С. 62–78. [Cheremkhin P.A., Rymov D.A., Svistunov A.S., et al. Neural-network-based methods in digital and computer-generated holography: a review // *Journal of Optical Technology*. — 2024. — Vol. 91, №3. — Pp. 170-180.]
6. Kiriya S.A., Rymov D.A., Cheremkhin P.A., et al. Generative adversarial neural network for 3D-hologram reconstruction // *Laser Physics Letters*. — 2024. — Vol. 21, No. 4. — Pp. 045201.
7. Savchenkova E.A., Ovchinnikov A.S., Cheremkhin P.A., et al. Adaptive non-iterative histogram-based hologram quantization // *Optik*. — 2024. — Vol. 311. — Pp. 171933.
8. Rymov D.A., Shifrina A.V., Cheremkhin P.A., et al. Ciphertext only attack on QR code optical encryption system with spatially incoherent illumination using a neural network // *Journal of Optics*. — 2024. — Vol. 26, No. 11. — Pp. 115704.
9. Кирий С.А., Свистунов А.С., Черёмхин П.А. и др. Восстановление изображений объектов: метод реконструкции с использованием цифровых внеосевых голограмм и генеративно-состязательной нейронной сети // *Измерительная техника*. — 2024. — Т. 73, №4. — С. 23-31 (2024). [Kiriya S.A., Rymov D.A., Cheremkhin P.A., et al. Object image reconstruction: method for reconstructing images from digital off-axis holograms using a generative adversarial network // *Measurement techniques*. — 2024. — Vol. 67, No. 4. — Pp. 282–290.]
10. Казьмин М.И., Небавский В.А., Черёмхин П.А. и др. Оптоэлектронная система генерации сигнала с низким уровнем фазовых шумов на основе сверхвысокочастотного мультиплексора: оценка возможностей построения // *Измерительная техника*, — 2024. — Т. 73, № 11. — С. 14-18. [Kazmin M.I., Nebavskiy V.A., Cheremkhin P.A., et al. Low phase noise optoelectronic oscillator based on a microwave multiplexer: feasibility assessment // *Measurement techniques*. — 2025. — Vol. 67, No. 11. — Pp. 815–820.]
11. Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G., et al. DMD-based optical pattern recognition using holograms generated with the Hartley transform // *Optics and Lasers in Engineering*. — 2023. — Vol. 166. — Pp. 107584.
12. Kozlov A.V., Rodin V.G., Cheremkhin P.A., et al. Estimation of camera's noise by uniform target segmentation // *IEEE Sensors Journal*. — 2023. — Vol. 23, No. 5. — Pp. 4883-4891.
13. Ovchinnikov A.S., Krasnov V.V., Cheremkhin P.A., et al. What Binarization Method Is the Best for Amplitude Inline Fresnel Holograms Synthesized for Divergent Beams Using the Direct Search with Random Trajectory Technique? // *Journal of Imaging*. — 2023. — Vol. 9, No. 2. — Pp. 28.
14. Minikhanov T.Z., Zlokazov E.Yu., Cheremkhin P.A., et al. Computer-generated holography methods for data page reconstruction using phase-only medium // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13, No. 7. — Pp. 4479.
15. Svistunov A.S., Rymov D.A., Cheremkhin P.A., et al. HoloForkNet: digital hologram reconstruction via multi-branch neural network // *Applied Sciences*. — 2023. — Vol. 13, No. 10. — Pp. 6125.

16. Рымов Д.А., Шифрина А.В., Черёмхин П.А. и др. Голографическое кодирование цветного видеопотока формата 4К с помощью фазовых жидкокристаллических модуляторов света // Измерительная техника. — 2023. № 6. — С. 21-26. [Rymov D.A., Shifrina A.V., Cheremkhin P.A., et al. Holographic Encryption of Color Video Stream with 4k Resolution Using Phase Liquid Crystal Light Modulators // Measurement techniques. — 2023. — Vol. 66, No. 6. — Pp. 392-397.]
17. Злоказов Е.Ю., Минаева Е.Д., Родин В.Г. и др. Методы синтеза дифракционных оптических элементов: оперативное и качественное формирование трёхмерных объектов из набора плоских сечений // Измерительная техника. — 2023. — № 11. — С. 45-51. [Zlokazov E.Yu., Minaeva E.D., Rodin V.G., et al. Methods of diffractive optical element generation for rapid, high-quality 3D image formation of objects divided into a set of plane layers // Measurement techniques. — 2024. — Vol. 66, No. 11. — Pp. 863–871.]
18. Козлов А.В., Никитин Н.В., Черёмхин П.А. и др. Повышение достоверности идентификации цифровых камер: оптимизация алгоритма сравнения шумовых портретов // Измерительная техника. — 2023. — № 12. — С. 26-34. [Kozlov A.V., Nikitin N.V., Cheremkhin P.A., et al. Improving the reliability of digital camera identification by optimizing the algorithm for comparing noise signatures // Measurement techniques. — 2024. — Vol. 66, No. 12. — Pp. 923–934.]
19. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Iterative synthesis of binary inline Fresnel holograms for high-quality reconstruction in divergent beams with DMD // Optics and Lasers in Engineering. — 2022. — Vol. 150. — Pp. 106859.
20. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Lensless Optical Encryption of Multilevel Digital Data Containers Using Spatially Incoherent Illumination // Applied Sciences. — 2022. — Vol. 12, No. 1. — Pp. 406.
21. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Kurbatova E.A., et al. Adaptive digital hologram binarization method based on local thresholding, block division and error diffusion // Journal of Imaging. — 2022. — Vol. 8, No. 2. — Pp. 15.
22. Евтихийев Н.Н., Родин В.Г., Черёмхин П.А. и др. Адаптивный итеративный метод подбора весовых коэффициентов операции диффузии ошибки для бинаризации цифровых голограмм // Измерительная техника. — 2022. № 6. — С. 41-45. [Evtikhiev N.N., Rodin V.G., Cheremkhin P.A., et al. Adaptive iterative method of selecting weight coefficients for digital hologram binarization using error diffusion // Measurement techniques. — 2022. — Vol. 65, No. 6. — Pp. 432-437.]
23. Рымов Д.А., Черёмхин П.А., Стариков Р.С. Нейросетевая реконструкция сцен с цифровых голограмм на основе извлечения амплитуды и фазы. Оптический журнал. — 2022. — Т.89, № 9. — С. 11-19. [Rymov D.A., Cheremkhin P.A., Starikov R.S. Neural network enabled holographic image reconstruction via amplitude and phase extraction, Journal of Optical Technology. — 2022. — Vol. 89, № 9. — Pp. 511-516.]
24. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Kozlov A.V., et al. An optical-digital method of noise suppression in digital holography // Journal of Optics. — 2022. — Vol. 24, No. 11. — Pp. 115702.
25. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Virtual camera-based analysis of photosensor characterization methods // Procedia Computer Science. — 2022. — Vol. 213. — Pp. 232–239.
26. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Shot noise and fixed-pattern noise effects on digital hologram reconstruction // Optics and Lasers in Engineering. — 2021. — Vol. 139. — Pp. 106461.
27. Евтихийев Н.Н., Козлов А.В., Черёмхин П.А. и др. Метод измерения шумов цифровых камер автоматической сегментацией полосовой сцены // Компьютерная оптика. — 2021. — Т. 45, № 2. — С. 267-276. [Evtikhiev N.N., Kozlov A.V., Cheremkhin P.A., et al. A method for measuring digital camera noise by automatic segmentation of a striped target // Computer Optics. — 2021. — Vol. 45, № 2. — Pp. 267-276.]

28. Евтихий Н.Н., Козлов А.В., Черёмхин П.А. и др. Сравнительный анализ и измерение временных шумов фотосенсоров камер оперативной методикой автоматической сегментации неоднородной сцены и стандартом EMVA 1288 // Измерительная техника. — 2021. — № 4. — С. 28-35. [Evtikhiev N.N., Kozlov A.V., Cheremkhin P.A., et al. Estimation of efficiency of measurement of digital camera photosensor noise by automatic segmentation of non-uniform target method and the standard EMVA 1288 // Measurement techniques. — 2021. — Vol. 64, No. 4. — Pp. 296-304.]
29. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Kurbatova E.A., et al. Comparative analysis of off-axis digital hologram binarization by error diffusion // Journal of Optics. — 2021. — Vol. 23, No. 7. — Pp. 075703.
30. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Lensless optical encryption with speckle-noise suppression and QR codes // Applied Optics. — 2021. — Vol. 60, No. 24. — Pp. 7336-7345.
31. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. New customizable digital data container for optical cryptosystems // Journal of Optics. — 2021. — Vol. 23, No. 11. — Pp. 115701.
32. Небавский В.А., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Методы линеаризации аналоговых оптических трактов // Успехи современной радиоэлектроники. — 2021. Т. 75, № 12. — С. 42–62.
33. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Asymmetric image optical encryption under spatially incoherent illumination // Laser Physics Letters. — 2020. — Vol. 17, No. 2. — Pp. 025204.
34. Авершин А.А., Агеев А.М., Черёмхин П.А. и др. Актуальные вопросы исследований в авионике: теория, обслуживание, разработки. Под ред. Букова В.Н. Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2020.
35. Евтихий Н.Н., Краснов В.В., Черёмхин П.А. и др. Оптическое кодирование QR-кодов в схеме с пространственно-некогерентным освещением на базе двух микрозеркальных модуляторов света // Квантовая электроника. — 2020. — Т. 50, № 2. — С. 195-196. [Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Cheremkhin P.A., et al. QR-code optical encryption in the scheme with spatially incoherent illumination based on two micromirror light modulators // Quantum Electronics. — 2020. — Vol. 50, No. 2. — Pp. 195-196.]
36. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Machine learning methods for digital holography and diffractive optics // Procedia Computer Science. — 2020. — Vol. 169. — Pp. 441-445.
37. Евтихий Н.Н., Краснов В.В., Черёмхин П.А. и др. Применение микрозеркального модулятора света для оптического кодирования с временным интегрированием // Автометрия. — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 34-41. [Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Cheremkhin P.A., et al. Application of a digital micromirror device for optical encryption with time integration // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2020. — Vol. 56, No. 2. — Pp. 134–139.]
38. Курбатова Е.А., Родин В.Г., Черёмхин П.А. Итеративная бинаризация цифровых голограмм с применением метода диффузии ошибки // Автометрия. — 2020. — Т. 56, № 2. — С. 118-125. [Kurbatova E.A., Rodin V.G., Cheremkhin P.A. Iterative binarization of digital holograms using error diffusion method // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. — 2020. — Vol. 56, No. 2. — Pp. 205-211.]
39. Евтихий Н.Н., Злоказов Е.Ю., Черёмхин П.А. и др. Высокоскоростная оперативная реализация голографических и дифракционных элементов с применением микрозеркальных пространственно-временных модуляторов света // Квантовая электроника. — 2020. — Т. 50, № 7. — С. 667-674. [Evtikhiev N.N., Zloказov E.Yu., Cheremkhin P.A., et al. High-speed implementation of holographic and diffraction elements using digital micromirror devices // Quantum Electronics. — 2020. — Vol. 50, No. 7. — Pp. 667-674.]

40. Кулаков М.Н., Родин В.Г., Черёмхин П.А. и др. Влияние пространственных потерь сигнала, регистрируемого однопиксельным детектором, на качество восстановления изображений объектов // Известия вузов. Радиофизика. — 2020. — Т. 63, № 8. — С. 644-655. [Kulakov M.N., Rodin V.G., Cheremkhin P.A., et al. Influence of Spatial Losses of the Signal Detected by a Single-Pixel Detector on the Quality of Object Image Reconstruction // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2021. — Vol. 63, No. 8. — Pp. 582-591.]
41. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. Wavelet compression of off-axis digital holograms using real/imaginary and amplitude/phase parts // Scientific Reports. — 2019. — Vol. 9. — Pp. 7561.
42. 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. — 2019. — Vol. 115. — Pp. 119-130.
43. Cheremkhin P.A., Kurbatova E.A. Quality of reconstruction of compressed off-axis digital holograms by frequency filtering and wavelets // Applied Optics. — 2018. — Vol. 57, Issue 1. — Pp. A55-A64.
44. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Digital hologram quality improvement by elimination of imaging sensor noise // Proceedings of SPIE. — 2018. — Vol. 10679. — Pp. 106791Z.
45. Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Molodtsov D.Yu., et al. Recognition of objects radiating with broad spectrum in dispersive holographic correlator // Optics Communications. — 2018. — Vol. 421. — Pp. 73-78.
46. Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G., et al. QR code optical encryption using spatially incoherent illumination // Laser Physics Letters. — 2017. — Vol. 14, No. 2. — Pp. 026202.
47. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Accurate estimation of camera shot noise in the real-time // Proceedings of SPIE. — 2017. — Vol. 10433. — Pp. 104330I.
48. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Черёмхин П.А. и др. Применение дополнительных входных амплитудных масок в системах оптического кодирования с пространственно-некогерентным освещением // Компьютерная оптика. — 2017. — Т. 41, № 3. — С. 391-398. [Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Cheremkhin P.A., et al. Application of additional input amplitude masks in schemes of optical image encryption with spatially incoherent illumination // Computer Optics. — 2017. — Vol. 41, №3. — Pp. 391-398.]
49. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Fast measurement of temporal noise of digital camera's photosensors // Proceedings of SPIE. — 2015. — Vol. 9648. — Pp. 96480R.
50. Краснов В.В., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. и др. Оптическое кодирование массивов двоичных чисел в пространственно-некогерентном свете // Известия вузов. Физика. — 2015. — Т.58, № 10. — С. 29-36. [Krasnov V.V., Starikov S.N., Cheremkhin P.A., et al. Optical encryption of arrays of binary digits in spatially incoherent light // Russian Physics Journal. — 2016. — Vol. 58, Issue 10. — Pp. 1394-1401.]
51. Закареева А.Р., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Моделирование влияния шумов фотосенсоров камер на качество восстановления изображений с цифровых голограмм Фурье // Известия вузов. Физика. — 2015. — Т.58, № 11-3. — С. 172-174. [Zakareeva A.R., Starikov S.N., Cheremkhin P.A. Modelling of effect of camera's photosensor noise on quality of reconstructed images from digital Fourier holograms // Russian Physics Journal. — 2016. — Vol. 58, Issue 11-3. — Pp. 172-174.]
52. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., et al. Increasing signal-to-noise ratio of reconstructed digital holograms by using light spatial noise portrait of camera's photosensor // Proceedings of SPIE. — 2015. — Vol. 9406. — Pp. 94060O.
53. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Starikov S.N., et al. Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of non-uniform target, its accuracy estimation and application to cameras of different types // Optical Engineering. — 2014. — Vol. 53, No. 10. — Pp. 102107.
54. Родин В.Г., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. и др. Сравнение характеристик голограмм для некогерентных корреляторов, синтезированных с использованием преобразований

- Фурье и Хартли // Вестник Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ». — 2014. — Т. 3, № 4. — С. 501-509.
55. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. и др. Оценка дифракционной эффективности и качества изображений при оптическом восстановлении цифровых голограмм Френеля // Известия вузов. Радиофизика. — 2014. — Т.57, № 8-9. — С. 711-727. [Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheremkhin P.A., et al. Evaluation of diffraction efficiency and image quality in optical reconstruction of digital Fresnel holograms // Radiophysics and Quantum Electronics. — 2015. — Vol. 57, No. 8-9. — Pp. 635-649.]
56. Starikov S.N., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., et al. 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. — Vol. 73. — Pp. 264–268.
57. Черёмхин П.А. Влияние характеристик фотосенсоров на качество восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля // Известия Самарского научного центра РАН. — 2013. №6. — С.131-134.
58. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Оценка влияния динамического диапазона и шумов регистрирующих камер на качество цифровых голограмм // Оптический журнал. — 2013. — Т.80, № 5. — С. 53-64. [Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheremkhin P.A. Estimating how the dynamic range and noise of the recording cameras affect the quality of digital holograms // Journal of Optical Technology. — 2013. — Vol. 80, № 5. — Pp. 301-308.]
59. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. и др. Получение портрета световых пространственных шумов фотосенсора камеры для идентификации цифровых камер и увеличения отношения сигнал/шум при регистрации изображений // Научно-технические технологии. — 2013. — № 7. — С. 55-64.
60. Лесничий В.В., Петров Н.В., Черёмхин П.А. Методика измерения спектральных характеристик матричных приемников любительских и профессиональных фотокамер и их применение для задач цифровой голографии // Оптика и спектроскопия. — 2013. — Т. 115, № 4. — С. 633-643. [Lesnichii V.V., Petrov N.V., Cheremkhin P.A. A technique of measuring spectral characteristics of detector arrays in amateur and professional photocaleras and their application for problems of digital holography // Optics and Spectroscopy. — 2013. — Vol. 115, Issue 4. — Pp. 557-566.]
61. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Черёмхин П.А. и др. Увеличение отношения сигнал/шум за счёт пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2012. — №4. — С.122-136.
62. Стариков С.Н., Черёмхин П.А., Краснов В.В. Запись и численное восстановление цифровых голограмм Френеля // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2011. — №4. — С.113-123.
63. Краснов В.В., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Оптическое кодирование изображений с временным интегрированием с использованием коммерческой фотокамеры и жидкокристаллического монитора // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». — 2011. — №4. — С.124-134.