

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

На правах рукописи

Родин Владислав Геннадьевич

ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ
С СИНТЕЗОМ ИМПУЛЬСНОГО ОТКЛИКА
ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ
В ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕКОГЕРЕНТНОМ
И НЕМОНОХРОМАТИЧЕСКОМ ИЗЛУЧЕНИИ

01.04.05 - оптика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Автор :

Родин

Москва, 2022 г.

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете «МИФИ»

Научный консультант: Евтихий Николай Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой лазерной физики Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

Официальные оппоненты:

Ромашко Роман Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент РАН, директор Института автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН

Вениаминов Андрей Викторович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Центра «Информационные оптические технологии» Национального исследовательского университета ИТМО

Компанец Игорь Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор, высококвалифицированный главный научный сотрудник лаборатории оптоэлектронных процессоров Физического института имени П.Н. Лебедева РАН

Криштоп Виктор Владимирович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Научно-исследовательского института радиофотоники и оптоэлектроники Пермской Научно-производственной приборостроительной компании

Защита состоится 5 октября 2022 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета МИФИ.01.04 федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» по адресу 115409, г. Москва, Каширское шоссе 31, тел. 8(499) 324-84-98.

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

Автореферат разослан «___» _____ 2022 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета МИФИ.01.04.

кандидат физико-математических наук

Краснов В.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

В фотонике и информационной оптике одной из важнейших научных задач является получение световых распределений с заданными характеристиками в процессе их формирования, распространения и взаимодействия с различными средами. В качестве информационных параметров таких объектов могут выступать амплитуда, фаза, длина волны, поляризация, степень когерентности излучения независимо друг от друга или во взаимосвязи. Использование оптических устройств при построении систем обработки информации во многом обусловлено принципиальной возможностью достижения чрезвычайно высоких скоростей обработки информации и обеспечению параллелизма выполняемых операций.

Важнейшей особенностью новейших систем, отвечающей современным формам представления информации, является увеличение числа информационных параметров, используемых для анализа поступающих данных. При этом помимо решения прямых задач, заключающихся в исследовании процесса распространения излучения в различных средах, особый интерес на практике представляют обратные задачи, связанные с нахождением характеристик объектов по параметрам регистрируемых световых полей, в частности по корреляционным функциям.

Оптические корреляторы уже давно утвердились в качестве устройств, перспективность и конкурентоспособность которых не вызывает сомнений. Особое значение их применению придаёт возможность оперативного ввода информации при помощи пространственно-временных модуляторов света. В основе функционирования корреляторов лежит принцип пространственной фильтрации, позволяющий среди вводимой информации выделять объекты с заданными характеристиками. Этот же принцип используется и при построении систем для задач оптического кодирования. В качестве фильтров могут использоваться как голограммы, так и киноформы с заранее синтезированными импульсными откликами. Задача синтеза импульсных откликов таких фильтров во многом решена для систем, использующих когерентное монохроматическое излучение. Однако это накладывает строгие требования на процессы обработки информации из-за необходимости обеспечения точности юстировки и устранения фазовых шумов оптических элементов, создания высококачественных устройств ввода информации в установку коррелятора, что значительно ограничивает применение таких систем.

Часть этих ограничений была снята за счёт использования в корреляторах квазимонохроматического пространственно-некогерентного излучения, однако задача осуществления корреляционного анализа в реальном масштабе времени непосредственно в излучении распознаваемых объектов в полной мере не была решена. В этом случае осуществлялась операция монохроматизации излучения, что приводило к необходимости введения дополнительных элементов в оптическую схему коррелятора, направленных на компенсацию возникающих хроматических эффектов и проведение дальнейших операций в квазимонохроматическом свете. При таком подходе при корреляционном анализе в качестве информационных используются только пространственные характеристики объекта.

Спектральный состав излучения объектов также является важной информационной характеристикой, и существует множество устройств его регистрации. Эти устройства дают сведения об общем составе регистрируемого излучения безотносительно места расположения источников излучения. Задача распознавания эмиссионных спектров излучения корреляционным методом решалась, либо сравнением зарегистрированных спектрограмм в корреляторах с квазимонохроматическим освещением, либо путем преобразования оптического сигнала в электрический с дальнейшей его обработкой в электронном тракте. Задача корреляционного анализа пространственных объектов, в полной мере учитывающая особенности как их формы и расположения, так и спектрального состава излучения, исходящего от этих объектов в реальном масштабе времени, не была решена.

Цель работы

Целью данного исследования были разработка принципов построения и функционирования и осуществление экспериментальных реализаций оптических систем с синтезом импульсных откликов при использовании пространственных и спектральных характеристик объектов в качестве информационных параметров для распознавания и кодирования изображений в некогерентном излучении различного спектрального состава в реальном масштабе времени.

В соответствии с поставленной целью в настоящей работе проводилось:

- теоретическое и экспериментальное исследование возможностей использования спектральных характеристик объектов в качестве информационных параметров при построении голографических корреляторов;
- разработка методики синтеза импульсных откликов фильтров с учётом пространственных и спектральных характеристик объектов для их применения в некогерентных корреляторах;

- анализ схемотехнических решений и экспериментальное исследование возможностей построения корреляторов для решения задач распознавания объектов по их пространственным и спектральным характеристикам в некогерентном излучении различного спектрального состава;
- теоретическое и экспериментальное исследование возможностей построения некогерентных систем оптического кодирования с использованием синтезированных голограмм и киноформов;
- экспериментальная реализация голографических корреляторов и проведение операций распознавания изображений объектов по их пространственным и спектральным характеристикам в некогерентном излучении различного спектрального состава;
- теоретическое и экспериментальное исследование влияния различных эксплуатационных факторов на функциональные возможности и предельные характеристики разработанных некогерентных оптических систем.

Научная новизна

1. Впервые проведён теоретический анализ возможностей получения корреляционных сигналов распознавания в некогерентном излучении различного спектрального состава и получены аналитические соотношения, описывающие процесс формирования корреляционного сигнала при использовании в качестве информационных параметров пространственных и спектральных характеристик объектов.

2. Впервые разработана методика формирования импульсных откликов голографических фильтров, одновременно учитывающая пространственные и спектральные характеристики объектов, для применения в некогерентных корреляторах.

3. Впервые экспериментально реализован ряд схем некогерентных корреляторов и осуществлено получение корреляционных сигналов по комплексу пространственных и спектральных характеристик объектов при некогерентном входном излучении различного спектрального состава.

4. Впервые получены соотношения, описывающие процесс формирования сигналов распознавания при использовании в оптических корреляторах в качестве фильтров вместо голограмм, рассчитанных с использованием преобразования Фурье, голограмм, рассчитанных с использованием преобразования Хартли.

5. Впервые экспериментально реализована оптическая система с кодированием волнового фронта путем регистрации оптической свертки изображения объекта с импульсным откликом фильтра, в качестве которого использован киноформ.

6. Впервые экспериментально реализована схема записи отражательного толстослойного голографического фурье-фильтра в квазимонохроматическом частично-когерентном свете с использованием вогнутого зеркала (получен патент РФ).

7. Впервые экспериментально реализована схема корреляционного спектроанализатора с протяженной входной маской, позволяющей исключить процедуру сканирования по поверхности источника оптического излучения (получен патент РФ).

8. Впервые осуществлена динамическая идентификация объектов в некогерентном корреляторе на основе быстродействующего микрозеркального модулятора.

Теоретическая и практическая ценность работы

Теоретическая значимость полученных результатов заключается в установлении условий формирования локализованных сигналов распознавания в некогерентных корреляторах при использовании в качестве информационных параметров пространственных и спектральных характеристик объектов, а также в разработке методологии синтеза импульсных откликов голографических фильтров для использования в задачах корреляционного анализа объектов при немонахроматическом освещении.

Полученные результаты проведённых исследований и разработанных корреляторов показывают возможность:

- осуществления параллельной обработки информации с большим числом каналов за счет применения толстослойных голограмм в качестве устройств памяти;
- создания надежных некогерентных оптических устройств для решения задач пространственного позиционирования объектов за счет формирования локализованных окрашенных корреляционных сигналов;
- создания систем формирования излучения с заданным спектральным составом для применения в качестве, как составной части систем оптического кодирования, так и самостоятельных устройств для анализа эмиссионных спектров протяженных источников излучения;
- повышения быстродействия оптических систем кодирования и распознавания за счет применения микрозеркальных модуляторов с возможностью осуществления сотни тысяч операций в секунду.

Результаты диссертации использовались при выполнении научных исследований в рамках грантов РНФ и РФФИ, Государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ. Часть исследований выполнена в рамках договоров с ведомственными организациями. Результаты работы внедрены в учебный процесс в НИЯУ МИФИ и

используются в лекционных курсах и практикумах при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Фотоника и оптоинформатика».

Достоверность научных результатов

Достоверность научных результатов подтверждается отличным совпадением результатов аналитического исследования формирования локализованных корреляционных сигналов по комплексу пространственных и спектральных характеристик объектов при некогерентном входном излучении различного спектрального состава с результатами, полученными при оптических экспериментах, используя различные схемотехнические решения.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Добавление спектральных характеристик излучения распознаваемого объекта в качестве информативных признаков при задании импульсных откликов фильтров расширяет возможности осуществления корреляционного различения объектов в немонахроматическом излучении в реальном масштабе времени без использования дополнительных устройств.

2. Использование в качестве импульсного отклика голографического фильтра обобщённого пространственного образа объекта с учётом как его пространственных, так и спектральных характеристик, позволяет формировать локализованные корреляционные сигналы, подтверждающие идентификацию объекта в немонахроматическом излучении.

3. Применение отражательной толстослойной фурье-голограммы в качестве пространственного фильтра и спектрального селектора позволяет осуществлять распознавание двумерных изображений в некогерентном корреляторе при полихроматическом входном излучении.

4. Число отсчетов, отводящихся на опорный объект на расчётном поле при синтезе голограммы, определяется продольным размером объекта во входной плоскости коррелятора, длиной волны излучения, параметрами устройства отображения голограмм и геометрическими параметрами схемы коррелятора.

5. Использование синтезируемого киноформа в качестве фильтра пространственных частот в оптико-цифровой отображающей системе позволяет осуществлять операции оптического кодирования и оптического распознавания в некогерентном свете.

6. Применение микрозеркального модулятора для оперативного вывода голографических фильтров позволяет повысить быстродействие при динамической

идентификации объектов в некогерентном оптическом корреляторе, определяемое временем смены отображаемых модулятором фильтров.

Данные положения определяют методы создания оптических систем с синтезом импульсного отклика, позволяющие осуществлять операции обработки и преобразования информации как в пространственно-некогерентном, так и в некогерентном излучении при использовании в качестве информационных параметров пространственных и спектральных характеристик объектов.

Вклад автора

Изложенные в работе теоретические исследования проведены автором лично, экспериментальные результаты получены автором лично или при его значительном участии.

Апробация работы

Материалы, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались на II Всесоюзной конференции по оптической обработке информации (Фрунзе, 1990), I, II и III Международных конференциях "Optical Information Processing" (Санкт-Петербург, 1993 и 1996, Москва и Суздаль, 1999), I и II конференциях «Проблемы фундаментальной физики» (Саратов, 1996 и 2000), XXV школе-симпозиуме по когерентной оптике и голографии (Ярославль, 1997), VIII, XV, XVII, XVIII и XX Международных симпозиумах "SPIE Defense and Security: Optical Pattern Recognition" (Флорида, США, 1997, 2004, 2006, 2007, 2009), XXIII Международной конференции "High-speed Photography and Photonics" (Москва, 1998), Международных конференциях "Lasers, Applications, and Technologies" (Москва, 2002, Санкт-Петербург, 2005), Международной конференции "Holography'2005" (Варна, 2005), XV Научно-технической конференции "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение" (Москва, 2005), VI, VII, IX, XI и XV Международных конференциях "Fundamental Problems of Optoelectronics and Microelectronics" (Харбин, 2006, Владивосток, 2007 и 2009, Москва и Самара, 2011, Хабаровск, 2016), XLIII Всероссийской научной конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, 2007), XXVI школе по когерентной оптике и голографии (Иркутск, 2008), VI Международной конференции "Optoinformatics'08" (Санкт-Петербург, 2008), 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14 и 15 Международных форумах и конференциях "HOLOEXPO" (Москва, 2004, 2005, 2006, 2007, Санкт-Петербург, 2008, Киев, 2009, Москва, 2010, Минск, 2011, Суздаль, 2012, Москва, 2013, Ярославль, 2016, Звенигород, 2017, Нижний Новгород, 2018, Стрельна, 2019, Москва, 2020), Международных

конференциях «Фундаментальные проблемы оптики» (Санкт-Петербург, 2006, 2008, 2010, 2012, 2014, 2016, 2018), I Международной научной школе "Методы цифровой обработки изображений в оптике и фотонике" (Санкт-Петербург, 2014), Международной конференции "SPIE Optics + Optoelectronics: Holography: Advances and Modern Trends IV" (Прага, 2015), Международной конференции "SPIE Photonics Europe: Optical Modelling and Design IV" (Брюссель, 2016), Международной конференции "OSA Digital Holography and 3-D Imaging" (Бордо, 2018), Международной конференции "SPIE Practical Holography XXXIV: Displays, Materials, and Applications" (2020), Международной конференции "SPIE Emerging Digital Micromirror Device Based Systems and Applications XIII" (2021), IV, V, VI, VII и VIII, IX, X, XI Международных конференциях по фотонике и информационной оптике (Москва, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021, 2022) и Научных сессиях НИЯУ МИФИ (тематические секции и конференции по фотонике и информационной оптике), а также на научных семинарах в НИЯУ МИФИ.

Основные результаты исследований опубликованы в отечественной и зарубежной печати в 132 работах, из них 18 статей в рецензируемых журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus или входящих в список ВАК, 24 публикации в других изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus, 2 патента РФ и 88 публикаций в сборниках трудов и тезисов конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 292 страницах, включает 168 рисунков и список литературы из 392 наименований.

Содержание работы

В первой главе проведён обзор литературы по тематике работы, рассмотрены принципы построения систем обработки и преобразования информации, отмечены основные направления развития таких систем. Рассмотрены различные схемы голографических корреляторов, используемые для распознавания изображений, в том числе в реальном масштабе времени. В результате проведённого обзора установлено, что большинство используемых корреляторов позволяют успешно выполнять распознавание объектов лишь при квазимонохроматическом входном излучении. Использование немонахроматического излучения в корреляторах, построенных по «4f-схеме», приводит к необходимости введения

дополнительных элементов в оптическую схему коррелятора, направленных на компенсацию возникающих хроматических эффектов. Использование корреляторов совместного преобразования предъявляет дополнительные требования к изготовлению голограмм, при этом, как и в случае с корреляторами, построенными по «4f-схеме», в качестве информационных параметров в них используются только пространственные характеристики распознаваемых объектов, информационная составляющая спектра освещающего излучения при этом не рассматривается. При распознавании изображений рассматривалась возможность применения цветовых характеристик в качестве дополнительного информационного канала, однако при этом цвета распознаваемых изображений представлялись, как правило, в виде комбинации трёх основных цветов, для этого использовалось когерентное излучение нескольких лазеров.

Проведённый в работе анализ голографических корреляторов позволяет сделать вывод, что корреляторы ориентированы на распознавание объектов только по пространственным характеристикам, используя их монохромные или цветные изображения, и не используют спектр исходящего от объекта излучения в качестве информационного параметра. В настоящее время имеется ряд практических задач, в которых идентификация того или иного объекта в равной степени определяется как его формой, так и спектром его излучения. Для решения подобных задач в настоящий момент необходимо использовать как минимум несколько самостоятельных устройств, например, оптический коррелятор и спектроанализатор, при этом необходимо разрабатывать методы и алгоритмы их совместной работы. Задача распознавания эмиссионных спектров излучения корреляционным методом решалась, либо сравнением зарегистрированных спектрограмм в корреляторах с квазимонохроматическим освещением, либо путем преобразования оптического сигнала в электрический, с дальнейшей его обработкой в электронном тракте.

Использование же спектральных характеристик излучения распознаваемого объекта в качестве информативных признаков даёт дополнительные возможности в задачах оптического распознавания. Возможность оптического распознавания объектов с использованием непосредственно излучения, создаваемого или рассеиваемого объектами, исключает необходимость переноса изображений этих объектов с помощью пространственно-временных модуляторов света (ПВМС), что обеспечивает повышение оперативности обработки и снижает массогабаритные и стоимостные характеристики системы. Так как в таких корреляторах световые корреляционные сигналы распознавания формируются собственно излучением анализируемого объекта при его взаимодействии с пространственным фильтром-памятью, они получили название — дисперсионные корреляторы.

Рассмотрены процессы формирования корреляционных сигналов в немонохроматическом излучении, получены математические соотношения, показывающие зависимость интенсивности в выходной плоскости коррелятора от спектральных частот излучения, исходящих от распознаваемого объекта.

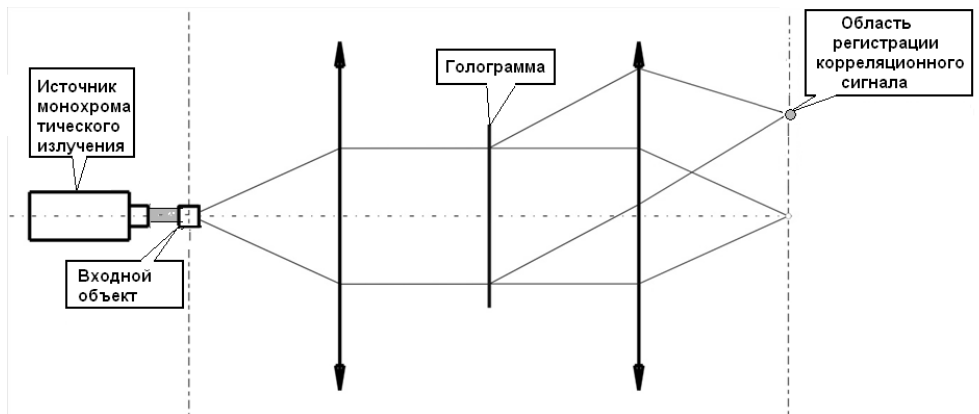


Рис. 1. Принципиальная схема голографического 4f-коррелятора

В выходной плоскости некогерентного голографического коррелятора (рис. 1) при монохроматическом входном освещении формируется следующее распределение интенсивности (рис. 2а)

$$I(x_1, y_1) = K \iint I_{ВХ}(x, y) I_{ОП}(x - x_1, y - y_1) dx dy, \quad (1)$$

где $I_{ВХ}(x, y)$ – распределение интенсивности по изображению входного объекта в выходной плоскости коррелятора, $I_{ОП}(x_0, y_0)$ – импульсный отклик голографического фурье-фильтра, пропорциональный нормированному на единицу распределению интенсивности по изображению опорного объекта, K – постоянный коэффициент пропорциональности.

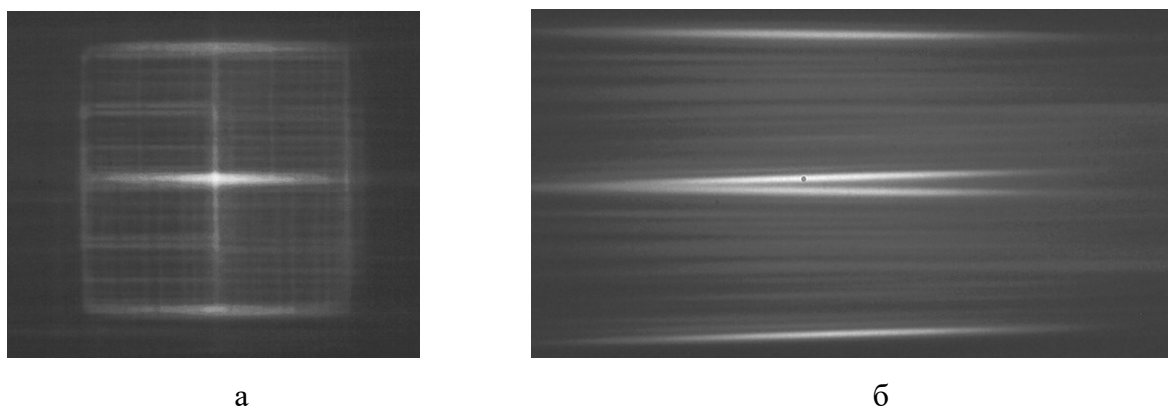


Рис. 2. Вид корреляционного сигнала в монохроматическом (а) и немонохроматическом (б) свете

При немонахроматическом входном излучении в выходной плоскости такого коррелятора будет формироваться распределение интенсивности, представляющее собой сумму откликов на каждой из спектральных компонент, присутствующих в спектре излучения объекта. При этом зависимость протяжённости импульсного отклика голографического фильтра от частоты излучения приведёт к тому, что корреляционное распределение интенсивности на каждой из частот будет представлять собой корреляцию разномасштабных объектов, кроме того, центры корреляционных максимумов на каждой из частот будут пространственно локализованы в разных точках выходной плоскости (рис. 2б)

$$I(x_1, y_1) = K_1 \iiint I_{BX}(x, y, \nu) I_{OP}((x-x_1)\nu/\nu_0, (y-y_1)\nu/\nu_0) dx dy d\nu, \quad (2)$$

где $\nu = c/\lambda$ – частоты входного излучения, $\nu_0 = c/\lambda_0$ – частота излучения при записи голографического фурье-фильтра, $K_1 = K/\nu_0$ – постоянный коэффициент пропорциональности.

В работе были проанализированы условия, при которых возможна успешная идентификация объектов, как по спектральным, так и по совокупности пространственных и спектральных параметров, в подобных корреляторах в реальном масштабе времени. Получено, что для этого необходимо добиться локализации корреляционных сигналов для тех спектральных компонент входного излучения, информация о которых записана на голографическом фильтре; кроме того, центры корреляционных сигналов для всех спектральных компонент излучения, совпадающих с компонентами опорного спектра, должны находиться в единой точке выходной плоскости.

Выполнение этих условий возможно при изготовлении голографического фильтра, импульсный отклик такого фильтра должен представлять обобщенный пространственный образ объекта, содержащий информацию, как о пространственной структуре объекта, так и о спектре излучения объекта. Комплексная амплитуда импульсного отклика фильтра задаётся следующим образом:

$$h(x, y) = \sum_{\nu'} C_{\nu'}^{1/2} \cdot t(x \cdot \nu_0/\nu' - b_x, y \cdot \nu_0/\nu' - b_y), \quad (3)$$

где $t(x, y) = I_{OP}(x, y)^{1/2} \exp(i\varphi(x, y))$ – комплексная нормированная амплитуда опорного объекта, $\varphi(x, y)$ – случайная фаза, ν' – частота опорного спектра, $C_{\nu'}$ – нормированная на единицу спектральная плотность излучения с частотой ν' в спектре мощности опорного излучения, ν_0 – частота излучения при записи голографического фильтра, (b_x, b_y) – координаты в

выходной плоскости коррелятора, где будет происходить формирование корреляционных максимумов на каждой из распознаваемых спектральных компонент. Такой голографический фильтр может быть записан как оптическим излучением по одной из схем записи фурье-голограмм, так и синтезирован на компьютере.

Была разработана методика формирования обобщенного образа объекта, используемая при изготовлении голографических фильтров с последующим применением в дисперсионных корреляторах, с одновременным учётом как пространственных, так и спектральных характеристик распознаваемых объектов. Этот образ представляет собой несколько разномасштабных копий изображения опорного объекта, при этом количество копий определяется числом компонент в опорном спектре излучения. Размеры копий объекта и их расположение относительно выбранного начала координат обратно пропорциональны отношениям длин волн в спектре излучения опорного объекта. В качестве примера для опорного объекта – контура квадрата (рис. 3а) и спектра ртутной лампы (рис. 3б) на рис. 3в представлено изображение обобщённого образа этого опорного объекта. Были рассмотрены возможности отображения информации об обобщенном образе объекта при изготовлении голографических фильтров.

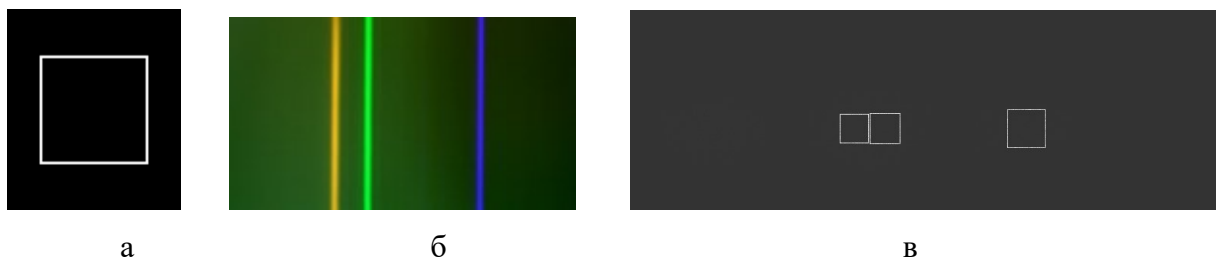


Рис. 3. Вид опорного объекта (а), спектра излучения (б) и обобщённого образа опорного объекта (в)

Получено, что при использовании в качестве фильтра пространственных частот фурье-голограммы с записанным на ней обобщённым пространственным образом опорного объекта результирующий корреляционный сигнал на выходе дисперсионного коррелятора является суммой корреляционных сигналов, образованных каждой из компонент излучения входного распознаваемого объекта:

$$I(x_1, y_1) = K_1 \sum_v C_v \iiint I_{\text{ВХ}}(x, y, v) I_{\text{ОП}}((x-x_1)v/v' - b_x, (y-y_1)v/v' - b_y) dx dy dv. \quad (4)$$

При совпадении одной или нескольких частот освещающего спектра с частотами опорного спектра на этих частотах будут наблюдаться корреляционные распределения

интенсивности по пространственным параметрам без искажения масштаба с локализацией в координатах (b_x, b_y) .

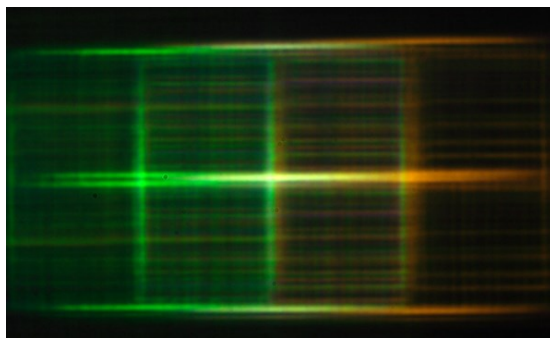
$$I(x_1, y_1) = K_1 \sum_{v'} C_{v'} \iint I_{\text{ВХ}}(x, y, v') I_{\text{ОП}}(x - x_1 - b_x, y - y_1 - b_y) dx dy. \quad (5)$$

При совпадении пространственных параметров входного и опорного объектов будет наблюдаться глобальный максимум корреляционного распределения по пространственным параметрам, интенсивность которого равна I_b . Спектр излучения в (b_x, b_y) складывается из совокупности совпадающих спектральных компонент входного и опорного спектров, что подтверждает формирование корреляционного сигнала в (b_x, b_y) также и по спектральным параметрам

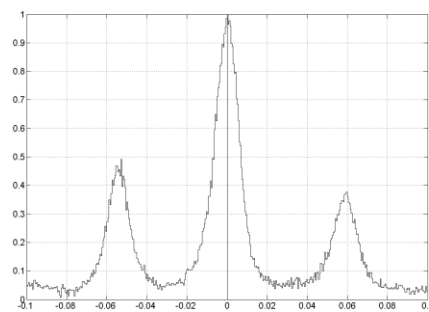
$$I(b_x, b_y) = I_b K_1 \sum_{v'} C_{v'} \int I_{\text{ВХ}}(v) I_{\text{ОП}}(v - v') dv. \quad (6)$$

Таким образом, глобальный максимум величины сигнала будет наблюдаться лишь при полном совпадении, как пространственной формы, так и спектральных компонент излучения распознаваемого и опорного объектов (рис. 4).

Были разработаны несколько схмотехнических реализаций дисперсионных корреляторов, которые в работе были воплощены в виде экспериментальных установок.



а



б

Рис. 4. Вид (а) и профилограмма (б) корреляционного сигнала при совпадении пространственных и спектральных характеристик

Во второй главе представлена экспериментально реализованная в работе схема некогерентного коррелятора, представляющая собой традиционную «4f-схему» (рис. 5). Входной транспарант, освещаемый источником излучения, расположен в передней фокальной плоскости первого фурье-объектива, голографический фильтр помещен в его задней фокальной плоскости. Далее, на фокусном расстоянии, расположен второй фурье-

объектив, в задней фокальной плоскости которого формируется корреляционное распределение, регистрируемое камерой.

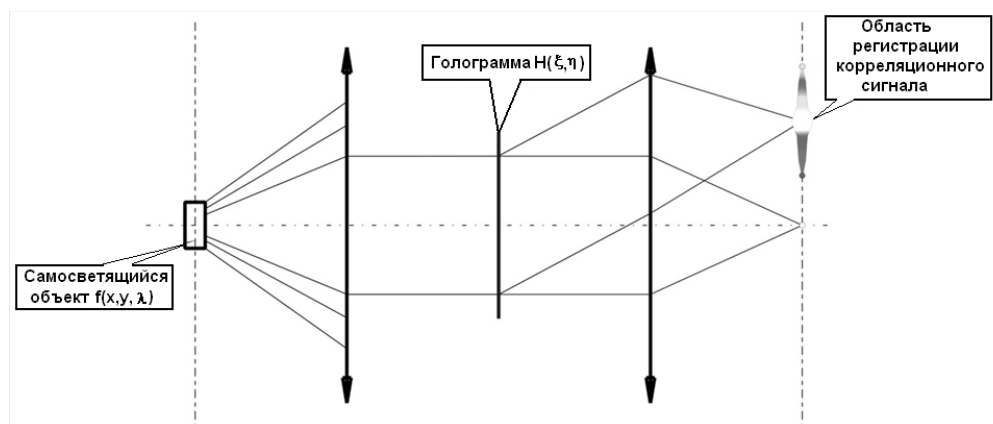


Рис. 5. «4f-схема» дисперсионного голографического коррелятора

На голографический фурье-фильтр записывается информация о пространственной структуре объекта и о спектре излучения, который предполагается использовать в корреляторе. Добиться изготовления фильтров можно следующими методами:

- оптической регистрацией на фурье-голограмму пространственного обобщенного образа объекта, содержащего информацию, как о форме объекта, так и спектре его излучения;
- оптической регистрацией на фурье-голограмму формы опорного объекта по схеме с кодированным опорным пучком, причем кодирующая маска является пространственным аналогом спектра;
- записью нескольких фурье-голограмм объекта в одну фоторегистрирующую среду с возможным использованием различных источников излучения;
- синтезом голограмм на компьютере.

Была экспериментально осуществлена регистрация фурье-голограмм для коррелятора в квазимонохроматическом пространственно-когерентном свете. На голограмму записывался обобщенный пространственный образ опорного объекта, содержащий информацию, как о пространственной структуре объекта, так и о спектре излучения объекта (пример – рис. 3в).

Проведена идентификация распознаваемых объектов в корреляторе с использованием в качестве спектральных параметров различных компонент ртутной лампы. Корреляционный сигнал при совпадении пространственных и спектральных характеристик, состоит из центральной части, где наблюдается автокорреляционный пространственный сигнал, усиленный автокорреляцией по спектру, и боковых сигналов, представляющих собой автокорреляцию по пространственным характеристикам и кросс-корреляцию по спектральным. При несовпадении каких-то пространственных (рис. 6а) либо спектральных

(рис. 6б) характеристик происходила деградация автокорреляционного сигнала. Полученные экспериментальные результаты согласуются с теорией. Рассчитана пропускная способность коррелятора как по пространственным характеристикам, которая составляет 10^6 отсчетов по полю, так и по спектру - около 200 отсчетов.

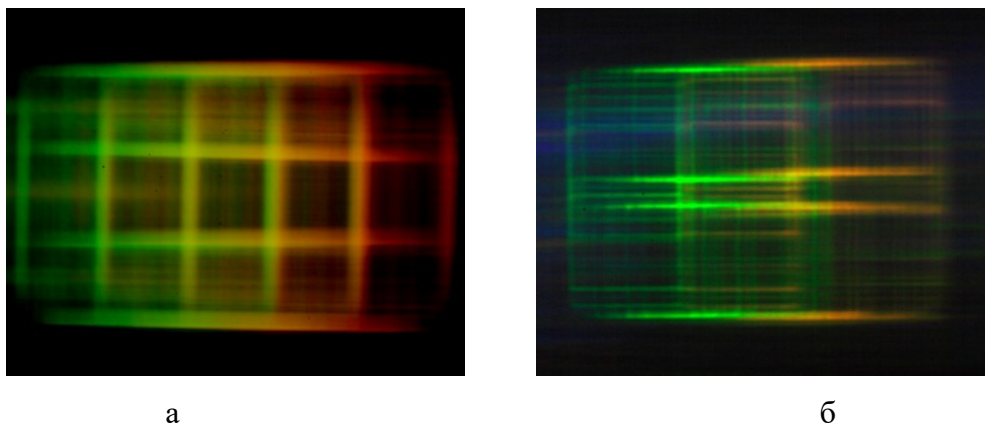


Рис. 6. Вид корреляционного сигнала при несовпадении пространственных (а) и спектральных (б) характеристик

На основе коррелятора предложена и экспериментально реализована схема корреляционного спектроанализатора. В качестве входного объекта использовалась протяженная масштабно-инвариантная маска (рис. 7а), элементом разрешения в выходной плоскости спектроанализатора являлся размер ее локализованного автокорреляционного сигнала. Разрешающая способность устройства – порядка 1 нм. На рис. 7б и 7в в качестве примера приведены изображение выходной плоскости спектроанализатора и спектрограмма для тестового источника излучения – ртутной лампы. Использование такой входной маски позволяет исключить процедуру сканирования по поверхности источника.

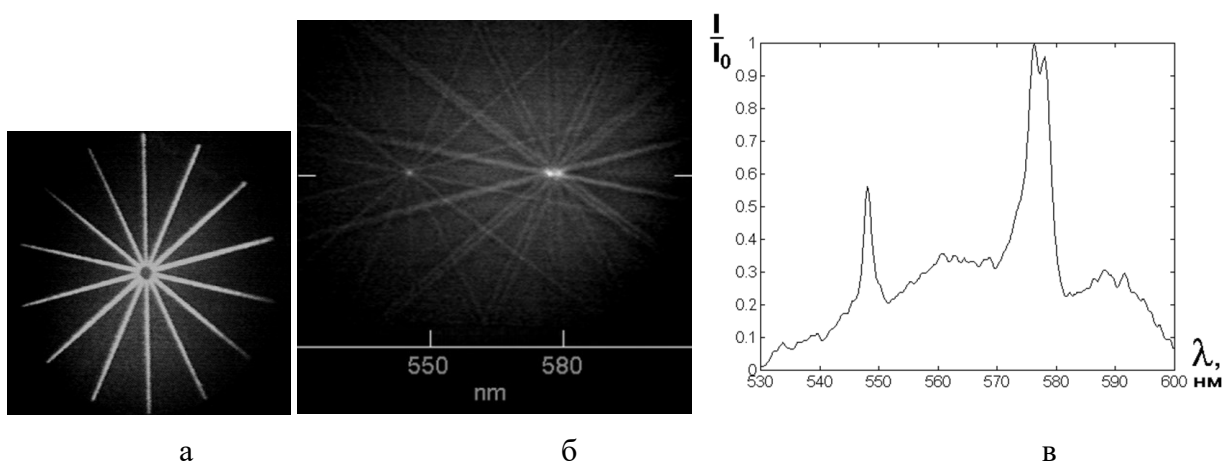


Рис. 7. Вид входной маски (а), выходной плоскости спектроанализатора (б) и профилограмма спектра (в)

Метод компьютерного синтеза голограмм, в отличие от записи голограмм с помощью интерференции объектного и опорного световых пучков, значительно упрощает процесс изготовления голографических фильтров, особенно для дисперсионных корреляторов. В работе была предложена методика синтеза фурье-голограмм для дисперсионного коррелятора, включающая следующие этапы:

- формирование обобщённого пространственного образа, содержащего информацию, как о пространственной форме опорного объекта, так и об опорном спектре излучения;
- расчет расположения обобщённого пространственного образа относительно координат виртуального источника опорной волны;
- генерация случайной фазовой маски для снижения динамического диапазона синтезируемых голограмм;
- расчет светового поля от объекта в плоскости голограммы;
- расчет пропускания синтезированной фурье-голограммы;
- создание графического файла синтезированной голограммы, согласованного с параметрами устройства вывода.

Обобщённый пространственный образ объекта представляет собой несколько разномасштабных копий изображения опорного объекта, при этом количество копий, их положение и размеры определяются этими информативными диапазонами в опорном спектре излучения. Затем эти копии размещаются на расчётном поле голограммы, при этом предполагается, что виртуальный опорный точечный источник располагается в центре расчётного поля. Расстояние от центра расчётного поля до наименьшей копии изображения опорного объекта (соответствующей наибольшей длине волны в опорном спектре) выбирается из условия, что нулевой порядок при восстановлении голограммы, содержащий изображение входного объекта, не должен накладываться на структуру корреляционного сигнала. На рис. 8б приведен вид расчётного поля голограммы для опорного объекта с рис. 8а (контурного изображения рыбы) и спектра с рис. 3б.



Рис. 8. Вид опорного объекта (а) и его размещение на расчётном поле голограммы (б)

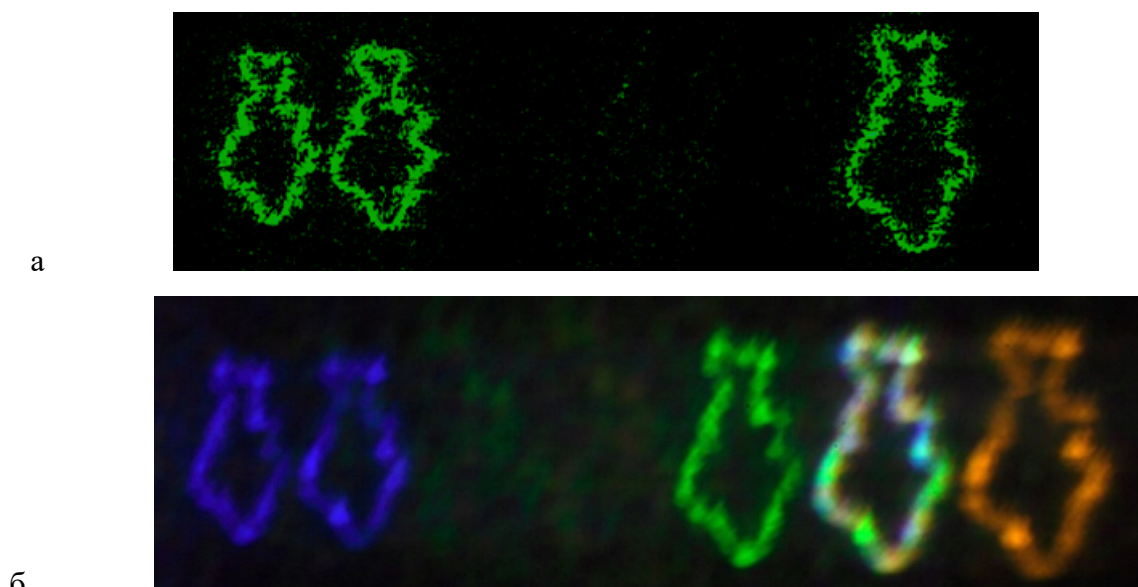


Рис. 9. Вид восстановленного с голограммы изображения при её освещении монохроматическим излучением (а) и ртутной лампой (б)

По предложенной методике был проведён синтез фурье-голограмм, для осуществления вывода синтезированных голограмм на физический носитель (фотопленку) был использован лазерный фотонаборный аппарат с максимальным разрешением 2540 точек/дюйм (минимальный размер отсчета голограммы – 10 мкм). На рис. 9 приведены восстановленные с голограммы изображения при её освещении монохроматическим источником излучения (а) и ртутной лампой (б).

Были проведены эксперименты по идентификации объектов как по спектральным параметрам при различных условиях, так и по комплексу пространственных и спектральных параметров. Получено, что при несовпадении пространственных или спектральных характеристик объектов деградация сигнала происходила не менее чем в 2 раза, при полном несовпадении характеристик – не менее чем в 4,4 раза. Результаты экспериментов (рис. 10а-з) согласуются с результатами, полученными при использовании в качестве фильтров оптически зарегистрированных фурье-голограмм.

В работе исследована применимость голограмм, синтезированных с использованием преобразования Хартли, в качестве фильтров в некогерентных оптических корреляторах. Вычисление преобразования Фурье всегда производится в комплексной плоскости, в том числе и для действительных функций, которыми обычно описываются распознаваемые объекты. Отличительной особенностью преобразования Хартли является тот факт, что образ действительной функции всегда является действительным, в отличие от преобразования Фурье. Поэтому при вычислении преобразования Хартли осуществляется в два раза меньше

операций, чем при вычислении преобразования Фурье, что может оказаться полезным в быстродействующих распознающих системах, в которых требуется оперативный синтез голограмм-фильтров.

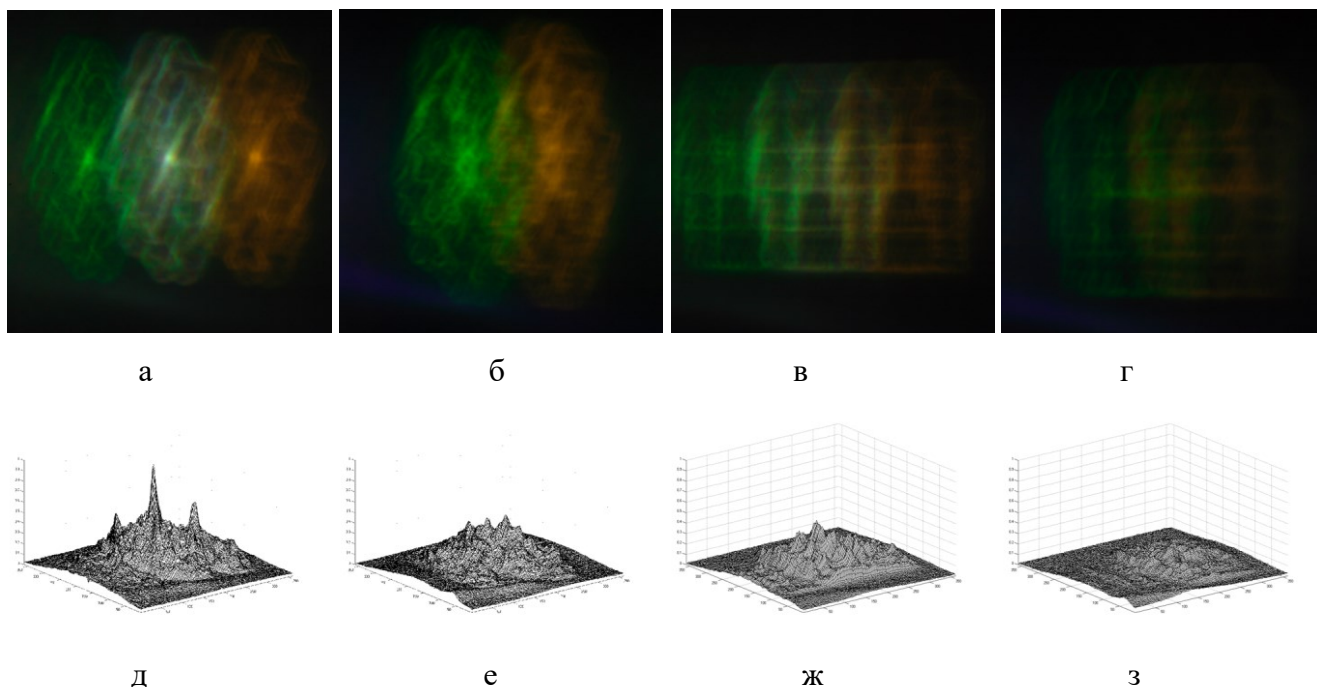


Рис. 10. Виды корреляционного сигнала и распределения интенсивности при совпадении (а, д) и несовпадении (б, в, г, е, ж, з) характеристик

Полученные математические соотношения для импульсных откликов голограмм, синтезированных с применением преобразования Хартли, при осуществлении обратного преобразования Фурье подтвердили корректность применения таких голограмм в оптических корреляторах. Сравнительный анализ таких голограмм с фурье-голограммами показал, что их основные характеристики отличаются не более чем на 6%. Было осуществлено восстановление объектов с бинаризованных голограмм путем их вывода на жидкокристаллический и микрозеркальные пространственно-временные модуляторы света. Визуально подтверждено, что восстановленные изображения с голограмм, синтезированных с применением, как преобразования Фурье, так и преобразования Хартли, не имеют каких-либо существенных различий. Получено, что качество восстанавливаемых бинарными голограммами изображений определяется, прежде всего, степенью заполненности изображений объектов ненулевыми отсчетами. Применение голограмм, синтезированных с использованием преобразования Хартли, в некогерентных оптических корреляторах может повысить быстродействие синтеза голографических фильтров для таких корреляторов примерно в два раза.

В третьей главе описана экспериментальная реализация некогерентного коррелятора, осуществляющая идентификацию объектов в полихроматическом свете, в котором в качестве пространственного фильтра использована отражательная толстослойная Фурье-голограмма. Эта схема (рис. 11) представляет собой модификацию «4f-схемы», учитывая тот факт, что голограмма является отражательной, второй фурье-объектив располагается в плоскости, перпендикулярной распространению отражённого от голографической решётки излучения. Так как такая голограмма осуществляет селекцию излучения по спектру, эту схему коррелятора можно применять также для выделения объектов с заданным спектром в полихроматическом излучении. При освещении фильтра полихроматическим светом изображение, записанное на толстослойной голограмме, будет восстановлено на брэгговской длине волны, причём при смещении объекта во входной плоскости коррелятора, брэгговская длина волны изменится, и сигнал не будет формироваться. Подвергая фильтр повороту, можно добиваться восстановления сигнала, решая, таким образом, задачу пространственного позиционирования спектрально окрашенных объектов.

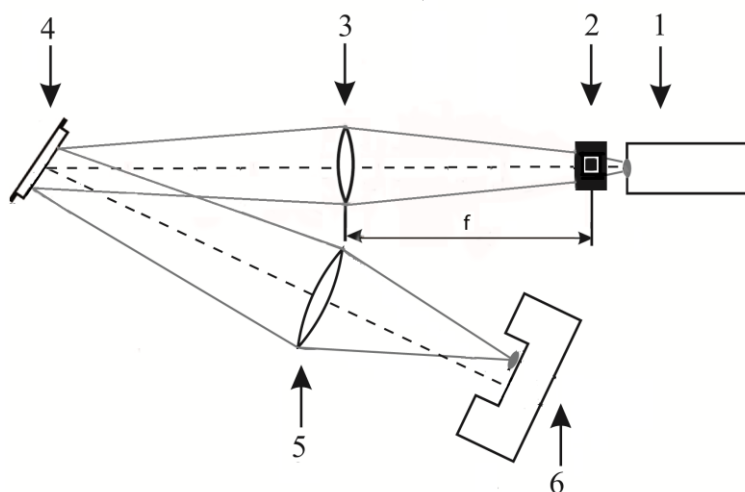


Рис. 11. Схема коррелятора с отражательным толстослойным голографическим фильтром:

- 1 – источник излучения, 2 – транспарант с изображением распознаваемого объекта,
3 – объектив, 4 – голографический фильтр, 5 – объектив, 6 – регистрирующая камера

Для использования в качестве фильтров в работе была осуществлена запись отражательных толстослойных фурье-голограмм во встречных пучках в когерентном свете. Голограммы регистрировались на высокоразрешающих фотопластинках ПФГ-03, для увеличения эффективной площади голограмм использовалась стационарная фазовая маска. Из экспериментов была определена относительная спектральная селективность голограмм равная 70, что соответствует расчётным значениям.

В работе также была предложена и экспериментально реализована схема записи отражательного толстослойного голографического фурье-фильтра в квазимонохроматическом частично-когерентном свете. В этой схеме (рис. 12) объект расположен в передней фокальной плоскости фурье-объектива, а фоторегистрирующая среда в задней фокальной плоскости объектива. Для формирования копии изображения использовалось вогнутое зеркало, расположенное на двойном фокусном расстоянии зеркала от фоторегистрирующей среды. Были проведены эксперименты по записи таких голограмм на высокоразрешающих фотопластинках ПФГ-03 и восстановлению с них изображений. Результаты подтвердили возможность использования записанных по этой схеме голограмм в ситуациях, когда необходимо осуществлять запись фильтра непосредственно в некогерентном излучении, применяемом при распознавании изображений.

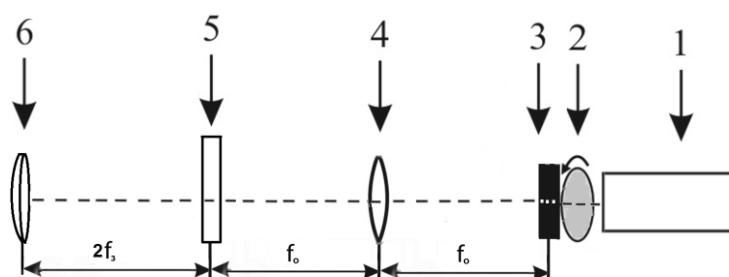


Рис. 12. Схема записи отражательной толстослойной фурье-голограммы в квазимонохроматическом пространственно-некогерентном свете: 1 – источник излучения, 2 – нестационарная фазовая маска, 3 – транспарант с изображением объекта, объектив, 4 – объектив, 5 – фоторегистрирующая среда, 6 – вогнутое зеркало

Проведено исследование инвариантных свойств коррелятора, показано, что для входных объектов различного масштаба в корреляторе возможно распознавание изображения, независимого от его масштаба, а также определение отношения масштабов входного изображения m_0 и изображения, записанного на фильтре. Рассмотрена зависимость пропускной способности коррелятора (максимального числа разрешимых элементов) N от различных параметров, связанных с конструктивными особенностями коррелятора (рис. 13). Получено, что селективность голографического фильтра определяет максимальную величину пропускной способности коррелятора, которая может достигать значения 10^6 отсчетов по полю.

Был проведён корреляционный анализ тестовых изображений в немонохроматическом излучении различных источников света. При корреляционном анализе в квазимонохроматическом пространственно-некогерентном свете в качестве источника излучения использовался лазер, пространственная когерентность излучения

которого нарушалась путём внесения в схему нестационарного фазового рассеивателя. При корреляционном анализе в полихроматическом свете источником излучения являлись ртутная лампа и диапроектор. На рис. 14 приведены корреляционные сигналы при совпадении (а) и несовпадении (б) пространственных характеристик. Сходство корреляционных сигналов, полученных от тех же объектов в квазимонохроматическом и полихроматическом свете и рассчитанных на компьютере, подтверждает применение этой схемы дисперсионного коррелятора в задачах распознавания изображений в излучении немонахроматических источников света.

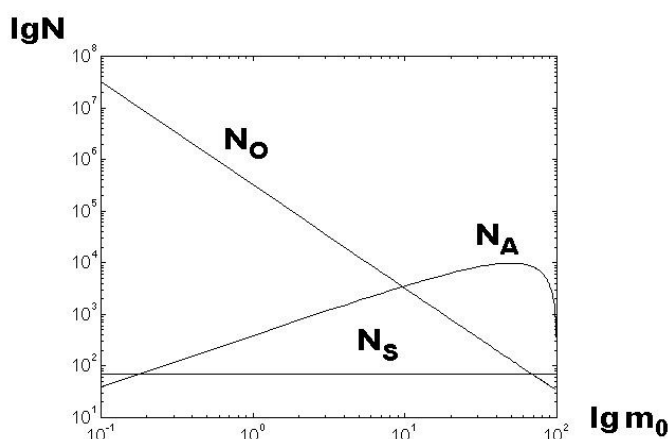


Рис. 13. График зависимости пропускной способности коррелятора:
 N_a – определяется апертурными ограничениями, N_s – селективностью голографического фильтра, N_o – размером объекта (m_0) по отношению к размеру входного поля

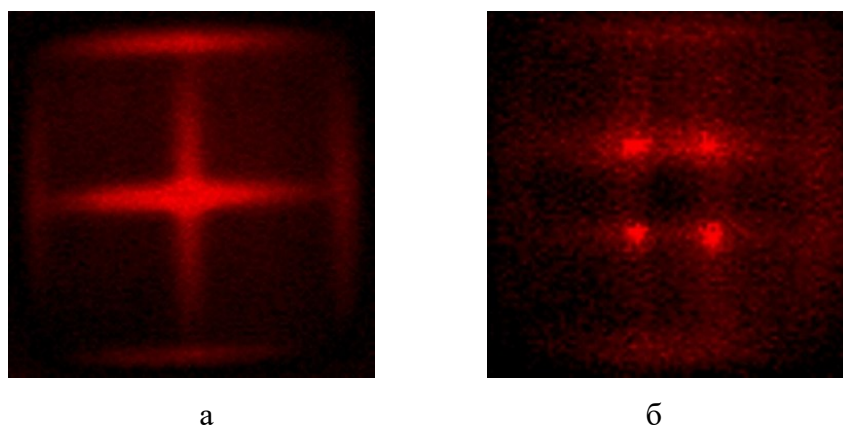


Рис. 14. Вид корреляционного сигнала при совпадении (а) и несовпадении (б) пространственных характеристик

В четвёртой главе рассмотрена возможность построения схемы дисперсионного коррелятора, отличающейся от традиционной «4f-схемы» использованием лишь одного объектива. Этот объектив располагается между входной и частотной плоскостями, в которую

помещается голографический фильтр. В такой схеме (рис. 15) появляется возможность коррекции масштаба опорного объекта в процессе распознавания при изменении геометрических параметров установки. Во входной плоскости коррелятора, отстоящей на расстояние L_1 от объектива с фокусным расстоянием f , располагается самосветящийся распознаваемый объект. Расстояние от Фурье-объектива до плоскости регистрации корреляционного сигнала – L_2 . Расстояние до фурье-фильтра (синтезированная голограмма) отсчитывается от плоскости регистрации сигнала и равно L . Между продольным размером объекта во входной плоскости $X_{вх}$ и размером объекта в выходной плоскости $X_{вых}$ справедливо отношение

$$X_{вых} / X_{вх} = f / (L_1 - f). \quad (7)$$

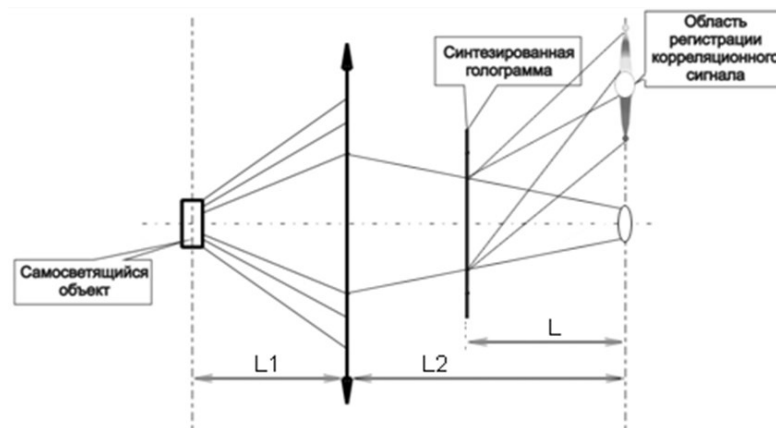


Рис. 15. Однолинзовая схема дисперсионного голографического коррелятора

При синтезе фурье-голограммы для этой схемы коррелятора на расчетное поле голограммы помещается обобщенный пространственный образ опорного объекта, состоящий из нескольких разномасштабных копий изображения опорного объекта. Было получено соотношение, связывающее число отсчетов K , отводящихся на опорный объект на расчётном поле голограммы, с продольным размером объекта во входной плоскости коррелятора, длиной волны восстанавливающего излучения λ , параметрами голограммы (суммарным числом отсчетов на расчетном поле голограммы N , шагом голограммы Δh) и геометрическими параметрами применяемой схемы дисперсионного коррелятора

$$K = N \cdot X \cdot \Delta h \cdot f / [\lambda \cdot L \cdot (L_1 - f)]. \quad (8)$$

Это выражение позволяет определить размер (в отсчётах) каждой копии изображения опорного объекта в обобщённом пространственном образе при синтезе импульсного отклика

голограммы. Из выражения видна обратная пропорциональность K и λ , задающая масштабы и расположения на расчётном поле копий изображения опорного объекта.

Была проведена оценка максимального числа разрешимых элементов в опорном изображении объекта. Определяющими требованиями для этого являются следующие условия регистрации корреляционного сигнала: 1) нулевой порядок в плоскости регистрации корреляционного сигнала, содержащий изображение распознаваемого объекта, не должен перекрывать корреляционный сигнал; 2) высшие порядки дифракции синтезированной голограммы также не должны перекрывать корреляционный сигнал.

Получено, что максимальное количество разрешимых элементов в изображении объекта ($\lambda_{\min}$ и $\lambda_{\max}$ – минимальная и максимальная длины волн в опорном спектре) равно:

$$K_{\max} \leq (\lambda_{\min} / \lambda_{\max}) N/5. \quad (9)$$

Полученное выражение согласуется с аналогичным выражением для коррелятора с монохроматическим освещением при $\lambda_{\max} = \lambda_{\min}$. Была получена оценка относительного спектрального разрешения дисперсионного коррелятора из условия совмещения положения спектральных составляющих результирующего корреляционного сигнала в пределах одного пространственного отсчёта:

$$\delta\lambda / \lambda = (\lambda_{\max} / \lambda_{\min}) 2/ N. \quad (10)$$

Для повышения качества выводимых на физические носители бинаризованных синтезированных голограмм в работе была разработана модификация итерационных методов пошаговой бинаризации, представляющая собой комбинацию итерационного метода и метода диффузии ошибки. В этом случае сначала выполняется итерационная процедура пошаговой бинаризации, при этом можно использовать любой из итерационных методов. На последнем итерационном шаге вместо бинаризации по порогу выполняется бинаризационная процедура диффузии ошибки. Это позволяет сохранить мелкие детали в восстановленном изображении при значительном повышении уровня интенсивности полезного сигнала относительно пространственных шумов, вынесенных за границу изображения.

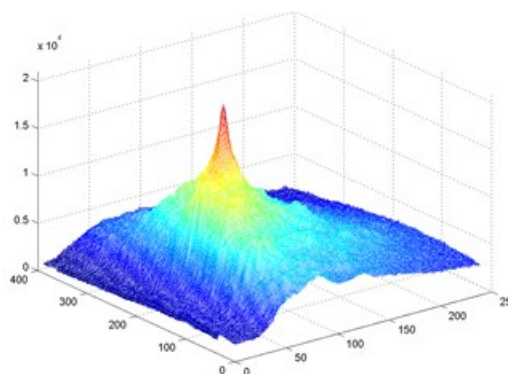
Были рассчитаны амплитудные синтезированные голограммы размером от 64×64 до 2048×2048 отсчетов, при этом типичное количество итераций было около 60. В результате было достигнуто, что интенсивность шума, вынесенного за границы восстановленного изображения, не превышает интенсивность полезного сигнала в восстановленном изображении. Применение разработанного метода позволяет улучшить качество

изображения при значительном подавлении шумов без существенного увеличения количества времени, затраченного на бинаризацию синтезированных голограмм.

В работе были проведены эксперименты по формированию корреляционных сигналов в схеме дисперсионного коррелятора с одним объективом. Используя разработанные методы синтеза и бинаризации голограмм, были рассчитаны и изготовлены голографические фильтры. Во входную плоскость коррелятора помещался пропускающий транспарант с изображением объекта, освещаемый источником излучения (ртутной лампой). Объектив и изготовленная фурье-голограмма располагались в установке согласно тем параметрам, с учётом которых производился синтез голограммы. В выходной плоскости в первом порядке дифракции присутствует сформированный излучением трёх спектральных компонент локализованный сигнал корреляции по пространственным и спектральным параметрам, являющийся сигналом распознавания коррелятора (рис. 16а). Цвет центрального максимума складывается из суммы трех спектральных компонент, слева от корреляционного сигнала приведено изображение входного объекта, формируемое в нулевом порядке дифракции. Наличие глобального максимума по интенсивности в центре распределения (рис. 16б) позволяет сделать вывод о применимости этой схемы для задач корреляционного распознавания излучающих объектов. На рис. 17а представлен вид корреляционного сигнала только по спектральным характеристикам, когда в качестве входного объекта использована дифракционная щель, на рис. 17б представлены наложенные на профилограмму корреляционного сигнала зарегистрированные профилограммы кросс-корреляционных сигналов для различных спектров как частично совпадающих, так и несовпадающих с опорным спектром. Видно превышение уровня сигнала идентификации спектра над кросс-корреляционными сигналами, как минимум, в 1,6 раза.



а



б

Рис. 16. Вид (а) и распределение интенсивности (б) корреляционного сигнала при полном совпадении характеристик

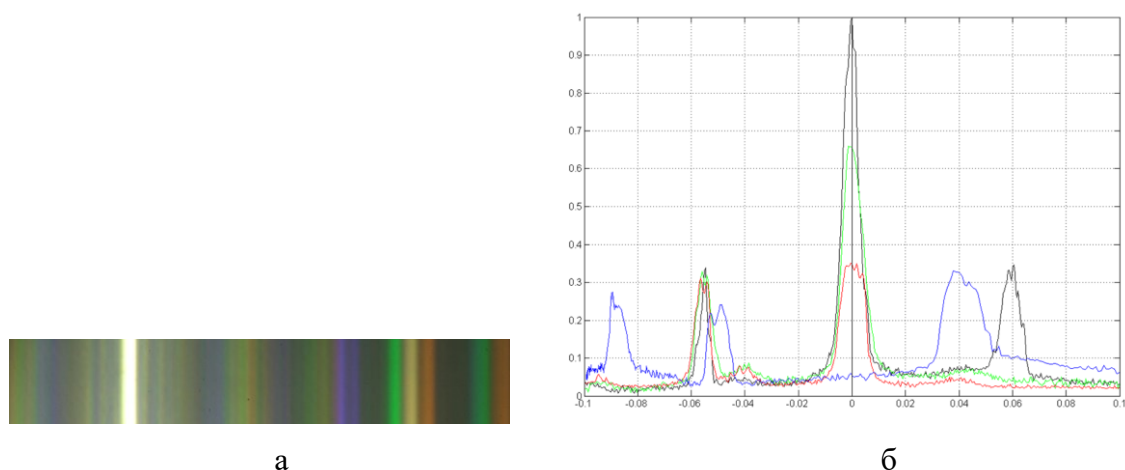


Рис. 17. Вид корреляционного сигнала по спектру при совпадении характеристик (а) и профилограммы (б) корреляционных сигналов для различных спектров, как частично совпадающих, так и несовпадающих с опорным спектром (спектрограмма совпадения сигнала показана серым цветом)

Наиболее сложным для распознавания является случай, когда протяжённый спектр входного излучения не является линейчатым. Для этого случая при формировании обобщённого образа опорного объекта необходимо определить те спектральные диапазоны, которые являются наиболее информативными. Одним из наиболее простых является метод, при котором в качестве информативных учитываются те спектральные диапазоны, где интенсивность излучения больше заданного порогового значения, которое обычно выбирается с учётом характера спектра (рис. 18).

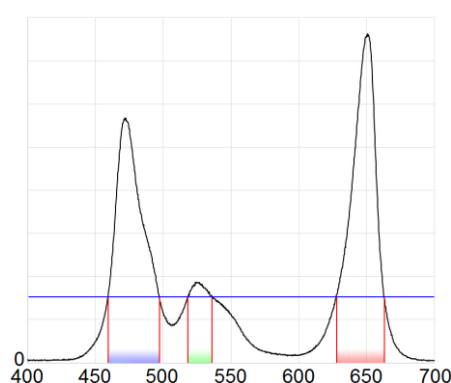


Рис. 18. Схема отбора информационных признаков спектра (на примере спектра RGB-светодиода)

Была проведена серия экспериментов с использованием источников излучения различного спектрального состава. В качестве источников с нелинейчатым спектром были использованы одноканальные светодиоды различного диапазона свечения и RGB-светодиод

(рис. 18). Использовались голографические фильтры, синтезированные для распознавания опорного объекта в различных комбинациях спектра свечения светодиодов.

После регистрации проводилась пост-обработка корреляционного сигнала, заключающаяся в нормировке получаемого корреляционного сигнала, чтобы исключить зависимость величины сигнала от яркости источника излучения на входе коррелятора. В результате экспериментальной проверки нескольких методов был выбран метод нормировки на общую мощность излучения в первом порядке дифракции, так как его применение позволяет не регистрировать нулевой порядок, что снижает требования к разрядности АЦП фотодетектора и размеру его матрицы. При регистрации сигналов оправдано использование метода однократной экспозиции с последующим пространственным усреднением, позволяющее повысить отношение сигнал/шум, что важно при распознавании объектов в реальном масштабе времени.

Полученные результаты экспериментов по распознаванию тестовых объектов, освещаемых источниками с протяженными нелинейчатыми спектрами излучения, показали уверенное различие каждого из объектов. Деграция выходного сигнала при несовпадении пространственных характеристик опорного и распознаваемого объектов происходила не менее чем в 2 раза (рис. 19); при совпадении пространственных форм и частичном совпадении спектров это значение меньше и в проведённых измерениях составляло от 1,4 и более в зависимости от степени совпадения опорного и входного спектров излучения (рис. 20), при относительном спектральном разрешении установки 0,004.

Полученные результаты по идентификации объектов по их пространственным и спектральным параметрам подтверждают работоспособность дисперсионных корреляторов с синтезированными голограммами в задачах распознавания объектов, обладающих различной протяжённостью спектра их излучения, в реальном масштабе времени.

В пятой главе рассмотрена возможность применения в некогерентных оптических системах кодирования и распознавания в качестве фильтров пространственных частот таких синтезированных дифракционных оптических элементов как киноформы. Дифракционная эффективность киноформ, формирующих теоретически только один дифракционный порядок, близка к 100 % (рис. 21). Отсутствие несущей пространственной частоты существенно уменьшает число отсчетов, требуемое для записи киноформа, что позволяет создавать на существующей элементной базе оперативно управляемые фильтры для обработки изображений. Так как киноформы обычно воспроизводят только распределение интенсивности изображений, записанных с псевдослучайным распределением фазы, поэтому их целесообразно использовать, прежде всего, в оптических системах с пространственно-некогерентным освещением.

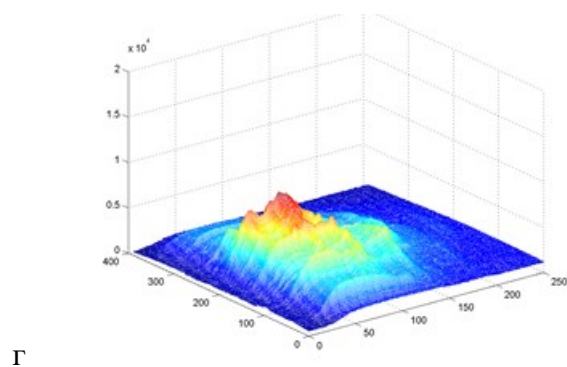
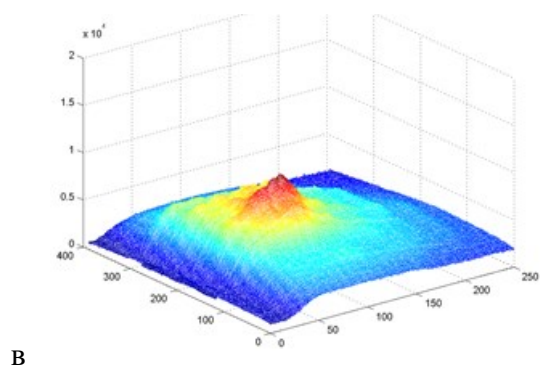
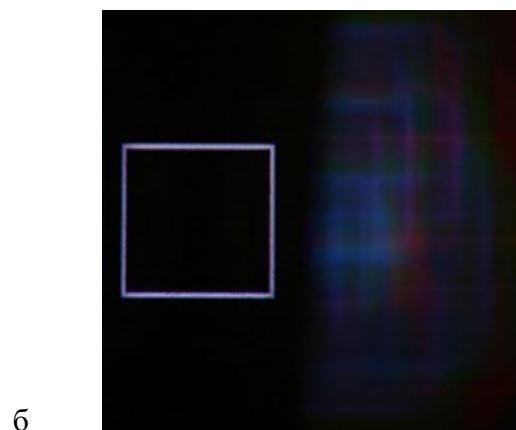
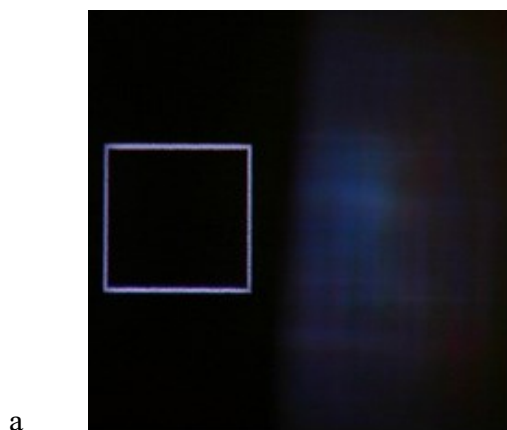


Рис. 19. Виды корреляционного сигнала при несовпадении пространственных характеристик при совпадении (а, в) и несовпадении (б, г) спектральных характеристик

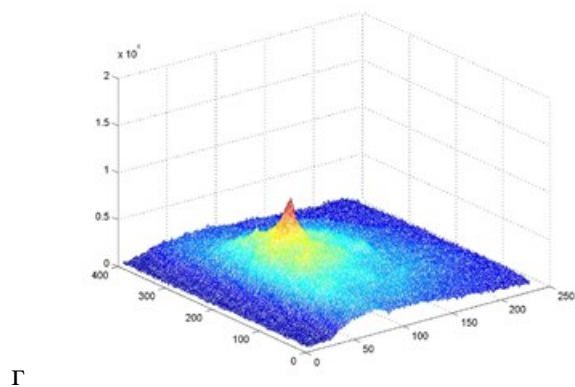
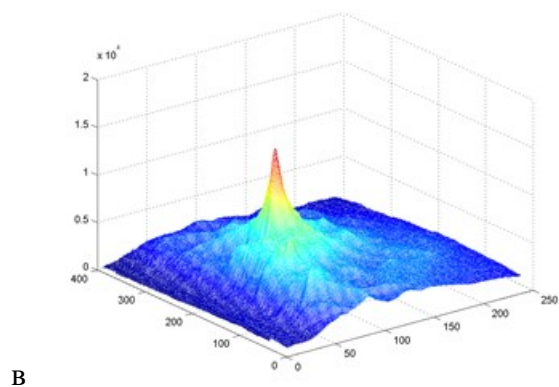
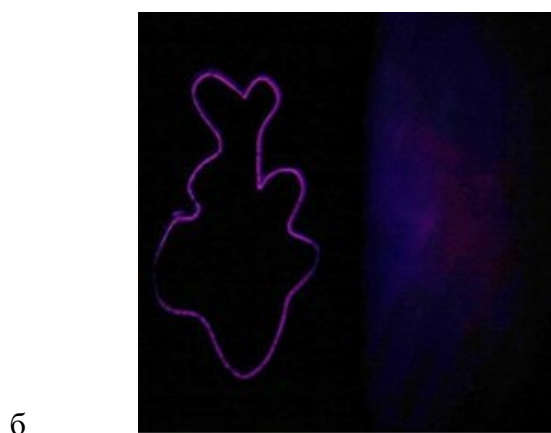
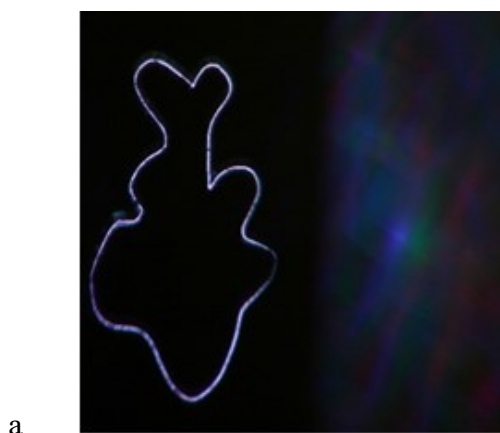


Рис. 20. Виды корреляционного сигнала (а, в) и распределения интенсивности (б, г) при совпадении пространственных и частичном несовпадении спектральных характеристик

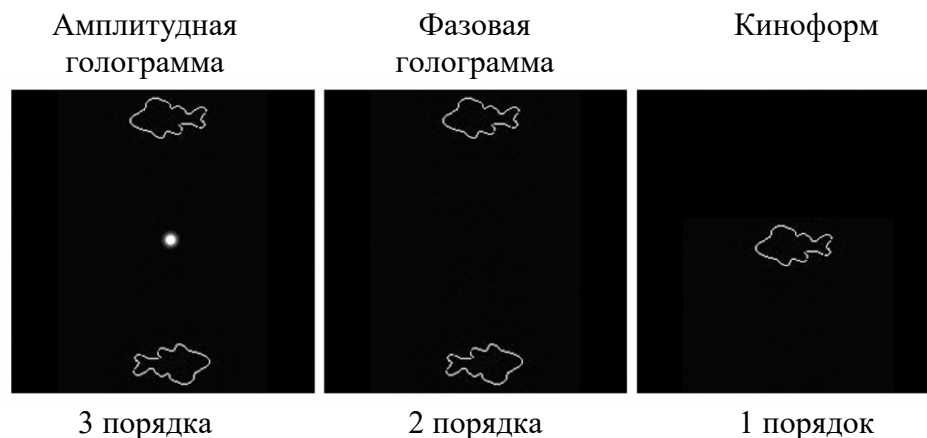


Рис. 21. Дифракционные порядки синтезированных оптических элементов

Было проведено экспериментальное исследование создания оптико-цифрового дифракционного коррелятора изображений с применением киноформа и регистрацией сигналов с помощью коммерческой цифровой зеркальной фотокамеры. Использование узлов цифровой фотокамеры даёт возможность обработки в подобных корреляторах многоэлементных (8-16 Мпиксел) изображений с высоким (до 14 бит) динамическим диапазоном регистрации корреляционных сигналов. Обеспечивается, также, оперативное соединение с цифровыми устройствами, управляющими работой коррелятора и выполняющими пост-обработку, передачу и хранение выходных сигналов коррелятора.

Принципиальная оптическая схема коррелятора аналогична (рис. 22) однолинзовой схеме и представляет собой собственно цифровую зеркальную фотокамеру с укрепленным на ней оптическим корреляционным фильтром с опорным изображением и, при необходимости, управляющий компьютер. Фильтр с синтезированным импульсным откликом устанавливался внутри корпуса фотокамеры, между съемным объективом и откидывающимся зеркалом видоискателя. Для обеспечения обработки всего поля кадра в качестве фильтров необходимо использование именно киноформов, а не голограмм. Таким образом, вся оптическая схема коррелятора расположена внутри фотоаппарата и использует его штатный объектив. В видоискателе наблюдаются и регистрируются фотоаппаратом только сигналы взаимной корреляции изображений входной сцены и опорного изображения, записанного на синтезированном киноформе. Степень монохроматичности ($\lambda_{cp}/\Delta\lambda$) пространственно-некогерентного освещения сцены должна превышать максимальное число отсчетов опорного изображения на киноформе вдоль произвольного направления.

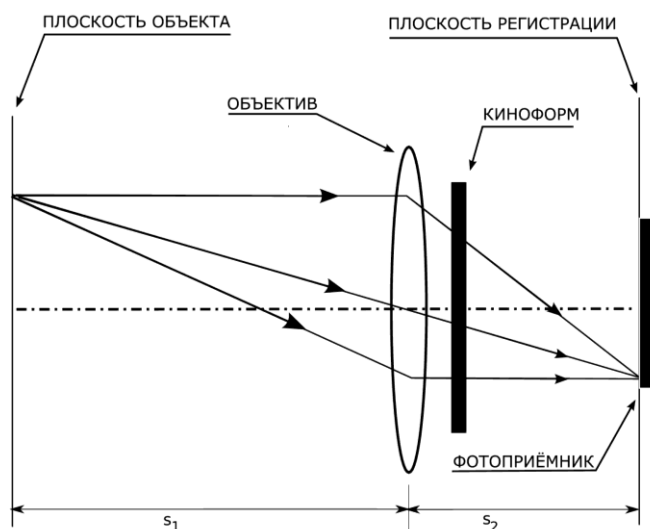


Рис. 22. Схема некогерентного оптико-цифрового коррелятора с киноформом

В работе проведены эксперименты по распознаванию объектов с использованием статических киноформов, импульсные отклики киноформов (рис. 23а, б) использовались в качестве входных изображений, которые формировались при помощи акустооптического дефлектора. На рис. 23 также представлены изображения корреляционных сигналов при совпадении (в) и несовпадении (г) объектов и профилограммы соответствующих сигналов (д и е).

В другой серии экспериментов по распознаванию изображений в качестве тестовых объектов использовались плоские изображения на листах бумаги, установленных перед фотокамерой. Входная сцена освещалась пространственно-некогерентным монохроматическим излучением. На рис. 24а показаны распознаваемые тестовые объекты перед камерой. Был проведён синтез киноформов с числом отсчетов от 64×64 до 512×512 и числом градаций фазы до 64. Изображение велосипедиста, записанное на киноформе, являлось опорным. Сигналы корреляции входных объектов с опорным объектом, непосредственно наблюдаемые в видеискатель и зарегистрированные цифровой фотокамерой, представлены на рис. 24б. Локальные светлые пятна указывают на положение во входной сцене трёх объектов, совпадающих с опорным. Отношение сигнал/помеха в величине пиков корреляционных сигналов составляет более 1,2. Регистрация поля сигналов корреляции в виде цифровых данных даёт возможность оперативно проводить их пост-обработку цифровыми методами, что позволило повысить отношение сигнал/помеха в величине пиков корреляционных сигналов за счет пост-обработки до значения 2,1.

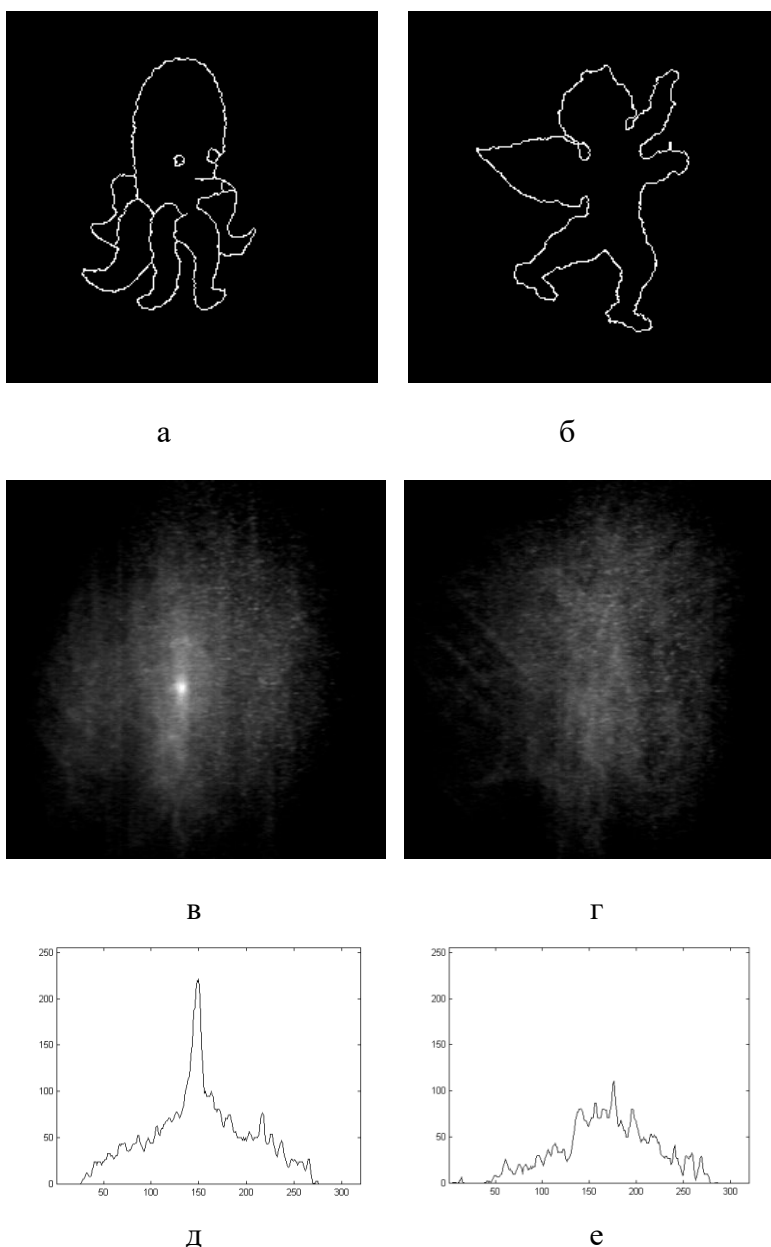


Рис. 23. Изображения на входе коррелятора: сходное с опорным (а), опорное (б); вид корреляционных сигналов некогерентного оптико-цифрового коррелятора с киноформом при совпадении (в) и несовпадении (г) объектов, профиль распределения интенсивности в сигналах при совпадении (д) и несовпадении (е) объектов

Показано, что эта же оптическая система может быть использована и для задач оптического кодирования. Процесс кодирования при помощи оптических систем, осуществляется при прохождении излучения от кодируемого объекта через дифракционный оптический элемент, в результате чего формируется оптическая свёртка кодируемого изображения с импульсным откликом кодирующего элемента (рис. 25). В качестве дифракционных оптических элементов предпочтительно использовать не фурье-голограммы, а киноформы, так как наличие у голограмм нулевого дифракционного порядка вносит демаскирующий эффект при кодировании и приводит к дополнительным потерям излучения.

Декодирование изображений, кодированных оптическим способом, является классической обратной задачей и решается путём нахождения инверсного фильтра цифровыми методами.

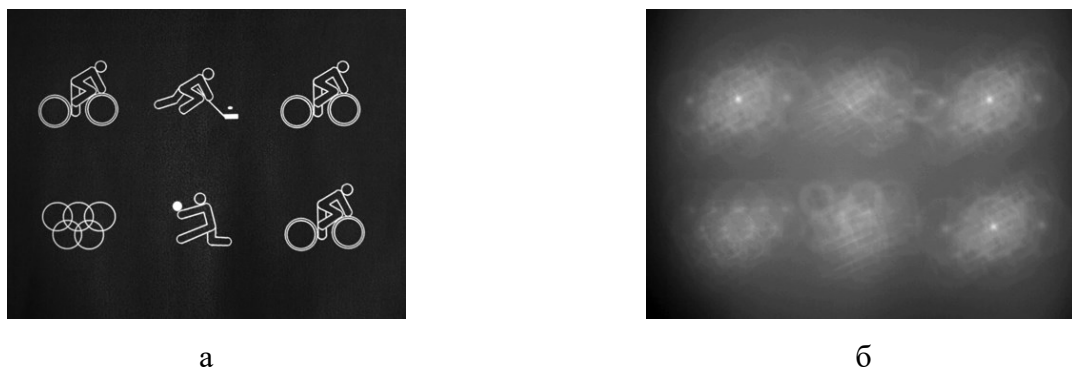


Рис. 24. Тестовые объекты перед фотокамерой (а), сигналы корреляции в видоискателе и на снимке (б)

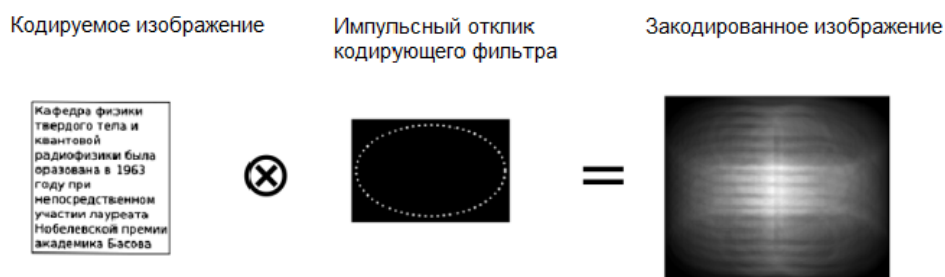


Рис. 25. Принципиальная схема оптического кодирования

Было показано, что коррелятор на основе цифровой фотокамеры с киноформом может быть интерпретирован как гибридная оптико-цифровая отображающая система, основанная на принципе "кодирования волнового фронта". Роль кодирующего элемента выполняет киноформ, используемый для распознавания объектов. Сигналы корреляции, зафиксированные цифровым фотоприемником, могут рассматриваться как изображение входной сцены перед фотокамерой. Поэтому, можно с помощью цифровой обработки решить обратную задачу и реконструировать изображение, соответствующее тому, которое зарегистрировала бы фотокамера в отсутствие киноформа. Это позволяет не только распознавать объекты во входной сцене по распределению корреляционных сигналов, зарегистрированных фотоприемником цифровой камеры, но и восстанавливать, если необходимо, их изображения.

В экспериментах использовался синтезированный киноформ, записанный на нём объект представлял собой набор светлых точек на чёрном фоне (рис. 26). Вид регистрируемого плоского объекта представлен на рис. 27а. На рис. 27б показано оптически

закодированное изображение, зафиксированное цифровой фотокамерой. Можно отметить, что информативные детали сцены потеряны для визуального восприятия. На рис. 27в приведен результат цифрового восстановления изображения сцены по оптически закодированному изображению.

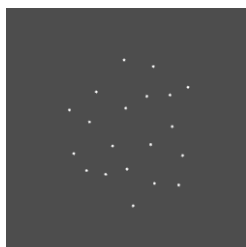


Рис. 26. Вид импульсного отклика кодирующего элемента

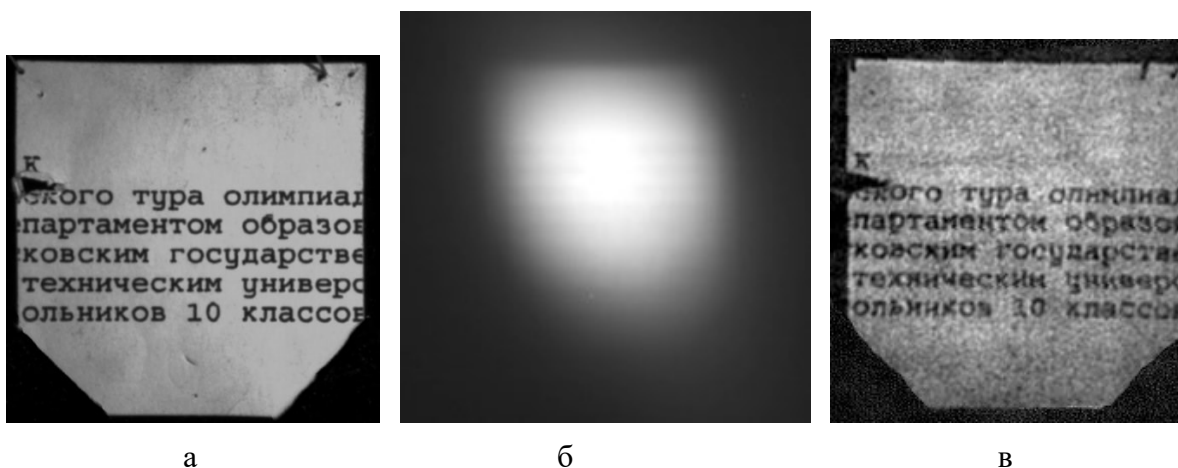


Рис. 27. Экспериментальные результаты оптического кодирования: кодируемое изображение (а), закодированное изображение (б), декодированное изображение (в)

В шестой главе рассмотрена возможность применения в оптическом корреляторе микрозеркального модулятора в качестве устройства вывода голографических фильтров в некогерентном излучении. Для проведения оперативного анализа распознаваемых объектов важным фактором является частота смены фильтров в корреляторе. В большинстве корреляторов для вывода голографических фильтров используются жидкокристаллические пространственно-временные модуляторы света, имеющие определённые недостатки: наличие флуктуаций фазы не только для фазовых, но даже для амплитудных модуляторов, относительно низкая контрастность выводимых изображений и не самое высокое быстродействие. В последнее время широко развилась технология создания микрозеркальных или DMD-модуляторов (Digital Micromirror Device modulators), которые обладают быстродействием, значительно (на два-три порядка) превышающим быстродействие жидкокристаллических ПВМС. Микрозеркальные модуляторы

осуществляют амплитудную модуляцию с помощью отражения светового потока от матрицы микрозеркал, поэтому излучение не претерпевает паразитную фазовую модуляцию. Так как принцип работы данных модуляторов основан только на отражении света от микрозеркал, в работе было предложено их использование для реализации дисперсионных корреляторов.

В работе проведено экспериментальное исследование влияния технологических погрешностей микрозеркальных модуляторов из-за несовершенства их изготовления на качество выводимых изображений. В этих экспериментах было установлено, что для получения хорошего качества выводимого изображения необходимо предварительно определить размер и положение наиболее плоского участка матрицы DMD-модулятора, и осуществлять вывод голограмм именно в этот участок матрицы. Определен максимальный для использованного модулятора размер выводимых голограмм, который составил 300×300 пикселей. Представлены рекомендации по возможности применения микрозеркальных модуляторов в задачах оптического кодирования и распознавания.

Была реализована экспериментальная установка коррелятора, собранная по однолинзовой схеме (рис. 28). На микрозеркальный модулятор с помощью управляющего компьютера выводятся голографические фильтры, заранее синтезированные под необходимые опорные объекты. Некогерентное излучение от входного объекта попадает на модулятор и отражается от него, претерпевая пространственную модуляцию. В качестве источников излучения использовались как лазерные, так и светодиодные источники. В выходной плоскости коррелятора расположена камера, регистрирующая формируемую объективом структуру, включающую нулевой порядок (изображение объекта) и первый порядок дифракции (область корреляционного сигнала).

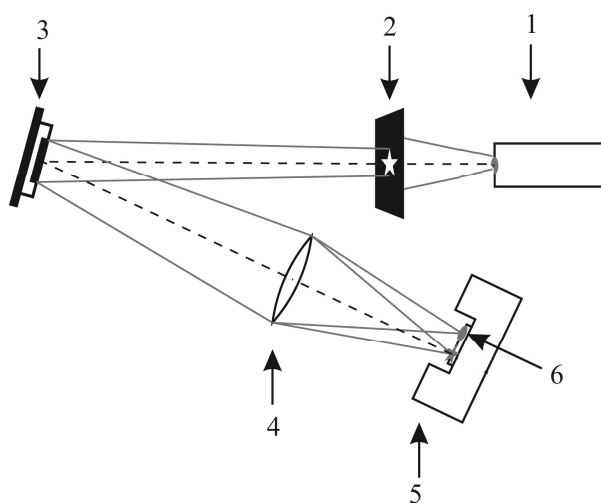


Рис. 28. Схема некогерентного коррелятора на основе микрозеркального модулятора:

1 – источник излучения, 2 – транспарант с изображением распознаваемого объекта, 3 – микрозеркальный модулятор с выведенным на нём синтезированным голографическим фильтром, 4 – объектив, 5 – регистрирующая камера, 6 – область корреляционного сигнала

Были проведены эксперименты по распознаванию тестовых объектов при изменении их параметров с динамическим выводом голографических фильтров, в качестве которых были использованы голограммы, синтезированные с применением, как преобразования Фурье, так и преобразования Хартли. Результаты экспериментов, представленные на рис. 29, согласуются с результатами, полученными при использовании других корреляционных схем. Получено, что при совпадении входного и опорного объектов наблюдался хорошо локализованный корреляционный пик, позволяющий сделать вывод об успешной идентификации объектов в корреляторе при использовании микрозеркального модулятора.

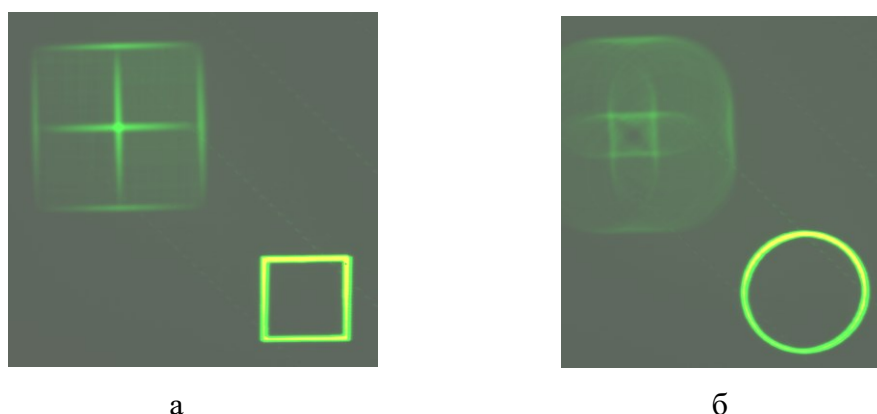


Рис. 29. Вид корреляционного сигнала при совпадении (а) и несовпадении (б) пространственных характеристик объекта

Экспериментально исследована разрешающая способность коррелятора, установлено, что поворот сложного распознаваемого объекта даже на 1° приводит к уменьшению корреляционного пика на 15%, изменение масштаба на 5% приводит к уменьшению корреляционного пика как минимум на 20%. Эти эксперименты проводились в режиме динамического вывода голографических фильтров на микрозеркальный модулятор. Скорость переключения вывода фильтров, определяемая возможностями модулятора, составила около 10 мкс. Таким образом, подтверждается эффективность работы коррелятора при динамическом изменении параметров распознавания. Проведена оценка максимальной производительности реализованного некогерентного коррелятора, которая может достигать значения 10^5 корреляций в секунду.

Были проведены эксперименты по оптическому кодированию с выводом кодирующих элементов на модуляторе (рис. 29). Импульсный отклик синтезированной голограммы представлял собой набор светлых точек на чёрном фоне (рис. 26). На рис. 30 приведены результаты экспериментов, подтверждающие возможность оптического кодирования с применением микрозеркального модулятора.

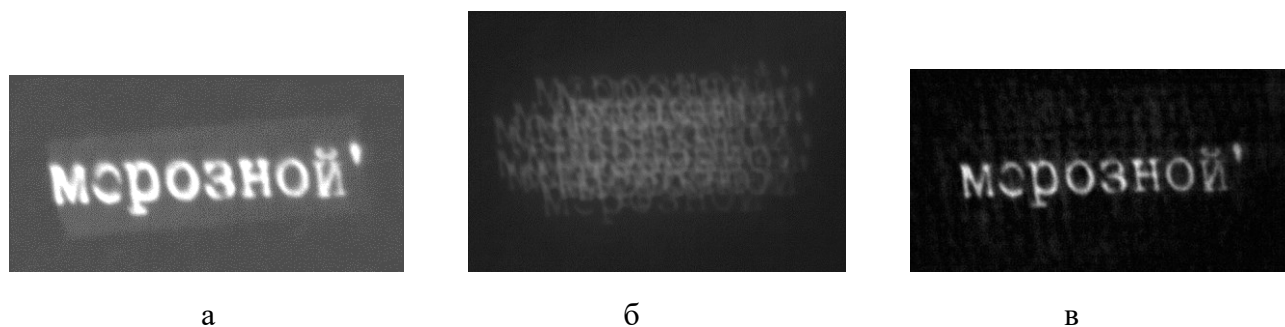


Рис. 30. Экспериментальные результаты оптического кодирования: кодируемое изображение (а), закодированное изображение (б), декодированное изображение (в)

Предложена методика применения некогерентного коррелятора на основе микрозеркального модулятора при оптическом кодировании с временным интегрированием. С помощью микрозеркального модулятора возможна динамическая смена кодирующих изображений, что обеспечит помехозащищённость процесса кодирования. Полученные результаты подтвердили эффективность применения микрозеркальных модуляторов в качестве устройств вывода в некогерентных устройствах кодирования и распознавания.

Основные результаты и выводы

1. Разработан новый класс оптических систем обработки информации – дисперсионные корреляторы, позволяющих осуществлять распознавание объектов в излучении различного спектрального состава в реальном масштабе времени, установлены условия формирования сигналов в таких корреляторах при использовании в качестве информационных параметров пространственных и спектральных характеристик объектов;

2. Получены теоретические соотношения, связывающие параметры синтезируемых голографических фильтров с пространственными и спектральными характеристиками опорных объектов и геометрическими параметрами схмотехнических реализаций корреляторов, произведена оценка максимального числа разрешимых элементов в опорном изображении объекта в зависимости от протяжённости спектра излучения, теоретически и экспериментально подтверждена применимость голограмм, синтезированных с использованием преобразования Хартли, в качестве фильтров в некогерентных оптических корреляторах.

3. Разработана и реализована методика синтеза импульсных откликов фурье-голограмм для их последующего применения в качестве фильтров в дисперсионных корреляторах, разработана и реализована модификация итерационных методов бинаризации,

представляющая собой комбинацию итерационного метода и метода диффузии ошибки, синтезированы и изготовлены бинарные фурье-голограммы с максимальным разрешением 2540 точек/дюйм для использования в качестве корреляционных фильтров в различных схемах дисперсионных корреляторов.

4. Экспериментально реализованы и исследованы схемы корреляторов для распознавания изображений и спектров излучения источников немонахроматического излучения:

- «4f-схема» коррелятора с использованием в качестве фильтров голограмм, как записанных оптически, так и синтезированных на компьютере;
- однолинзовая схема коррелятора с использованием в качестве фильтров синтезированных голограмм;
- схема коррелятора с использованием в качестве фильтра и спектрального селектора отражательной толстослойной фурье-голограммы;
- схема оптико-цифрового коррелятора с использованием киноформов в качестве фильтров пространственных частот;
- схема коррелятора с оперативным выводом синтезированных голограмм-фильтров на микрозеркальном модуляторе.

5. Экспериментально осуществлено формирование локализованных корреляционных сигналов по комплексу пространственных и спектральных характеристик объектов, чем подтверждена работоспособность дисперсионных корреляторов при решении задач распознавания объектов, определены и подтверждены в экспериментах по распознаванию объектов в немонахроматическом излучении процедуры пост-обработки корреляционных сигналов для исключения зависимости величины сигнала от яркости источника излучения.

6. Определены предельные характеристики дисперсионных корреляторов: максимальная пропускная способность по пространственным характеристикам – 10^6 отсчетов по полю, пропускная способность по спектральным характеристикам – около 200 отсчетов, при распознавании тестовых объектов, освещаемых источниками с протяженными спектрами излучения, достигнута уверенная идентификация объектов (относительное спектральное разрешение – 0,004):

- для линейчатых спектров при несовпадении пространственных или спектральных характеристик объектов деградация сигнала происходила не менее чем в 2 раза, при полном несовпадении характеристик – не менее чем в 4,4 раза;
- для сплошных спектров при несовпадении характеристик объектов деградация сигнала происходила не менее чем в 2 раза; при частичном совпадении спектров не менее чем в 1,4 раза.

7. Экспериментально подтверждено применение коррелятора с отражательным толстослойным голографическим фильтром (относительная спектральная селективность около 70) при решении задачи пространственного позиционирования спектрально окрашенных объектов в полихроматическом свете. Предложена и экспериментально реализована схема записи отражательного толстослойного голографического фурье-фильтра в квазимонохроматическом частично-когерентном свете с использованием вогнутого зеркала.

8. Предложена и экспериментально реализована схема корреляционного спектроанализатора с протяженной входной маской (разрешение по спектру – 1 нм при ширине спектра в 200 нм), позволяющей исключить процедуру сканирования по поверхности источника оптического излучения.

9. Разработана и реализована методика синтеза голограмм с использованием преобразования Хартли, осуществлён синтез голограмм, теоретически и экспериментально подтверждена применимость таких голограмм в качестве фильтров пространственных частот в некогерентных оптических корреляторах.

10. Экспериментально реализована оптическая распознающая система на основе цифровой фотокамеры с применением киноформов в качестве фильтров, теоретически обоснована и экспериментально подтверждена принципиальная возможность использования такой системы и для задач оптического кодирования с использованием синтезируемых киноформов в качестве кодирующих элементов;

11. Показана возможность применения микрозеркальных модуляторов в некогерентных системах, обеспечивающая скорость обработки на уровне 10^5 кадров в секунду. Определены условия применимости таких модуляторов, связанные с особенностями их технических характеристик, экспериментально осуществлено динамическое распознавание двумерных объектов с использованием голограмм, синтезированных с применением преобразований Фурье и Хартли, отображаемых с помощью микрозеркального модулятора.

12. Экспериментально реализованы системы оптического кодирования на основе микрозеркального модулятора с временным интегрированием и с применением синтезированных голограмм в качестве кодирующих элементов, полученные экспериментальные результаты подтвердили работоспособность таких систем при их функционировании в некогерентном излучении.

Список основных публикаций по теме диссертации

Публикации в рецензируемых журналах.

1. Евтихийев Н.Н., Родин В.Г., Савченкова Е.А., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Адаптивный итеративный метод подбора весовых коэффициентов операции диффузии ошибки для бинаризации цифровых голограмм // Измерительная техника. 2022. № 6. С. 41-45. (WOS, Scopus, BAK)
2. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Рябцев И.П., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Измерение модуляции фазового жидкокристаллического модулятора света Santec SLM-200 и анализ его применимости для реконструкции изображений с дифракционных элементов // Измерительная техника. 2021. № 5. С. 4-8. (WOS, Scopus, BAK)
3. Евтихийев Н.Н., Козлов А.В., Краснов В.В., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Оценка эффективности измерений шумов фотосенсоров цифровых камер методами автоматической сегментации неоднородной сцены и стандартным методом EMVA 1288 // Измерительная техника. 2021. № 4. С. 28-35. (WOS, Scopus, BAK)
4. Евтихийев Н.Н., Козлов А.В., Краснов В.В., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Метод измерения шумов цифровых камер автоматической сегментацией полосовой сцены // Компьютерная оптика. 2021. Т. 45. № 2. С. 267-276. (WOS, Scopus, BAK)
5. Евтихийев Н.Н., Злоказов Е.Ю., Краснов В.В., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Высокоскоростная оперативная реализация голографических и дифракционных элементов с применением микрозеркальных пространственно-временных модуляторов света // Квантовая электроника. 2020. Т. 50. № 7. С. 667-674. (WOS, Scopus, BAK)
6. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Молодцов Д.Ю., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Применение микрозеркального модулятора света для оптического кодирования с временным интегрированием // Автометрия. 2020. Т. 45. № 2. С. 34-41. (WOS, Scopus, BAK)
7. Курбатова Е.А., Родин В.Г., Черёмхин П.А. Итеративная бинаризация цифровых голограмм с применением метода диффузии ошибки // Автометрия. 2020. Т. 45. № 2. С. 118-125. (WOS, Scopus, BAK)
8. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Кузьмин И.Д., Молодцов Д.Ю., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. 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. (WOS, Scopus, BAK)
9. Родин В.Г. Некогерентный голографический коррелятор на основе микрозеркального модулятора // Компьютерная оптика. 2018. Т. 42. № 3. С. 347-353. (WOS, Scopus, BAK)
10. Cheremkhin P.A., Molodtsov D.Yu., Krasnov V.V., Rodin V.G. Recognition of objects radiating with broad spectrum in dispersive holographic correlator // Optics Communications. 2018. V. 421. P. 73-78. (WOS, Scopus)
11. Родин В.Г. Синтез и изготовление фурье-голограмм для распознавания объектов в дисперсионных корреляторах // Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 118. № 3. С. 491-497. (WOS, Scopus, BAK)
12. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Modified temporal noise measurement method with automatic segmentation of nonuniform target, its accuracy estimation, and application to cameras of different types // Optical Engineering. 2014. V. 53. No. 10. P. 102107. (WOS, Scopus)
13. Родин В.Г., Стариков С.Н., Черёмхин П.А., Краснов В.В. 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. (BAK)

14. Родин В.Г., Стариков С.Н. Распознавание объектов по пространственным и спектральным параметрам в дисперсионных голографических корреляторах // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 4. С. 22-27. (WOS, Scopus, BAK)
15. Евтихийев Н.Н., Краснов В.В., Родин В.Г., Солякин И.В., Стариков С.Н., Черёмхин П.А., Шапкарина Е.А. Увеличение отношения сигнал/шум за счёт пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». 2012. № 4. С. 122-136. (BAK)
16. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Злоказов Е.Ю., Родин В.Г., Стариков Р.С. Инвариантные корреляционные фильтры с линейным фазовым коэффициентом: варианты реализации в схемах когерентных корреляторов изображений // Научно-технические ведомости СПбГПУ, Серия "Информатика. Телекоммуникации. Управление". 2010. № 4. С. 227-233. (BAK)
17. Быковский Ю.А., Маркилов А.А., Родин В.Г., Стариков С.Н. Дисперсионные корреляторы в системах оптической обработки информации // Инженерная физика. 1999. № 1. С. 32-35. (BAK)
18. Быковский Ю.А., Маркилов А.А., Родин В.Г., Стариков С.Н. Оптическая обработка информации с преобразованием пространственной когерентности света // Квантовая электроника, 1995. Т. 22. № 10. С. 1049-1054. (WOS, Scopus, BAK)

Патенты РФ

19. Быковский Ю.А., Маркилов А.А., Родин В.Г., Стариков С.Н. Корреляционный спектроанализатор протяженных источников излучения // Патент РФ на изобретение № 2181192. Опубликовано 10.04.2002.
20. Быковский Ю.А., Маркилов А.А., Родин В.Г., Стариков С.Н. Устройство записи отражательного толстослойного голографического Фурье-фильтра в частично-когерентном свете // Патент РФ на изобретение №2176099. Опубликовано 20.11.2001.

Публикации в научных изданиях, индексируемых в Web of Science и Scopus.

21. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Kurbatova E.A., Krasnov V.V., Rodin V.G. Error diffusion hologram binarization for DMD applications // Proceedings of SPIE. 2021. V. 11698. P. 116980W. (WOS, Scopus)
22. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G. Fast increase of quality of optically reconstructed images in digital holography // Proceedings of SPIE. 2020. V. 11306. P. 113060W. (WOS, Scopus)
23. Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Kuzmin I.D., Molodtsov D.Yu., Rodin V.G., Starikov R.S. Optical encryption of digital information in the scheme with spatially incoherent illumination based on micromirror light modulators // Procedia Computer Science. 2020. V. 169. P. 564-567. (WOS, Scopus)
24. Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G. Rymov D.A., Starikov R.S. Machine learning methods for digital holography and diffractive optics // Procedia Computer Science. 2020. V. 169. P. 440-444. (WOS, Scopus)
25. Molodtsov D.Yu., Rodin V.G. Object recognition in non-coherent optical correlator based on DMD-modulator illumination // Proceedings of SPIE. 2016. V. 10176. P. 101761A. (WOS, Scopus)
26. Molodtsov D.Yu., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G. Impact of DMD-SLMs errors on reconstructed Fourier holograms quality // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 737. P. 012074. (WOS, Scopus)
27. Evtikhiev N.N., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Kurbatova E.A., Molodtsov D.Yu., Porshneva L.A., Rodin V.G. Simple method of modelling of digital holograms registering and their

- optical reconstruction // Journal of Physics: Conference Series. 2016. V. 737. P. 012073. (WOS, Scopus)
28. Molodtsov D.Yu., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G. Experimental evaluation of the optical quality of DMD SLM for its application as Fourier holograms displaying device // Proceedings of SPIE. 2016. V. 9889. P. 988926. (WOS, Scopus)
 29. Porshneva L.A., Cheremkhin P.A., Evtikhiev N.N., Krasnov V.V., Rodin V.G., Starikov S.N. Dynamic reconstruction of 3D-scenes from registered digital holograms // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 333-337. (WOS, Scopus)
 30. Molodtsov D.Yu., Rodin V.G., Starikov S.N. The possibility of using DMD SLM for hologram filters displaying in dispersive correlator // Physics Procedia. 2015. V. 73. P. 333-337. (WOS, Scopus)
 31. Molodtsov D.Yu., Rodin V.G., Starikov S.N. Synthesis of Fourier holograms for recognition of radiation sources with continuous spectra by dispersive correlators // Proceedings of SPIE. 2015. V. 9508. P. 950812. (WOS, Scopus)
 32. Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Kurbatova E.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Estimation of number of resolvable signal levels of photo- and videocameras // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 536. P. 012023. (WOS, Scopus)
 33. Molodtsov D.Yu., Rodin V.G., Starikov S.N. Estimation of resolution of dispersive correlator // Journal of Physics: Conference Series. 2014. V. 536. P. 012024. (WOS, Scopus)
 34. Starikov S.N., Konnik M.V., Manykin E.A., Rodin V.G. Linear methods for input scenes restoration from signals of optical-digital pattern recognition correlator // Proceedings of SPIE. 2009. V. 7340. P. 73400B. (WOS, Scopus)
 35. Rodin V.G., Starikov S.N. Recording of incoherent reflective volume Fourier holograms for optical correlators // Proceedings of SPIE. 2007. V. 6595. P. 65951F. (WOS, Scopus)
 36. Starikov S.N., Balan N.N., Konnik M.V., Rodin V.G., Solyakin I.V., Shapkarina E.A. Input scene restoration in pattern recognition correlator based on digital photo camera // Proceedings of SPIE. 2007. V. 6574. P. 65740J. (WOS, Scopus)
 37. Starikov S.N., Balan N.N., Rodin V.G., Solyakin I.V., Shapkarina E.A. Pattern recognition correlator based on digital photo camera // Proceedings of SPIE. 2006. V. 6245. P. 62450C. (WOS, Scopus)
 38. Manykin E.A., Rodin V.G., Solyakin I.V., Shapkarina E.A., Starikov S.N. Synthesis of kinoforms for incoherent image correlator // Proceedings of SPIE. 2006. V. 6162. P. 61620A. (WOS, Scopus)
 39. Starikov S.N., Rodin V.G., Shapkarina E.A., Solyakin I.V., Chervonkin A.P. Incoherent acoustooptic image correlator with the kinoform // Proceedings of SPIE. 2004. V. 5437. P. 301-308. (WOS, Scopus)
 40. Bykovsky Yu.A., Markilov A.A., Rodin V.G., Shapkarina E.A., Solyakin I.V., Starikov S.N., Terekhov M.V. The optical information processing systems with various structure incoherent radiation // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3516. P. 448-455. (WOS, Scopus)
 41. Bykovsky Yu.A., Markilov A.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Correlation spectral analyser of extended light sources // Proceedings of SPIE. 1999. V. 3900. P. 324-328. (WOS, Scopus)
 42. Bykovsky Yu.A., Karpouk A.B., Markilov A.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Joint transform correlators with spatially incoherent illumination // Proceedings of SPIE. 1997. V. 3073. P. 453-457. (WOS, Scopus)
 43. Bykovsky Yu.A., Markilov A.A., Rodin V.G., Smazheliuk M.F., Starikov S.N. Non-coherent correlator with reflective volume holographic filter // Proceedings of SPIE. 1996. V. 2969. P. 454-458. (WOS, Scopus)

44. Bykovsky Yu.A., Lyubchenko A.V., Markilov A.A., Rodin V.G., Starikov S.N. Light spectrum and image structure correlator // Proceedings of SPIE. 1993. V. 2051. P. 969-973. (WOS, Scopus)

Публикации в трудах международных конференций, индексируемые в РИНЦ.

45. Евтихий Н.Н., Краснов В.В., Молодцов Д.Ю., Родин В.Г., Стариков Р.С., Черёмхин П.А. Воспроизведение синтезированных с использованием преобразования Хартли голограмм при помощи микрзеркального модулятора и их применение в задачах оптической обработки информации // Сборник трудов 17-ой межд. конф. «ГОЛОЭКСПО-2020». Москва, 2020. С. 91-96.

46. Евтихий Н.Н., Молодцов Д.Ю., Краснов В.В., Черёмхин П.А., Родин В.Г. Оптические системы с синтезом импульсного отклика для обработки информации в пространственно-некогерентном и немонохроматическом излучении // Сборник трудов 16-ой межд. конф. «ГОЛОЭКСПО-2020». Стрельна, 2019. С. 310-314.

47. Molodtsov D.Yu., Cheremkhin P.A., Krasnov V.V., Rodin V.G. Optical encryption of images in spatially incoherent light using DMD modulator // Proceedings of Digital Holography and 3-D Imaging Topical Meeteng. Bordeaux, France, 2019. P. Th3A.18.

48. Молодцов Д.Ю., Краснов В.В., Черёмхин П.А., Родин В.Г. Применение микрзеркальных модуляторов для вывода голографических и дифракционных оптических элементов в задачах оптического кодирования и распознавания // Сборник трудов 15-ой межд. конф. «ГОЛОЭКСПО-2018». Нижний Новгород, 2018. С. 180-182.

49. Молодцов Д.Ю., Краснов В.В., Черёмхин П.А., Родин В.Г. Некогерентный коррелятор с использованием микрзеркального модулятора для отображения голографических фильтров // Сборник трудов 14-ой межд. конф. «ГОЛОЭКСПО-2017». Звенигород, 2017. С. 248-250.

50. Молодцов Д.Ю., Родин В.Г., Стариков С.Н. Синтез голографических фильтров для дисперсионных корреляторов, использующих схему с одним объективом // Сборник трудов 10 Межд. конф. «ГОЛОЭКСПО-2013». Москва, 2013. С. 271-275.

51. Евтихий Н.Н., Родин В.Г., Солякин И.В., Стариков С.Н., Шапкарина Е.А. Призмный кольцевой интерферометр для регистрации голограмм пространственно-некогерентным излучением с малой временной когерентностью // Сборник трудов 8 Межд. конф. «ГОЛОЭКСПО-2011». Минск, 2011. С. 262-265.

52. Герасимов И.В., Родин В.Г., Стариков С.Н. Итерационный метод бинаризации синтезированных голограмм с использованием диффузии ошибки // Сборник трудов 7 Межд. конф. "ГОЛОЭКСПО-2010". Москва, 2010. С. 311-314.

53. Балан Н.Н., Конник М.В., Маныкин Э.А., Родин В.Г., Солякин И.В., Стариков С.Н., Шапкарина Е.А. Дифракционный коррелятор на основе коммерческой цифровой фотокамеры // Голография: фундаментальные исследования, инновационные проекты и нанотехнологии. Иркутск, 2008. С. 286-291.

54. Родин В.Г., Стариков С.Н. Корреляционный спектроанализатор протяженных источников излучения // Сборник трудов 15 Научно-технич. конф. "Фотометрия и ее метрологическое обеспечение". Москва, 2005. С. 57-60.

55. Быковский Ю.А., Маркилов А.А., Родин В.Г., Стариков С.Н. Инвариантные свойства отражательного толстослойного голографического фильтра // Когерентная оптика и голография. Ярославль, 1997. С. 117-123.

56. Bykovsky Yu.A., Markilov A.A., Rodin V.G., Starikov S.N. The optical information processing with use space incoherent sources of complex spectral structure // Biannual Report 93, 94. Moscow, 1995. P.80-90.