

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ, ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ И ИННОВАЦИЙ
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ им. И. АРАБАЕВА
КЫРГЫЗСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. И. РАЗЗАКОВА

Диссертационный совет Д.05.23.689

На правах рукописи
УДК 681.786:778.38

Исмаилов Джапар Авазович

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ
ДЛЯ ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПУТЁМ
КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 01.04.05-Оптика и 05.13.16 - применение вычислительной
техники, математического моделирования и математических методов в
научных исследованиях (по отраслям)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Бишкек 2025

Работа выполнена в Институте сейсмологии Национальной академии наук Кыргызской республики

Научный консультант

доктор технических наук,
академик Жумалиев К.М.

Официальные оппоненты:

Ведущая организация:

Защита диссертации состоится _____ на заседании диссертационного (дата, время) совета Д.05.23.689 по защите диссертаций на соискание (шифр диссертационного совета) ученой степени доктора наук при при Кыргызском государственном университете им. И. Арабаева и Кыргызском государственном техническом университете им. И. Раззакова по адресу: Кыргызстан, 720026, г. Бишкек, ул. Раззакова, 51, корпус №1, 2-этаж, 213аудитория.

Идентификационный код он-лайн трансляции защиты диссертации:

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеках Кыргызского государственного университета им. И. Арабаева по адресу: Кыргызстан, 720026, г. Бишкек, ул. И. Раззакова, 51 и Кыргызского государственного технического университета им. И. Раззакова по адресу: Кыргызстан, 720044, г. Бишкек, пр. Ч. Айтматова, 66.

Автореферат разослан

Ученый секретарь
диссертационного совета
к.т.н., доцент

У.Т. Керимов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. При работе с большими массивами информации необходимо учитывать, чтобы плотность записываемых данных была высокой, что позволяет сделать устройства хранения и передачи информации более компактными. Кроме того, важную роль играет скорость передачи данных. Выборка и обработка двумерных (а в некоторых случаях и трехмерных) информационных массивов в реальном времени представляют собой одну из наиболее значимых научно-технических проблем. Постоянное увеличение объемов данных, которые необходимо своевременно принимать, анализировать и интерпретировать, стимулирует развитие новых высокопроизводительных информационных технологий и систем, применяемых для решения разнообразных научных, прикладных и хозяйственных задач.

Среди систем, которые эффективно используются в скоростном режиме (что позволяет получать результаты практически в реальном времени), особое место занимают голографические и акустооптические устройства. Благодаря параллельной записи скорость передачи голографической информации достигает очень высоких значений (порядка 10^9 бит/с и более). Однако время ввода, хранения и выборки голографической информации существенно варьируется в зависимости от используемых записывающих сред и других компонентов. В связи с этим крайне важен системный анализ временных характеристик. Необходимо определить, как различные требования к допустимым временным параметрам могут быть хотя бы частично удовлетворены за счет выбора оптимальных компонентов.

Акустооптические устройства также играют значительную роль в передаче информации в реальном времени, как в сочетании с голографическими системами, так и самостоятельно. С их помощью может быть решен широкий круг задач, связанных с быстрой передачей данных. Таким образом, тема настоящей диссертации является весьма актуальной.

Цели и задачи исследования. Целью работы является заложение основ создания высокопроизводительных систем и устройств на базе голографических и акустооптических принципов, способных передавать и обрабатывать временную информацию, в том числе в реальном времени, что позволит использовать их в автоматических системах.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Классифицировать временные информационные процессы в голографических и акустооптических устройствах.
2. Исследовать возможности анализа временных изменений с помощью голографической интерферометрии и предложить новые методы, позволяющие более эффективно изучать временные изменения.
3. Проанализировать процессы, происходящие в голографической интерферометрии реального времени.

4. Оценить возможность одновременной регистрации корреляционной функции изменяющегося во времени объекта с использованием голографической интерферометрии в реальном времени.
5. Исследовать кинетику процессов голографической записи на различных записывающих средах и их влияние на регистрацию изменяющихся во времени процессов.
6. Определить факторы, ограничивающие регистрацию временных изменений процессов и объектов.
7. Изучить временные ограничения, вносимые акустооптическими дефлекторами в голографические системы памяти.
8. Проанализировать особенности прохождения информации в устройствах анализа широкополосных радиочастотных сигналов с использованием акустооптических анализаторов спектра.
9. Исследовать возможность применения акустооптического перестраиваемого фильтра для мультиплексирования голограмм по длине волны.

Методы исследований. Результаты, представленные в диссертации, получены на основе теоретических и экспериментальных исследований с использованием методов когерентной оптики, голографии, фурье-оптики, акустооптики и теории информации.

Научная новизна полученных результатов.

1. Классифицированы и проанализированы временные информационные процессы, происходящие в голографических устройствах.
2. Предложены и апробированы два новых, более эффективных метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии для исследования временных процессов.
3. Установлены предельные возможности голографической интерферометрии реального времени с использованием двухпучкового восстановления голограмм.
4. Проанализированы источники ограничений скорости ввода и вывода голографической информации и даны рекомендации по их частичной компенсации.
5. Проведено исследование кинетики процессов записи в голографических системах и на различных записывающих средах, а также оценено их влияние на временные характеристики и возможность передачи информации в реальном времени.

6. Показано, что акустооптические дефлекторы, несмотря на их высокую эффективность, ограничивают скорость ввода и выборки информации в голографических системах.
7. Продемонстрирована возможность применения акустооптического перестраиваемого фильтра для мультиплексирования голограмм по длине волны.

Практическая значимость полученных результатов.

1. В работе классифицированы временные операции, выполняемые при вводе, хранении, обработке и выборке информации в голографических и акустооптических устройствах, что позволяет оптимизировать эти операции при проектировании систем для решения различных задач.
2. Предложены новые методы двухэкспозиционной интерферометрии с использованием двух опорных пучков, которые повышают эффективность исследования временных процессов.
3. Решена задача сокращения времени получения интерферограмм и коррелограмм за счет их одновременного формирования для идентичных наборов объектов.
4. Изучена кинетика записи голографической информации на различных средах, что позволяет выбирать наиболее подходящие материалы для конкретных задач.
5. Достигнуто сокращение времени выполнения операций за счет их параллельного выполнения.
6. Установлена роль акустооптических элементов в оптимизации временных параметров голографических систем хранения данных и обработки сигналов, что повышает производительность этих устройств.

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Методика записи информации в виде синтезированных Фурье-голограмм с требуемой мультипликацией и реализацией параллельного считывания нескольких страниц.
2. Голографические интерферометры с двумя опорными пучками, позволяющие эффективно исследовать временные процессы в голографических системах на основе серии интерферограмм.
3. Методика двухпучковой записи и двухпучкового восстановления голограмм, обеспечивающая высокую точность реализации голографической интерферометрии реального времени, при которой временные изменения наблюдаются одновременно с их протеканием.
4. Методика записи информации на фототермопластические носители, значительно сокращающая время регистрации.

5. Мультиплексирование голограмм по длине волны с использованием акустооптического перестраиваемого фильтра, что увеличивает количество записываемых голограмм.
6. Наибольшая информационная производительность достигается в устройствах с комбинацией АОСА, использующих пространственное и временное интегрирование и работающих параллельно. Такая производительность может быть обеспечена в режиме радиоэфирного наблюдения и анализа.
7. АОПФ на основе монокристаллов TeO_2 , обеспечивающий подтверждение подлинности документов путем проверки специальных отражающих рельефных рисунков и спектрального состава фона.

Личный вклад автора. Автором поставлены задачи исследования, разработаны методы голографической интерферометрии с использованием двух опорных пучков, проведена запись голографической информации на фототермопластических средах и выполнен анализ полученных результатов.

Апробация результатов диссертации. Результаты работы представлены на международных конференциях и семинарах, включая:

- 2-ю Всесоюзную конференцию «Оптическая обработка информации» (1990, Фрунзе, Кыргызстан);
- Международную конференцию «Голография и оптическая обработка информации» (1996, Нанкин, Китай);
- Международный семинар «Голография и оптическая обработка информации» (1997, 2001, Бишкек, Кыргызстан);
- Международную конференцию «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе» (2004, Бишкек, Кыргызстан);
- Международный семинар «Оптика и фотоника» (2012, Бишкек, Кыргызстан);
- Международную конференцию «Оптика и фотоника» (2013, Самарканд, Узбекистан; 2014, Токио, Япония);
- Международную конференцию «Фотоника и информационная оптика» (2015, Москва, Россия);
- Международную конференцию «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы» (2020, Ташкент, Узбекистан);
- Международную научную конференцию «Проблемы интеграции науки, образования и производства» (2022, 2023, Ош, Кыргызстан).

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. Основные результаты исследований опубликованы в 63 работах, включая 20 зарубежных публикаций и 6 работ под единоличным авторством.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, содержащего 228 наименований. Общий объем работы составляет 247 страниц, включая 64 рисунка.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В введении дана общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, указана цель и поставлены задачи работы, показана ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы защищаемые положения.

В первой главе:

Проведен обзор голографических методов исследования временных процессов. Рассмотрены методы голографической интерферометрии которые позволяют измерять микроскопические изменения в объекте путем записи и сравнения голограмм объекта до и после воздействия определенного внешнего фактора. Существует несколько разновидностей голографической интерферометрии, каждая из которых имеет свои особенности и области применения.

Метод реального масштаба времени основан на интерференции волны, восстановленной голограммой и волны отраженной от предмета во время наблюдения. Интерферометрическое исследование в реальном масштабе времени может быть осуществлено на обычной голографической установке с внеосевым опорным пучком, по схеме, которая изображена на рисунке 1.

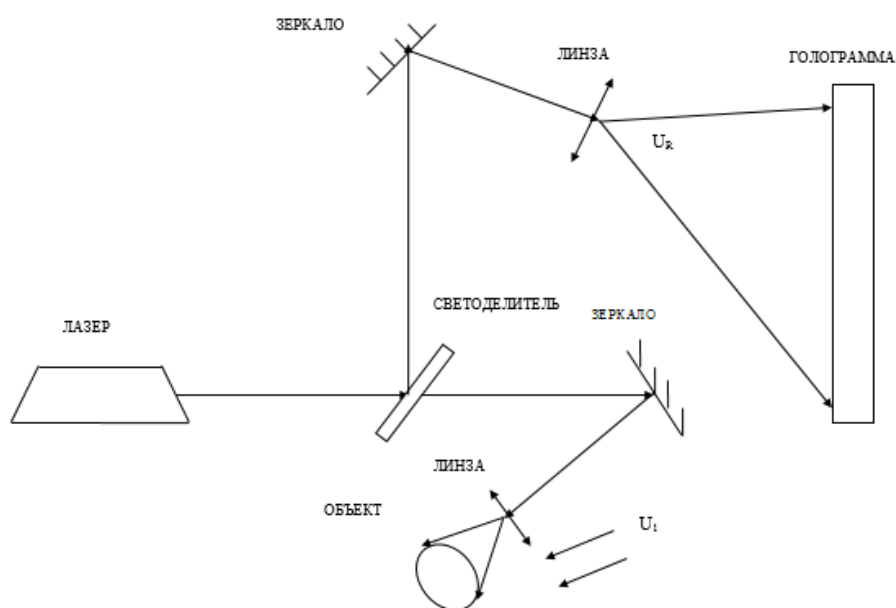


Рис.1. Вне-осевая схема регистрации голографической интерферометрии.
 U_R - опорный пучок; U_I - предметный пучок.

Поскольку интерференционные полосы наблюдаются в процессе деформации или перемещения, то этот метод называют методом голографической интерферометрии в реальном масштабе времени. Вид интерференционной картины определяется изменениями, которым подвергается объект, а также схемой голографической установки. Проведем количественный анализ распределения полос. Пусть голограмма записана предметной волной

рассеянной объектом $\bar{U}_n(x, y) = U_1(x, y) \exp[i\varphi(x, y)]$ и плоской волной $\bar{U}_0(x, y) = \bar{U}_R$ Интенсивность регистрируемого поля в плоскости голограммы

$$J(x, y) = (\bar{U}_n + \bar{U}_R)^2 = (\bar{U}_n + \bar{U}_R)(U_n^* + U_R^*) = U_n^2 + U_R^2 + \bar{U}_n \cdot \bar{U}_R^* + \bar{U}_n^* \cdot \bar{U}_R \quad (1)$$

Фотопластинка экспонируется распределением освещенности, соответствующим формуле (1), затем проявляется так, что ее амплитудное пропускание $T(x, y)$ пропорционально $J(x, y)$

$$T(x, y) = T_0 + \alpha(\bar{U}_n \cdot \bar{U}_R^* + \bar{U}_n^* \cdot \bar{U}_R), \quad (2)$$

где T_0 пропорционален первым двум слагаемым в (1); α - коэффициент пропорциональности, зависящий от применяемого фотографического процесса. Мы здесь ограничились чисто амплитудной записью этого распределения, когда фотослой реагирует на освещенность только своим пропусканием.

После проявления, как уже отмечалось, голограмма помещается на прежнее место и освещается волной, которая представляет собой сумму волн, рассеянных объектом и опорного пучка первоначальной формы. Если изменение, происшедшее с объектом, невелико, то амплитуда рассеянного им излучения остается практически той же, фаза же меняется. Поэтому новую объектную волну можно записать в виде $\bar{U}'_n = \bar{U}_1(x, y) \exp[i\theta(x, y)]$. Результирующая волна $\psi(x, y)$ имеет вид:

$$\psi(x, y) = T(x, y)(\bar{U}'_n + \bar{U}_R) = T_0 \bar{U}'_n + \alpha \bar{U}_n U'_n U_R^* + \alpha \bar{U}_n^* \bar{U}_R \bar{U}'_n + T_0 U'_n + \alpha \bar{U}_n U_R^2 + \alpha U_R^2 U_n^* \quad (3)$$

Слагаемые в выражении (3) представляют собой волны, распространяющиеся в различных направлениях. Первое и пятое слагаемые соответствуют направлению распространения первоначальной волны. Собирая эти два члена выражения, получим:

$$\psi_0(x, y) = T_0 \bar{U}'_n + \alpha U_R^2 \bar{U}_n = T_0 U_1(x, y) \exp[i\theta(x, y)] + \alpha_0 U_R^2 U_1(x, y) \exp[i\varphi(x, y)] \quad (4)$$

Если за время между регистрацией голограммы и последующим наблюдением с объектом не произошло никаких изменений, то две интерферирующие волны будут отличаться одна от другой только постоянными множителями T_0 и $\alpha d / R^2$. При негативной записи голограмм ($\alpha < 0$) волны будут в противофазе ($-I = e^{i\pi}$), и будут везде ослаблять одна другую, а при равенстве их амплитуд - будут полностью гасить.

Если же с объектом произошли какие-либо изменения, то мы будем наблюдать интерференционную картину, структура которой определяется этими изменениями.

Контраст интерференционной картины будет определяться соотношением интенсивностей интерферирующих волн. Для того чтобы уравнивать эти интенсивности, на стадии наблюдения можно вводить в опорный или предметный пучок ослабляющие высококачественные фильтры.

Метод реального масштаба времени обладает тем существенным достоинством, что с помощью одной голограммы, полученной в исходном состоянии объекта, можно с интерферометрической точностью исследовать динамику происходящего с ним процесса, изучая последовательно множество его состояний. Если при восстановлении волнового фронта изменить наклон восстанавливающего пучка, то можно получить систему несущих полос конечной ширины, ориентация и частота которых по желанию наблюдателя будут задаваться направлением и величиной наклона пучка. Эти полосы облегчают и уточняют расшифровку интерференционной картины и позволяют идентифицировать знак фазовых изменений, вносимых объектом.

Голографическая интерферометрия в реальном масштабе времени усложняется рядом факторов. Чтобы интерференционная картина наблюдалась вообще и чтобы по ней можно было судить о смещении предмета, о положении предмета и о его освещении при наблюдении через обработанную голограмму, установленную в исходное положение, должны быть точно такими же, как при получении голограммы. Это означает, что предмет, оптические детали голографической установки либо должны оставаться в фиксированном положении в течении времени между экспонированием и наблюдением, либо могут быть возвращены в исходное положение с большой точностью.

Метод двойной экспозиции наиболее распространен и заключается в следующем. В методе двойной экспозиции на фотопластинку записываются два последовательных состояния объекта. Сначала получают голограмму исследуемого предмета в первоначальном состоянии, т. е. не нагруженного, не нагретого и не деформированного. Затем предмет подвергают внешним воздействиям и на ту же фотопластинку записывают голограмму его измененного состояния. Так как запись вторично производится на ту же голограмму, необходимо обеспечить стабильность установки в промежутке между экспозициями. При восстановлении голограммы суперпозиция волновых фронтов этих состояний дает интерференционную картину, которая покрывает изображение объекта и позволяет определить величину его смещения.

При восстановлении изображения с двукратно экспонированной голограммы наблюдается результат интерференции полей, существующих в разные моменты времени - во-первых, волнового поля, несущего информацию о первоначальном состоянии объекта, и, во-вторых, волнового поля, несущего информацию о его измененном состоянии. В результате на изображение объекта накладывается сеть интерференционных полос, по которым определяют изменения, происшедшие с объектом. Метод двух экспозиций применяют для изучения поверхностной деформации тел, контроля сварных швов, обнаружения трещин, пузырей, непроваров и так далее.

В методе с двойной экспозицией используется внеосевая схема, подобная той, которая изображена на рисунке 1. Предположим, что в некоторый момент времени t_1 , во внеосевой голографической схеме регистрируется предметная волна $\bar{U}_1(x, y)$, рассеянная от объекта (рис.1). а - схема получения; 1 - лазер; 2 - расщипитель пучка; 3 и 6 - линзовые системы; 4 и 5 - зеркала; 7 - объект; 8 -

фотопластинка. б - схема восстановления; 1 - лазер; 2 - линзовая система; 3 - зеркало; 4 - голограмма.

В методе двух экспозиций используется голографическая схема, подобная изображенной на рисунке 2. Для примера предположим, что объектом в этой схеме служит турбинная лопатка и что определяется ее отклик на воздействие механической силы. На одну фотопластинку регистрируются две голограммы объекта, находящегося в двух разных состояниях: ненагруженном и нагруженном. При освещении проявленной фотопластинки восстанавливающей волной, идентичной опорной волне, использовавшейся на стадии регистрации, наблюдатель, смотрящий через голограмму, увидит трехмерное мнимое изображение турбинной лопатки с наложенной на него картиной интерференционных полос (рис. 2). Наблюдатель заметит также, что полосы локализованы в пространстве, причем не обязательно на поверхности турбинной лопатки, и слегка смещаются и изменяют свою форму при изменении направления наблюдения. Анализ наблюдаемой интерференционной картины позволяет выявить созданные нагрузкой деформации и установить опасные места.

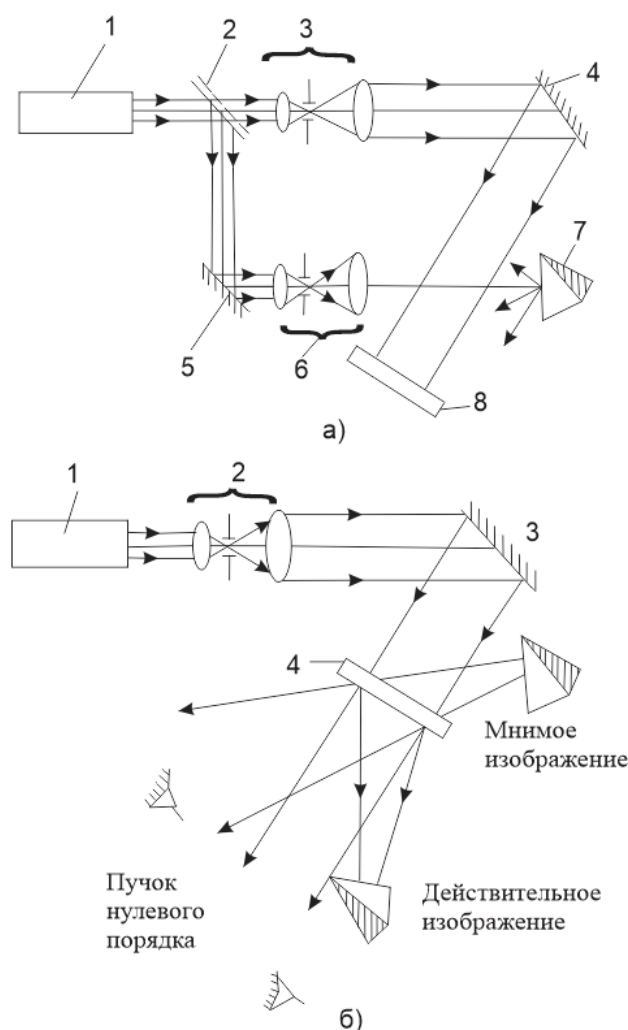


Рисунок 2. Метод двойной экспозиции

Через некоторый интервал времени t_2 на той же самой фотопластинке регистрируется волна $\bar{U}_2(x, y)$, рассеянная объектом в нагруженном состоянии. Обе волны экспонируются одновременно с опорной волной \bar{U}_R . После проявления такой фотопластинки получается дважды экспонированная голограмма. При освещении такой голограммы волной \bar{U}_R восстанавливается волна, комплексная амплитуда которой пропорциональна сумме $\bar{U}_1(x, y) + \bar{U}_2(x, y)$, а интенсивность определяется выражением:

$$J(x, y) = |\bar{U}_1(x, y) + \bar{U}_2(x, y)|^2 \quad (5)$$

В связи с тем, что деформация (перемещение), рассматриваемые голографической интерферометрией, обычно малы в сравнении с пространственной протяженностью объекта, предметные волны могут быть выражены следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{U}_1(x, y) &= \bar{U}_0(x, y) = a(x, y) \exp[-i\varphi(x)] \\ \bar{U}_2(x, y) &= \bar{U}'_0(x, y) = a(x, y) \exp\{-i[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)]\} \end{aligned} \quad (6)$$

Следовательно, распределение интенсивности в восстановленном изображении можно записать:

$$\begin{aligned} J(x, y) &= |a(x, y) \exp[-i\varphi(x, y)] + a(x, y) \exp\{-i[\varphi(x, y) + \Delta\varphi(x, y)]\}|^2 = \\ &= 2a^2(x, y) \{1 + \cos[\Delta\varphi(x, y)]\} \end{aligned} \quad (7)$$

Распределение интенсивности восстановленного изображения является функцией интенсивности точки (a^2) объекта, промодулированной по закону косинуса, вследствие изменения фазы в результате смещения объекта. Темные полосы - это линии, вдоль которых значения фазы $\Delta\varphi$ являются нечетными, кратными числа π , светлые полосы - линии постоянных значений фазы $\Delta\varphi$, являющиеся четными кратными числа π . В различных случаях изменение фазы $\Delta\varphi$ может быть связано с различными физическими величинами, например смещением, вращением, деформацией, изгибающим моментом, колебаниями, температурой, давлением, концентрацией массы, электронной плотностью или напряжением.

При использовании метода двойной экспозиции отпадает необходимость точного возвращения химически обработанной фотопластинки в то положение, которое она занимала при экспозиции. Если экспонирование объекта в двух состояниях сделано излучением одной и той же продолжительностью и интенсивностью, то получаются высококонтрастные интерференционные картины. Однако это условие не выполняется для определенного класса фотоматериалов, как например, фототермопластических носителей, из-за специфичности записи голографической информации на них. Пути преодоления этого недостатка описаны в третьей главе настоящей работы.

Методики интерпретаций голографических интерферограмм одинаковы для обоих методов голографической интерферометрии и одна из них описана ниже.

При интерпретации голографических интерферограмм получила распространение так называемая геометрическая модель, устанавливающая

связь между геометрическими параметрами оптической схемы, вектором перемещения в рассматриваемой точке поверхности тела и наблюдаемой картиной интерференционных полос в виде

$$(\bar{e}_s - \bar{e}_1)\bar{x} = \left(N_1 - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (8)$$

где N_1 - абсолютный порядок темной интерференционной полосы в рассматриваемой точке; \bar{e}_1 - единичный вектор направления освещения; \bar{x} - вектор перемещения; λ - длина волны используемого источника света; \bar{e}_s - единичный вектор направления наблюдения. Уравнение (8) можно переписать следующим образом:

$$\bar{k}_1\bar{x} = \left(N_1 - \frac{1}{2}\right)\lambda \quad (9)$$

где $\bar{k}_1 = \bar{e}_s - \bar{e}_1$ - вектор чувствительности, направленный по биссектрисе угла, образованного направлениями освещения и наблюдения.

В голографической интерферометрии диффузно-отражающих объектов картина интерференционных полос представляет собой геометрической место точек равной проекции вектора перемещений на направление вектора чувствительности. В общем, направление обоих этих векторов изменяется по исследуемой поверхности тела. Расшифровка голографических интерферограмм значительно упрощается при использовании сдвиговой голографической интерферометрии.

Простейшая схема голографической сдвиговой интерферометрии, основанной на исследовании интерференционными методами волнового фронта, восстановленного с голограммы сфокусированного изображения, полученной методом однократного экспонирования. В фокальной плоскости объектива О устанавливается устройство N для разделения пучка на два и наложения этих пучков в плоскости наблюдения Э, оптически сопряженной с плоскостью голограммы Г (рис. 3).

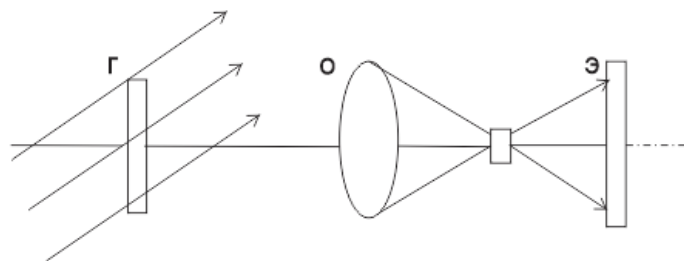


Рис.3. Простейшая схема голографической сдвиговой интерферометрии

В качестве таких устройств могут быть использованы дифракционная решетка, зеркальная оптическая система, поляризационные призмы и т.д.. При выполнении условия когерентности полученных таким образом вторичных источников света на экране наблюдается интерференционная картина. Качество картины определяется, прежде всего, контрастом интерференционных полос. В предлагаемой схеме контраст интерференционных полос на интерферограмме сдвига неодинаков в результате неравномерного пропускания голограммы. Для

устранения этих недостатков необходимо выполнение множества дополнительных условий, в том числе выбор соответствующих источников света и фотоматериалов, а также светоделительного устройства.

Все рассмотренные методы могут быть использованы для исследования временных процессов происходящих в объектах. Однако для повышения эффективности исследования приходится записывать несколько голограмм на одной той же поверхности фотоматериала. Это требует разработки специальных методов голографической интерферометрии, а также исследовании качества записанных голограмм.

Ниже приведены последовательная запись серии двух-экспозиционных голографических интерферограмм изменяющегося объекта на различные участки фотоматериала.

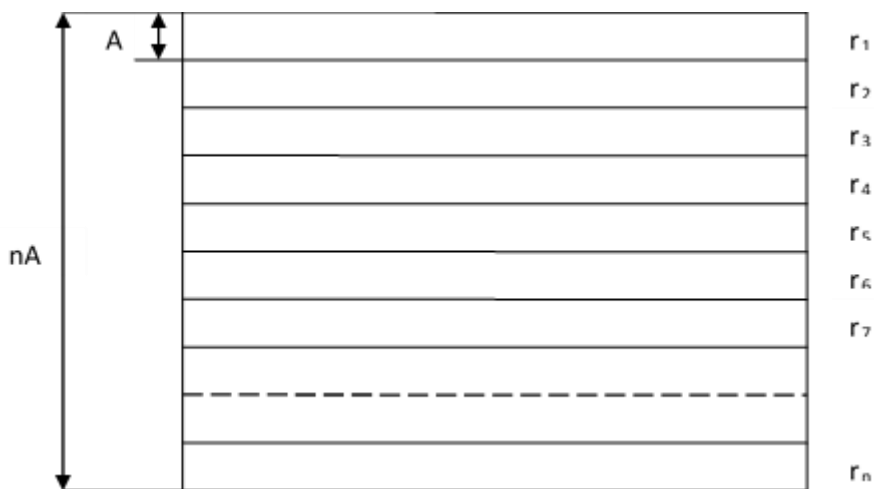


Рис.4. Серия голографических интерферограмм записанная на плоском носителе; n – количество голографических интерферограмм; A – ширина полосы.

На рис. 1.7.1 видно, что с ростом количества записываемых состояний изменяющегося объекта и соответственно голографических интерферограмм уменьшаются размеры записываемых голограмм. С уменьшением размеров голограмм растут размеры элементов пятнистой структуры и ухудшается разрешающая способность, и эти факторы приводят к уменьшению отношения сигнал/шум, следствием которого является большая погрешность в измерении. Для количественного анализа приведем следующие формулы.

Отношение сигнал/шум в изображении, восстановленном с голограммы

$$\frac{J_c}{J_u} = \frac{Ad}{\lambda l}, \quad (10)$$

где A, d -линейные размеры голограммы и считывающего отверстия; l - расстояние от объекта до голограммы; λ -длина волны лазерного излучения.

Зависимость $\frac{J_c}{J_u}$ от A носит прямоугольный характер. Допустим размеры

фото-пластины равны 20×20 см² и на ней записаны 10 двух-экспозиционных интерферограмм, тогда $A=2$ см. Если $d=100$ мкм; $\lambda=0,63$ мкм и $l=20$ см, то

$$\frac{J_c}{J_u} = 15.$$

Абсолютная погрешность определения порядков интерференционных полос [35]

$$\Delta N = \frac{1}{\pi} \arccos \left(1 - \frac{J_c}{J_u} \right) \quad (11)$$

Если $\frac{J_c}{J_u} = 15$, то в приведении к одной полосе относительная погрешность измерения $\Delta N/N$ обусловленная шумами, вносимыми голограммой равняется 11%.

На рисунке 5 приведены графики зависимости $\frac{J_c}{J_u}(A)$ при $d=100$ мкм, $\lambda=0,63$ мкм, различных l и $\Delta N/N(A)$. С уменьшением l $\frac{J_c}{J_u}$ возрастает и это вызывает значительный рост погрешности измерения при расшифровке голографических интерферограмм.

Уменьшение линейного размера голограммы нежелательно также с точки зрения расшифровки голографических интерферограмм. Известно, что при расшифровке голографических интерферограмм используются в основном два метода, предложенных В.Б. Александровым и А.М. Бонч-Бруевичем, когда неизвестна нулевая полоса; и А.Е. Энносом, когда известна нулевая полоса. С целью определения влияния размера голограммы на точность измерения при расшифровке интерферограмм рассмотрим один из двух методов, например, более универсальный первый метод. В этом методе для определения трехмерного вектора перемещения наблюдатель проводит счет полос, непрерывно перемещая глаз в пределах апертуры голограммы и визируя данную точку с различных четырех ракурсов.

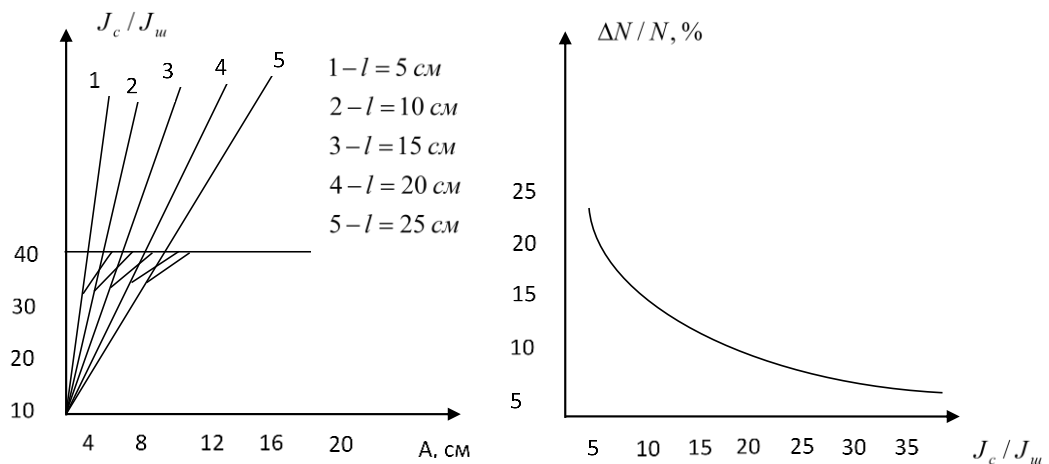


Рисунок 5. Зависимости $J_c/J_u(A)$ и $\Delta N/N(A)$

Поэтому размеры голограммы должны быть достаточными для визуализации прохождения через данную точку хотя бы одной полосы. Рассмотрим случай определения вектора перемещения, когда направление перемещения \bar{L} априори известно, (рис.6). Обозначим через Q_1 и Q_2 две крайние точки голограммы H , \bar{K}_1 , волновой вектор в направлении наблюдения Q_1P , а \bar{K}_2 в направлении Q_2P и \bar{K}_1 и \bar{K}_2 симметричны относительно оси x , φ - угол между ними и l - расстояние между точкой наблюдения P и голограммой H

Пусть при смещении направления наблюдения из точки Q_1 , в точку Q_2 визуализируются прохождения через точку P N - интерференционных полос. Тогда вектор перемещения L определяется формулой

$$L = \frac{\lambda \cdot N}{2 \sin \varphi \cdot \cos \psi} \quad (12)$$

где ψ - угол между вектором перемещения L и биссектрисой угла 2φ . Из рисунка 1.5.3 можно получить следующую формулу

$$\sin \varphi = \frac{A \cos \varphi}{2l} \quad (13)$$

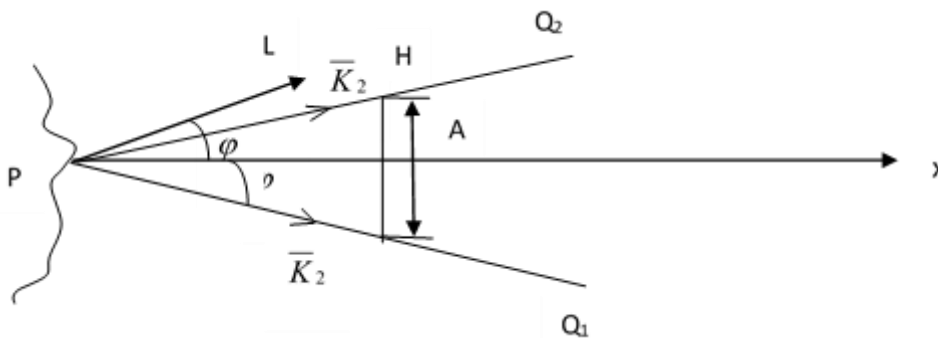


Рис. 6. Определение вектора перемещения

Подставляя в (12) вместо $\sin \varphi$ из (13), получаем

$$A = \frac{N \cdot l \lambda}{L \cos \varphi \cdot \cos \psi}$$

Пусть $L = \lambda = 0,63 \text{ мкм}$; $l = 5 \text{ см}$, $\cos \psi = 1$ (\bar{L} совпадает с осью x) и $N=1$, т.е. через точку P проходит единственная интерференционная полоса. Тогда из формулы (1.7.2) $\varphi = 30^\circ$, а $A = 23,1 \text{ см}$. На рис. 1.7.4 приведен график зависимости $A(l)$ при $\cos \psi = 1$, $N = 1$ и различных углах φ .

Как видно из графика, зависимость $A(l)$ прямолинейная. Из проведенного анализа вытекает, что использование методики получения голографических интерферограмм на плоских носителях оправдывает себя, когда направление вектора перемещения априори известно и чувствительность схемы голографического интерферометра соответствующим образом подобрана, а также объект имеет приблизительно равные размеры с голограммой. Когда

объект имеет большие размеры и направление вектора перемещения неизвестно, то желательно использовать объемные регистрирующие среды, при этом используя весь объем и всю площадь регистрирующей среды.

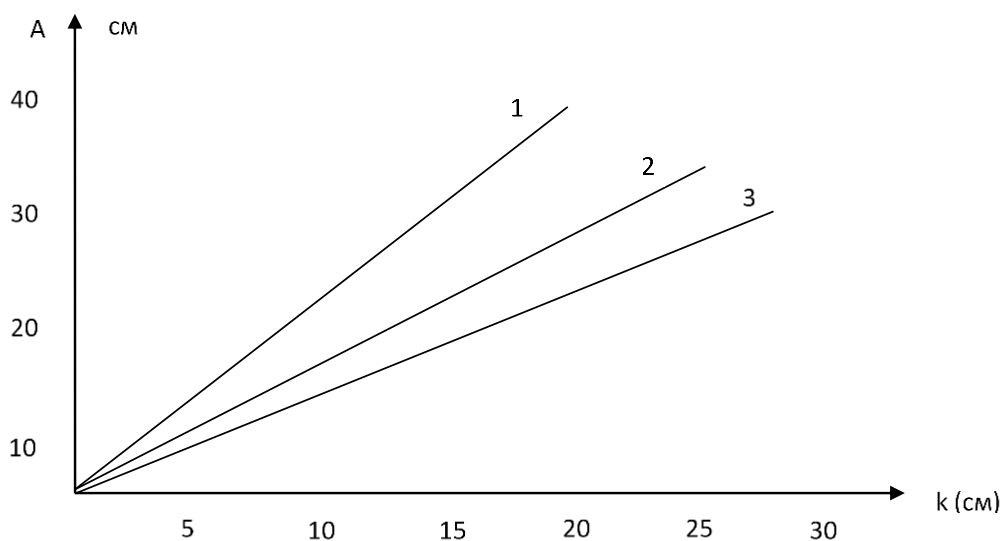


Рис. 7. Зависимость $A(l)$: 1) $\varphi = 60^\circ$; 2) $\varphi = 45^\circ$; 3) $\varphi = 30^\circ$.

В настоящее время голография в трехмерных регистрирующих средах нашла применение в различных областях науки и техники, в частности в изобразительной голографии, в создании голограммных отражательных фокусирующих элементов, в записи и последующем считывании информации с чрезвычайно большой емкостью, в динамической голографии и др. Объемные регистрирующие среды также успешно используются в голографической интерферометрии с целью исключения побочных перемещений объекта использовали метод записи голограммы во встречных пучках (рис.8), предложенный Ю.Н. Денисюком. Как видно из рисунке 8, объемная регистрирующая среда жестко связана с поверхностью исследуемого объекта с помощью зажимов, в которых пластинка закреплена так, что ее эмульсия находится от поверхности объекта на расстоянии порядка 1 см или меньше. При каждой экспозиции в процессе получения двухэкспозиционной голографической интерферограммы пластинка и объект освещаются одной и той же сферической волной с большим радиусом кривизны. В этом случае отраженный в обратном направлении свет образует предметную волну, а лазерный свет, проходящий через голограмму в прямом направлении, служит опорной волной. Разность фаз между двумя волнами практически не зависит от расстояния между точечным источником и голограммой, поэтому интерферограмма совершенно нечувствительна к перемещению объекта как целого. Изображения, восстанавливаемые голограммами во встречных пучках можно наблюдать в белом свете. Известные методы голографической интерферометрии, использующие трехмерные регистрирующие среды в голографической интерферометрии ограничивается лишь получением однократной или двукратной двух-экспозиционной интерферограммы в связи с отсутствием способа получения наложенных двух- экспозиционных интерферограмм.

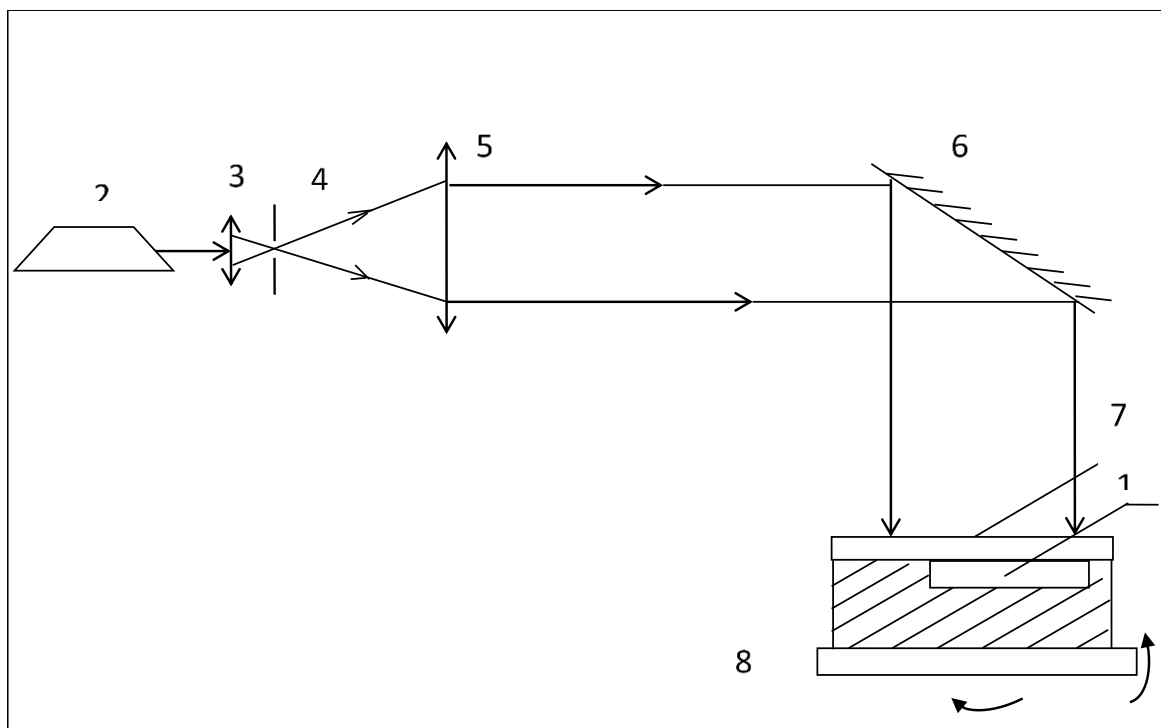


Рис. 8. Схема установки для исследования деформации консольной балки

Характерным недостатком вышеизложенных способов получения голографической интерферометрии является ограниченность диапазона измеряемых величин, т.к. большие перемещения, диффузно отражающих деформаций и фазовые изменения прозрачных объектов между двумя экспозициями в случае двух-экспозиционной интерферометрии, между двумя наблюдениями в методе реального времени приводят к потере корреляции фронтов восстанавливаемых волн. Это приводит к полному исчезновению наблюдаемых интерференционных полос .

Верхний предел измерения определяется максимальной пространственной частотой зернистого изображения, которое составляют структуры 20-50 лин/мм. При цене полосы $\lambda/2$ верхний предел равняется 10-25 мкм, если $\lambda=0,63$ мкм, максимальный градиент составляет 6-15 мкм/мм.

Напротив, наложенные двух-экспозиционные интерферограммы позволяют исследовать непрерывный процесс изменения объекта с большими интервалами времени по сравнению с двух-экспозиционной интерферометрией или методы реального времени, а также открывают новые возможности в измерении с помощью импульсной голографической интерферометрии.

Поэтому разработка методов записи и восстановления наложенных двух-экспозиционных интерферограмм в объемных регистрирующих средах является перспективным.

Нами предложен способ получения наложенных двух-экспозиционных интерферограмм в объемных регистрирующих средах, заключающийся в следующем . Пучок когерентного света разделяют на два опорных и предметный

пучки, голограмму исходного состояния объектов записывают с одним опорным пучком, затем регистрируют с помощью двух опорных пучков $2n$ наложенных голограмм объекта, последовательно в n его состояниях, причем угол падения каждого опорного пучка на регистрирующую среду изменяют после каждой двух регистраций с использованием этого опорного пучка, а при восстановлении голограмм изменяют угол восстанавливающего пучка в диапазоне изменения углов опорных пучков при записи.

Использование предложенного способа позволяет провести измерения в объекте по серии двух-экспозиционных голографических интерферограмм, а не на одной как в известных способах. В результате данный способ позволяет расширить области применения за счет измерения деформации, перемещений диффузно-отражающих объектов, фазовых изменений в прозрачных объектах в n раз больше интервал времени чем в известных способах. Способ применим также к голографическому исследованию быстропротекающих процессов.

Во второй главе рассмотрены временные процессы в голографических устройствах. Каждой операции должно соответствовать свое обеспечение, определенное устройство или группа устройств (комплекс), реализующие данную операцию - блоки, из которых состоит голографическое устройство. В различных случаях часть блоков может отсутствовать (но не каждая), и связаны они могут быть друг с другом по-разному. Разными также могут быть физические принципы, на основе которых в различных случаях может реализоваться каждый из необходимых механизмов. Связи между блоками зависят от характера и формы записывающих звеньев (в виде линеек, в матричном виде, в виде лент, дисков мягких или жестких или цилиндров и т.п.).

Соответственно этому может быть реализовано значительное число вариантов голографических устройств. Рассмотрим в качестве примера голографическое запоминающее устройство (ГЗУ). В наиболее общем виде схема ГЗУ представлена на рисунке 9. Для разных модификаций она может варьироваться, что будет показано при рассмотрении конкретных устройств. Набор блоков можно разделить на 3 части, из которых за редким исключением одновременно работают две: либо I и II - при вводе информации в блок хранения, либо I и III - при выборке информации.

Общими для первой и второй части являются: источник света - лазер, первый блок адресации (как правило, акустооптический дефлектор), расщепитель света на два пучка - объектный и опорный, а также блок хранения информации (блок набора голограмм). Общим для второй и третьей части является блок набора голограмм. В первую часть, кроме перечисленных блоков входят: источник вводимой информации, формирователь набора информации (набора данных или изображения), которым является пространственный модулятор света (ПМС) и первая группа линз и необходимой оптики, обеспечивающей нужное совмещение объектного и опорного пучков при формировании голограммы. Во вторую часть, кроме оптики, направляющей опорный пучок, входит второй блок адресации, обычно используемый при

мультиплексировании в объемном блоке хранения голограмм. В третьей части, помимо второй группы линз, содержится матрица фотоприемников, на которую проецируется изображение, восстановленное с выбранной голограммы и третий блок адресации, используемый, если изображение не является конечным продуктом выборки и из набора пикселей требуется выбрать заданное данное. Набор блоков, содержащихся в ГЗУ, показан на рисунке 10.

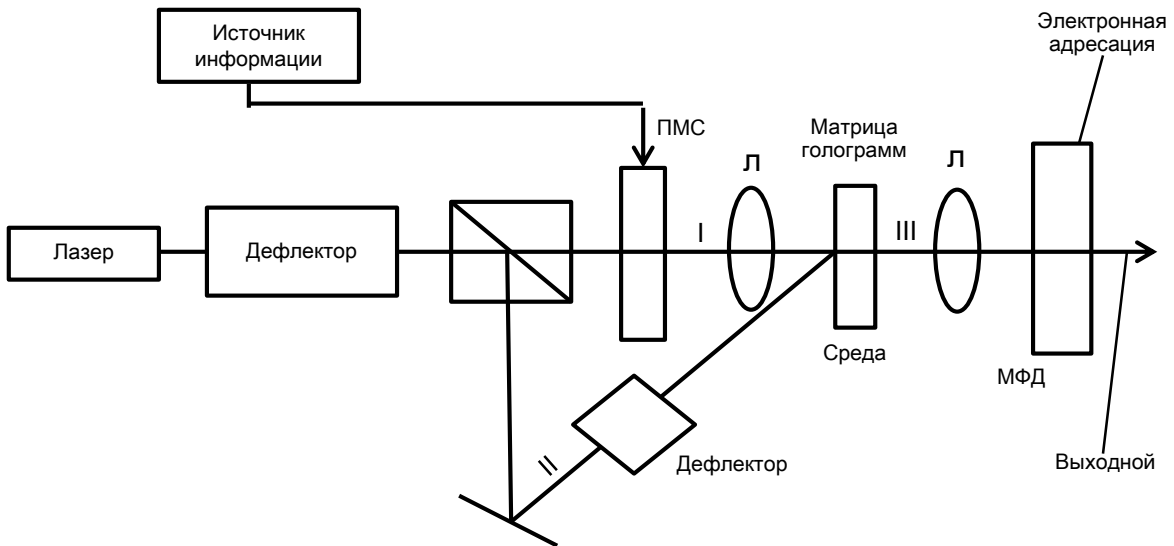


Рисунок 9. Блок-схема голографической памяти

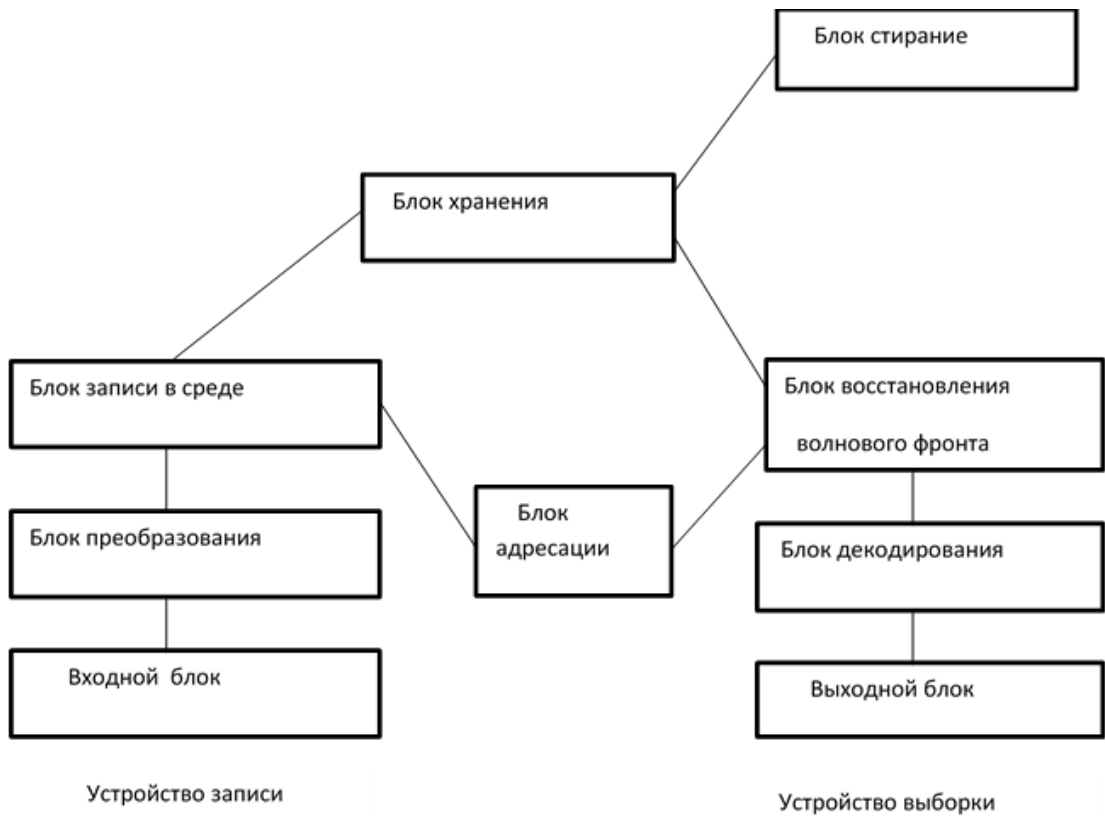


Рис. 10. Набор блоков в ГЗУ.

Кроме общей связи между блоками, между отдельными блоками существует специфическая связь. Так число пикселей, формируемых в ПМС и вводимых в виде определенной голограммы в блок хранения должно в точности соответствовать числу пикселей, воспринимаемых матрицей фотодетекторов. Число голограмм, хранимых в блоке, жестко не связано с числом пикселей в ПМС и матрице фотодетекторов. Определенная зависимость между ними существует, и она будет рассмотрена позднее.

Здесь же следует отметить, что с ней связано соотношение между количествами информации вводимых и выбираемых параллельно и последовательно. Число пикселей определяет объем информации, хранящейся в голограмме в блоке хранения, вводимых и выбираемых параллельно. Число голограмм в блоке хранения определяет величину объема информации вводимых и выбираемых последовательно.

Предельным случаем полностью последовательно вводимой и выбираемой информации является система побитовой оптической памяти. Предельным случаем полностью параллельного ввода и вывода информации является система, в которой блок хранения содержит только одну голограмму (рис. 11). Распространенным случаем систем голографической памяти, является промежуточный случай, когда часть хранимой в блоке хранения голограмм передается параллельно, а часть последовательно. Ниже будет показано, что оптимальное соотношение между этими потоками зависит от характера информационных процессов, происходящих в системе голографической памяти.

Ввод информации в ГЗУ зависит от вида вводимой информации и характеристик ПМС, через который информация вводится. Особенностью ПМС должно быть в данном случае то, что проходящая через ПМС информация должна быть представлена когерентным светом.

Кодирование информации производится в ГЗУ вследствие преобразования волнового фронта от набора информации в интерференционную картину, содержащую ту же информацию или достаточную ее часть, что и в самом волновом фронте. Далее производится запись информации на носитель. Блок хранения действует вместе с распределителем информации, блоком адресации, отправляющим поступающий набор информации в пространственную страницу с заданным адресом или приданным ей признаком, ключом, по которому она в дальнейшем может быть извлечена из массива другой информации.

Характер записи в среду не отличается от других систем (например, оптических побитовых), хотя требования к ходу протекания процесса и к материалу среды существенно различны и, соответственно, может отличаться структура и механизм записи информации.

Механизм извлечения информации в ГЗУ специфичен, он отличается от механизма извлечения информации даже и в оптических побитовых устройствах. Это механизм восстановления волнового фронта. Восстанавливается, как правило, волновой фронт массива информации. При этом осуществляется и декодирование. Массив информации, распределенный по

всей или части поверхности среды, преобразуется в пространственно разделенную информацию, что позволяет в дальнейшем выделить нужную информацию из массива. Вывод информации из ГЗУ существенно не отличается от вывода информации из других запоминающих устройств.

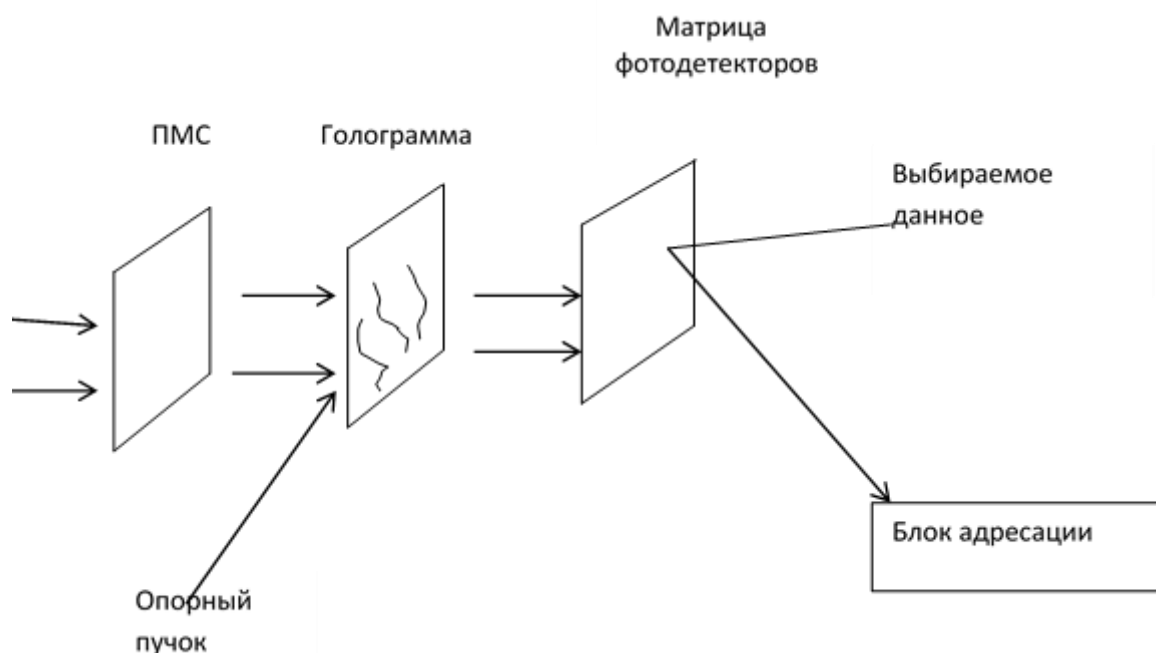


Рис.11. Голографическая память с хранением и выборкой данных одной Страницы

Временные процессы при вводе информации включают набор страницы данных для ввода в голограмму, адресацию голограмм на заданную площадку и временные процессы при записи голограмм. Каждой голограмме соответствует страница данных или изображение и в системе голографической памяти должно иметься устройство, формирующее эту страницу. Для нормальной работы памяти данные должны быть введены не любым образом, а так, чтобы на записывающей среде с помощью оптической схемы, элементом которой является часть устройства ввода данных, могла быть сформирована голографическая интерферограмма. Для этого данные должны переноситься когерентным светом. Чтобы это произошло, необходимо иметь модулятор постороннего источника когерентного света (например, лазера). Модулировать луч лазера оптическими параметрами, соответствующими вводимым данным, можно с помощью модулятора - транспаранта, либо с помощью модулятора - отражателя.

Независимо от типа устройства ввода оно характеризуется в разной степени следующими показателями:

1. Скоростью формирования кадров; в случае ввода изображения со скоростью, в которой оно может быть введено в модулятор и преобразовано в записывающее когерентное изображение; в случае страниц данных - скоростью набора данных в страницу. В любом случае, чем выше эта скорость, тем лучше устройство. Но при последовательном наборе - чем больше этот набор, тем

меньше скорость его заполнения.

2. Скоростью замены кадров; эта скорость зависит от скорости формирования кадров, но не только от нее. Скорость замены кадров уменьшается при необходимости отдельного времени, затрачиваемого на стирание, а в некоторых модуляторах и на операции, предшествующие вводу новых данных.

3. Емкостью информации, вводимой в кадр, в страницу. И здесь желательно, чтобы она была как можно больше. Однако, вследствие невозможности иметь и очень большую скорость смены кадров и большую емкость, а также учитывая влияние последней на размер записываемых голограмм, на первых порах, предлагалась емкость $128 \times 128 \approx 1,6 \cdot 10^4$ бит бинарной информации, но в последнее время чаще ориентируются на создание устройства ввода с емкостью $1024 \times 1024 \approx 10^6$ бит.

4. Плотностью расположения информации в модуляторе. Чем выше возможная плотность вводимой информации, тем удобнее устройство ввода, и тем лучше характеристики системы в целом. К сожалению, как правило, ПВМС с электронным вводом значительно отстают по разрешающей способности от лучших сред для записи информации. В случае ПВМС удовлетворительными считаются размеры элемента в десятки мкм. Желательно иметь более высокое разрешение, чем это.

5. Контрастом и отношением сигнал/шум формируемого кадра, страницы данных. Учитывая, что голографическая память - сложное многозвенное устройство, необходимо, чтобы был достаточный запас на входе, позволяющий при прохождении ряда звеньев на выходе получать достаточно надежные данные. Помимо требований к ПВМС, связанных с перечисленными показателями, от этих устройств требуется высокая пространственная однородность, хорошая повторяемость при одинаковых воздействиях в разные интервалы времени, высокий срок службы, высокое качество стирания информации. И требования могут по-разному удовлетворяться при различных назначениях памяти.

Оценивая время записи страницы данных (соответствующей одной голограмме), необходимо определить время, затрачиваемое на адресацию, связанную с изменением направления записывающих пучков на заданную площадку голограммы.

Имеются две возможности перехода записывающих пучков от одной голограммы к другой: отклонением пучков или смещением среды таким образом, чтобы под записывающие пучки попадала новая требуемая площадка. На практике используются обе эти возможности.

В первом случае необходимо использовать устройства, обеспечивающие при изменении адреса точное попадание лазерного пучка на заданный участок среды при записи, считывании и стирании информации. Если используется мультиплексирование, то пучок должен попадать под нужным углом и обладать заданными при записи свойствами. Изменение направления и переход от одного участка к другому должен осуществляться быстро и безошибочно. Такие операции осуществляются устройствами отклонения светового луча - дефлекторами.

Существуют три основных типа дефлекторов: механические, акустооптические и электрооптические. Основными характеристиками их являются: максимальное отклонение, разрешающая способность и быстродействие (величина, обратная времени перевода луча на нужное направление). Дополнительными характеристиками являются эффективность, определяющая потери света при использовании дефлектора, потребляемая мощность, стабильность отклонения и др. Последние также влияют на возможный выбор используемого дефлектора. Так, например, увеличение числа разрешимых направлений обычно приводит к увеличению неточности позиционирования.

По совокупности характеристик наиболее удобным для использования в голографической памяти является акустооптический дефлектор (АОД).

Использование акустооптических дефлекторов существенно расширяет возможности голографических систем хранения информации. Как устройство, включающее акустооптические ячейки (АОЯ), такие дефлекторы имеют свою специфику. В основе работы АОЯ лежит явление взаимодействия световых волн с акустическими, в результате которого прохождение в среде акустических волн сказывается на характеристиках световой волны, проходящей через эту же среду.

Важная задача, которая должна быть решена при использовании АОД - обеспечить достаточно высокое быстродействие. Быстродействие может быть определено временем переброски пучка из одного возможного направления в другое. Для этого должно произойти переключение одной частоты пьезоэлектрического преобразователя на другую и акустические волны измененной частоты пройти такое расстояние, чтобы весь пучок проходил через акустическую решетку с новой частотой. Поскольку наиболее медленной операцией при этом будет прохождение акустических волн новой частоты на смену волнам старой, то время полного перевода пучка в новое направление должно быть больше времени этого прохождения. Имея в виду, что длина пути прохождения акустической волны новой частоты больше ширины пучка D но соизмеримо с этой величиной, то

$$\tau \approx c D/\nu, \quad (14)$$

где c - коэффициент больше единицы, ν – скорость. Из (14) нетрудно оценить (полагая $D = 1\text{мм}$, $c=2$, $\nu = 2 \cdot 10^5 \text{ см/с}$), что $\tau = 10^{-6} \text{ с}$.

Для эффективной работы акустооптического дефлектора в объемной голографической памяти важно установить согласование характеристик АОД с характеристиками матрицы объемных голограмм.

Особенности голографической записи связаны с основными характеристиками матрицы голограмм (МГ). Важными параметрами являются размер матрицы и число субголограмм, уместяющихся на поверхности среды, а также увеличение этого числа благодаря возможности в трехмерной среде реализации большого числа мультиплексий. Предельные возможности здесь связаны с динамическим диапазоном .

Время формирования голограммы из экспонированной интерференционной картины для разных сред может состоять из разного количества составляющих: времени предобработки среды, времени проявления

и времени фиксации. В лучшем и нередко реализуемом случае некоторые из этих составляющих исключаются и время формирования практически совпадает с временем экспозиции, особенно, если последнее достаточно велико.

Для получения больших скоростей записи, важно подобрать среды имеющие более близкую к матрице фотоприемников информационную чувствительность и не требующих дополнительного времени на проявление.

Важным параметром, определяющим производительность ГЗУ с произвольной выборкой данных, является время выборки. Часть этого времени - время адресации целиком определяется АОД. Другая часть этого времени - время формирования сигнала зависит от чувствительности датчика, энергии восстанавливающего пучка и потерь этой энергии в системе, в том числе в АОД за счет недостаточно высокой дифракционной эффективности последнего.

Сравнительно короткое полное время произвольной выборки достигается благодаря использованию двухступенчатой адресации (на первой ступени выбирается заданная голограмма из набора голограмм, на второй ступени выбирается данное из массива данных, восстановленного с выбранной голограммы) и благодаря использованию устройства высокоскоростной адресации при записи и выборке голограммы. Наиболее подходящим устройством для этой цели является, как указывалось, набор из двух или трех акустооптических дефлекторов. На второй ступени производится электронная адресация, на которую затрачивается меньшее время, чем на оптическую адресацию голограмм. Важно поэтому оценить минимальное время, затрачиваемое акустооптическими дефлекторами на необходимое отклонение пучка.

Во многих случаях на одну и ту же матрицу голограмм необходимо вводить новый набор массивов данных, предварительно проведя операцию стирания предыдущего набора. Операция стирания записанной информации может быть осуществлена не во всех записывающих средах, а только в реверсивных.

Глава третья посвящена исследованию временных изменений объектов и явлений с помощью методов голографической интерферометрии. Уникальным преимуществом голографической интерферометрии перед обычной оптической интерферометрией является возможность сохранения и последующего восстановления волн, что позволяет создавать интерференционную картину от наложения двух или большего количества волн, отнесенных к различным моментам времени. Таким образом, голографическая интерферометрия позволяет исследовать изменения объекта и характер протекания различных явлений. В главе рассматриваются две разновидности голографической интерферометрии: метод двух экспозиций или временного интервала и метод голографической интерферометрии реального времени. К первому виду относятся два варианта голографического интерферометра для исследования процессов, изменяющихся во времени, разработанные с участием автора. Принцип их действия основан на применении двух опорных пучков. В одном из вариантов осуществив запись начального состояния объекта первым опорным пучком. Далее записывают изменение состояния двумя опорными пучками,

поочередно отклоняя углы направления пучков на величины a и кратные им величины такие, что полученные серии голограмм не перекрывают друг друга. Результатом записи являются p двух экспозиционных интерферограмм измененного состояния в p интервалах времени, которые и дают информацию об изменении состояния объекта. Во втором варианте, также с использованием двух опорных пучков, применен импульсный лазер. Поочередно в опорных пучках вводится дополнительная разность хода и осуществляется наложение голограмм, результатом чего является регистрация n состояний быстропротекающих процессов.

Последующая часть главы посвящена методу голографической интерферометрии реального времени. Для лучшего понимания принципа действия такого метода, его описанию предшествует рассмотрение ассоциативных свойств голограмм.

В математическом представлении интенсивности предназначенной для создания голограммы интерференционной картины от двух волн (объектной и опорной) не содержится ничего, что позволило бы наделять одну из этих волн каким либо преимуществом перед другой. Обозначим комплексную амплитуду одной из волн через $A = a \exp(i\varphi_a)$, а другую через $B = b \exp(i\varphi_b)$. Рассмотрим случай записи голограмм фазового объекта, при котором

$$\tau_A \sim I = AA^* + BB^* + AB^* + A^*B. \quad (15)$$

Обычно в процессе восстановления голограмму освещают одной из волн, использованных для ее получения. Можно отметить, что амплитуды A и B запоминаются в голограмме ассоциативно и в равной степени можно восстанавливать опорный пучок, освещая голограмму объектным пучком, как и осуществлять восстановление объектного пучка опорным.

Дополнительные возможности появляются, если голограмма, записанная двумя пучками направленными под достаточными углами между собой, восстанавливается не одним опорным пучком, а сразу опорным и объектным пучками. Если эти пучки тождественны записывающим, то в полученном волновом фронте опорный пучок восстанавливает начальный объектный, а объектный пучок восстанавливает начальный опорный. Наряду с этими пучками проходят и недифрагированные пучки, которые соединяются с соответствующими пучками, опорным и объектным. Если же восстанавливающий объектный пучок изменен относительно записывающего объектного пучка, а опорный пучок оставлен неизменным, то в этом случае может быть получена интерферограмма двух состояний объекта и коррелограмма, характеризующая степень различия этих двух состояний.

В третьей главе диссертации также рассматриваются особенности восстанавливаемых двумя пучками волновых фронтов для двух различных случаев: записи голограмм в тонкой среде и записи в толстой среде, в которой играет роль Брэгговская селективность. При линейной регистрации амплитудный коэффициент пропускания голограммы при записи объектным и опорным пучком пропорционален интенсивности I

$$\tau \sim I = \{a \exp[-j\varphi_{3,об}(x, y)] + b \exp[-j\varphi_{3,оп}(x, y)]\} \{a \exp[-j\varphi_{3,об}(x, y)] + b \exp[-j\varphi_{3,оп}(x, y)]\}^* \quad (16)$$

где * - знак сопряжения, и, следовательно,

$$\tau_A \sim a^2 + b^2 + ab \{ \exp[-j\varphi_{3,об}(x, y) + j\varphi_{3,оп}(x, y)] + \exp[j\varphi_{3,об}(x, y) - j\varphi_{3,оп}(x, y)] \} \quad (17)$$

Осветив голограмму той же опорной волной, которая использовалась при записи и объектной волной с внесенным фазовым изменением $\Delta\varphi_{об}(x, y)$ можно получить волновой фронт идущий от голограммы, определяемый выражением, в котором можно выделить четыре группы членов:

$$ab^2 \exp[j\varphi_{3,об}(x, y) - 2j\varphi_{3,оп}(x, y)], \quad (18)$$

$$(a^2 + b^2)b \exp[-j\varphi_{3,об}(x, y)] + a^2b \exp[-j\varphi_{3,об}(x, y) - j\varphi_{3,оп}(x, y)], \quad (19)$$

$$(a^2 + b^2)a \exp[-j\varphi_{3,об}(x, y) - j\Delta\varphi_{об}(x, y)] + ab^2 \exp[-j\varphi_{3,об}(x, y) - j\varphi_{3,оп}(x, y)] \quad (20)$$

$$a^2b \exp[-2j\varphi_{3,об}(x, y) - j\Delta\varphi_{об}(x, y) + j\varphi_{3,оп}(x, y)]. \quad (21)$$

Если считать, что углы между опорными и объектными пучками велики, как при записи, так и при восстановлении, и полагать достаточно малыми, то каждый из этих четырех членов будет характеризовать волну, идущую в одно из четырех разделяемых направлений распространения за голограммой (рис.12).

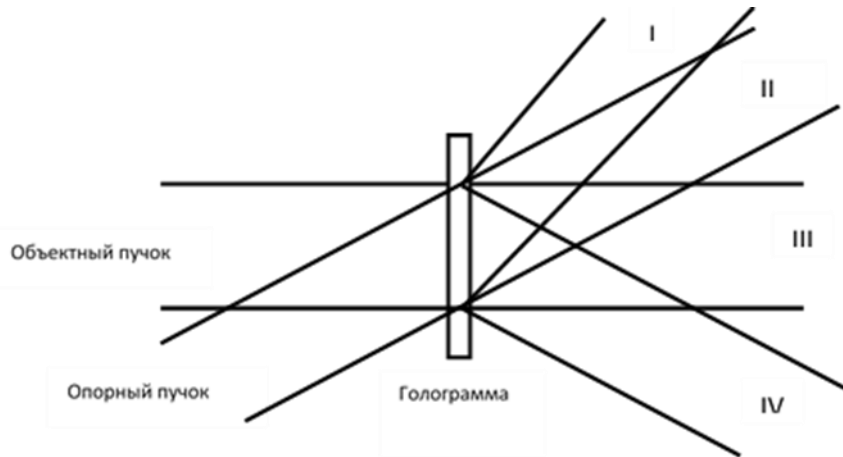


Рисунок 12. Составляющие волнового фронта, восстановленного одновременно опорным и измененным объектным пучка

Наибольший интерес представляют пучки, идущие во втором и третьем направлении. В случае, если восстанавливающий объектный пучок остался без изменения по отношению к записывающему ($\Delta\varphi_{об}(x, y) = 0$) во втором направлении целиком сохраняется распределение фаз соответствующее

опорному пучку. Если волна плоская, то на выходе в Фурье - плоскости появится точка. В случае, если $(\Delta\varphi_{об}(x, y) \neq 0)$, то в этом направлении с записью в Фурье -плоскости может быть реализована архитектура коррелятора совместного преобразования., которая была предложена в работе Вивера и Гудмена. В этом корреляторе (рис.13) эталонное и неизвестное изображения (функции $f_2(x,y)$ и $f_1(x,y)$) располагаются вместе во входной плоскости, а в фокальной плоскости после первой линзы получается их совместный фурье-образ. Если его записать на квадратичном носителе (на фотопленке или другой записывающей среде) и затем выполнить обратное фурье-преобразование, то окажется, что реализована операция

$$C_k(x_3, y_3) = \Phi^{-1}[F_1(v_x, v_y) \cdot F_2^*(v_x, v_y)], \quad (22)$$

где $C_k(x_3, y_3)$ - корреляционная функция в плоскости P_3 , $F_1(v_x, v_y) = \Phi[f_1(x_1, y_1)]$, $F_2(v_x, v_y) = \Phi[f_2(x_1, y_1)]$ фурье-образы функций f_1 и f_2 , корреляция между которыми определяется, F_2^* - комплексно-сопряженная функция $-F_2$.

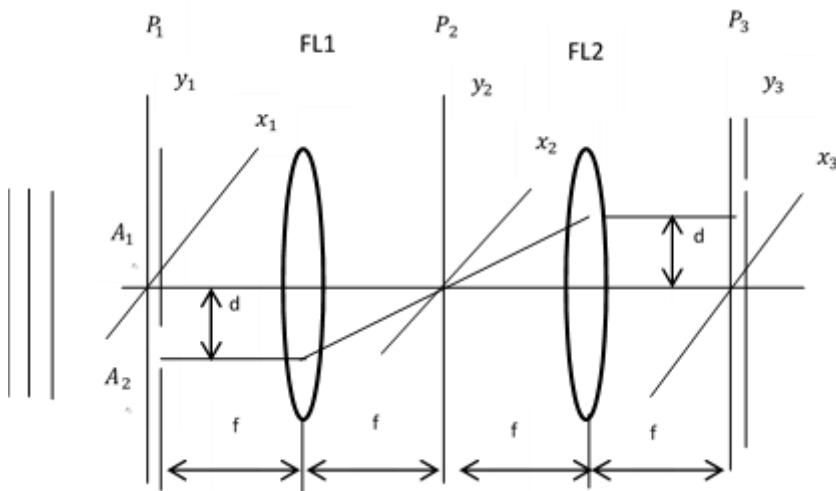


Рисунок 13. Архитектура коррелятора совместного преобразования.

Если в качестве опорной волны использовать плоскую волну, то в фурье плоскости корреляционная функция будет характеризовать величину отклонения от начальной замещающей ее при восстановлении объектной функции.

Третье направление, позволяет одновременно с корреляционной функцией на том же детекторе, но в пространственно отделенном участке получить интерференционную картину от наложения объекта с начальным распределением фаз на объект с измененным распределением. Помимо этого при записи на плоскую голограмму в первом и четвертом направлении содержится дополнительная информация, однако интерес к ней существенно меньше, чем к информации содержащих во втором и третьем направлении, и вместе с тем она занимает место в пространстве информации, которое можно

было бы использовать более рационально. Фазовая запись голограмм в трехмерных средах позволяет восстанавливать волновой фронт с высокой дифракционной эффективностью (в пределе до 100%). При этом на выходе может кроме недифрагированного пучка образовываться только один дифрагированный пучок (один из первых порядков). Эти свойства трехмерных голограмм позволяют более эффективно использовать метод двух пучкового восстановления волнового фронта для целей одновременного получения в реальном времени интерферограмм и коррелограмм изменяющегося во времени объекта относительно его начального состояния. При сохранении направлений восстанавливающих пучков теми же, которые были при записи, на выходе возникнут два направления, в каждом из которых накладываются два пучка. В одном - результатом такого наложения является интерференция пучков начального и текущего состояний объекта. В другом направлении накладывается недифрагированный опорный пучок $R_2 = R_1$ и дифрагированный объектный пучок O_2 (рис.14). И в этом случае, как при записи плоских голограмм реализуется коррелятор совместного преобразования. Используя в качестве опорной плоскую волну можно на расположенном в фурье-плоскости детекторе одновременно с интерференционной картиной получить изменяющуюся со временем коррелограмму пространственного распределения фаз в объекте.

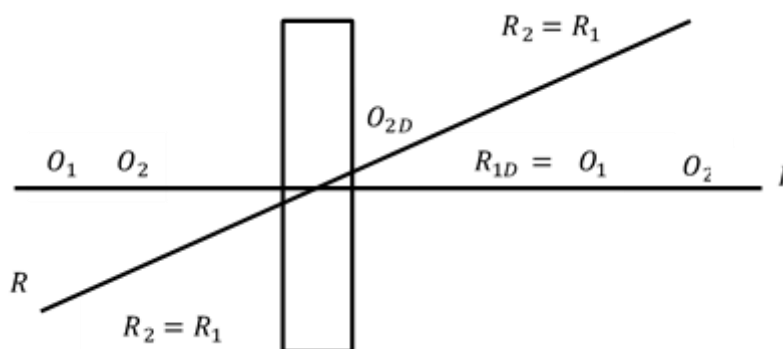


Рисунок 14. Схема двухпучкового восстановления волнового фронта с объемной голограммы.

Важным достоинством двух пучкового восстановления объемных голограмм, является возможность записи на одном участке большого количества мультиплексированных голограмм от множества начальных объектных пучков, что позволяет по максимуму корреляционной функции находить среди записанных изображений то, которое будет наиболее близким к эталонному, содержащемуся в восстанавливаемом опорном пучке. При переходе от одного записанного мультиплексированного изображения к другому должен изменяться опорный пучок, чтобы соответствовать одному из записываемых опорных пучков, с определенным адресом.

В главе четыре рассматриваются источники ограничений временных процессов в голографических устройствах и возможности компенсации этих ограничений.

В п. 4.1 обсуждается зависимость временных интервалов, которые можно зарегистрировать от времени задержки регистрации в голографической системе в целом и в отдельных ее компонентах. В п.4.2 устанавливается взаимосвязь величин N_p (числа пикселей вводимых в голограмму), N_s (числа площадок на которых записываются голограммы), N_M (числа мультиплексных голограмм, записываемых через одну площадку) и скорости ввода и вывода информации. Для разных сред хранения оптимальными окажутся увеличения одних из этих величин, иногда за счет уменьшения какой либо из N_p и N_s или увеличения N_M . Связано это с тем, что для разных сред по-разному действуют такие ограничивающие факторы, как ограниченный динамический диапазон, дифракционная эффективность и потери пространственной информации. Каждый ограничивающий фактор действует по-разному. Так, например, динамический диапазон позволяет увеличивать предел количества записываемых пикселей пропорционально корню квадратному из площади поверхности для плоских голограмм и пропорционально для объемных голограмм, тогда как дифракционный предел увеличивается пропорционально площади. Кроме того, величина динамического диапазона связано с величиной отношения сигнал/шум, а последнее, как и ряд других факторов определяющих плотность записи информации зависит от времени экспозиции при записи и восстановлении и других временных факторов.

Если для определенной величины N_p , динамический диапазон позволяет записать большее число пикселей, чем позволяет дифракционный предел, то с увеличением N_p и, соответственно, N_s , ограничения, связанные с динамическим диапазоном, могут сказываться сильнее. Кроме того, дифракционная эффективность, приходящаяся на один пиксел, падает пропорционально N_p^{-1} и увеличение этих двух множителей с некоторых значений заметно увеличивает временные интервалы, требуемые для регистрации, тогда как увеличение N_M (т.е. уменьшение площади A) до некоторой величины, после которой потребуется уменьшение N_p , может не оказать ограничивающего влияния. Вместе с тем, увеличение N_M требует переключение дефлектора на много позиций для охвата всей матрицы голограмм и, начиная с некоторой величины (более 200 в одном направлении или более $4 \cdot 10^4$ по всей поверхности), реализация отклонений акустооптическими дефлекторами вызывает затруднения, и, во всяком случае, связано с увеличением времени задержки. Таким образом, можно установить, что при использовании различных записывающих материалов, имеющих различную дифракционную интенсивность, различный динамический диапазон и различные потери пространственной информации, необходимо устанавливать свои пределы для наиболее критичных из величин N_p , N_s и N_M с тем, чтобы другие из этих величин можно было увеличить за счет величины N_M с установленным ограничением.

П.4.3 посвящен параметру, определяемому как информационное качество голографической системы. Этот параметр объединяет информационную емкость системы вместе со скоростью голографической передачи информации. Как правило, увеличение информационной емкости сопровождается уменьшением скорости передачи информации и таким образом информационное качество

системы не растет. Однако, подбирая более высококачественные записывающие материалы и перестраивая нужным образом архитектуру системы можно добиться более высокого информационного качества. Отмечается, что информационное качество голографической системы вследствие, как более высокой информационной емкости и плотности, так и в результате последовательно-параллельного двух- ступенного процесса ввода и вывода информации, оказывается выше, чем для других систем .

В п.4.4 рассматривается важный вопрос, касающийся временных задержек, имеющих место в процессе записи голограмм в различных средах. Существенное значение имеет время, затрачиваемое не только на экспозицию, но и на весь цикл записи, включающий кроме непосредственной реакции среды на свет, еще и другие процессы, в конечном счете, приводящие к изменению оптических параметров среды. Рассматривая кинетику этих процессов, можно отметить, что в некоторых средах с многоступенчатой записью, в которых, как например, в фотоэмульсиях или в фототермопластических средах, процессы экспозиции, проявления и другие, следуют последовательно друг за другом, тогда как в других средах имеет место параллельное протекание ряда процессов, имеющих различную задержку в их начале, различные скорости протекания и различное время окончания процесса. В некоторых случаях (как, например, в ряде полимерных сред) набор процессов записи может продолжаться значительно дольше времени экспозиции, что заставляет некоторых авторов не вполне точно определять продолжающиеся процессы записи, как постэкспозиционное самоусиление голограмм. На самом деле речь идет о значительно удлинившемся времени записи.

Далее сравнивается кинетика записи в различных записывающих голографических средах. На кинетику записи голограмм оказывает существенное влияние процесс стирания иногда спонтанный, иногда вынужденный. В большинстве случаев записи голограмм, и особенно применительно к голографическим запоминающим устройствам, необходимо, чтобы процесс стирания в циклах записи и хранения практически полностью отсутствовал. Последнее достигается только в определенных средах, в которых действие света приводит к необратимым изменениям, сопровождаемым изменениями оптических показателей среды. В других средах, под действием света происходят неустойчивые изменения свойств среды, с течением времени возвращающие среду к исходному состоянию. Такие неустойчивые изменения происходят в некоторых видах фототермической записи, в большей степени в некоторых красителях, используемых в динамической голографии, и в меньшей степени при записи в фоторефрактивных кристаллах. При записи голограмм образование их можно выразить соотношением $A_0[1 - \exp(-t/\tau_r)] \approx (A_0/\tau_r)t$, где A_0 - максимальное значение амплитуды решетки, τ_r - постоянная времени записи. Одновременно голограмма ослабевает за счет стирания как $\exp(-t/\tau_e)$, где τ_e - постоянная времени стирания. Для записи одной голограммы можно записать выражение для дифракционной эффективности $\eta = [(A_0/\tau_r)\tau_e]^2$.

Очевидно, что характер стирания может быть определен промежуточным между двумя крайними случаями: а) запись с почти мгновенным стиранием.

Этот случай рассматривается в динамической голографии и фактически означает мгновенное действие света без накопления сигнала, формирующего голограмму; б) запись практически без стирания, когда τ_e очень велико, в этом случае сигнал при записи накапливается. Кинетика процессов записи в промежуточных случаях в значительной степени зависит от величины τ_e . Для статической голографии, которая описывается в диссертации, рассматриваются условия, при которых эта величина велика.

Рассматривается кинетика записи голограмм в средах с постэкспозиционным проявлением, но без предэкспозиционной подготовки. К таким средам относятся прежде всего галогенидосеребряные материалы, используемые в фотографии. В этом случае помимо времени экспозиции, необходимо затратить время на проявление и во многих случаях на фиксирование. В других средах, таких как задубленная бихромированная желатина наряду с постэкспозиционным проявлением необходимо проводить и предэкспозиционную подготовку, что требует дополнительной затраты времени. В п. 4.5 рассматриваются возможности компенсации ограничений регистрации временных процессов оптимизацией компонент голографического устройства.

Наилучший способ компенсации заключается в повышении информационной емкости голографического устройства, т.е. уменьшения времени затрачиваемого на ввод и вывод информации без того, чтобы уменьшать информационную емкость. Этого можно достичь, подбирая необходимые записывающие материалы и улучшая характеристики ПВМС, формирующего страницы данных, фотоприемную матрицу и промежуточные устройства, такие, как дефлекторы, позволяющие уменьшить время, затрачиваемое на адресацию.. В том случае, когда все возможные резервы в этом направлении использованы, имеется возможность компенсации временных ограничений за счет уменьшения информационной емкости голографического устройства. При этом можно уменьшать время затрачиваемое на ввод и вывод за счет отдельного уменьшения как числа пикселей, вводимых в голограмму, числа площадок, на которых записываются голограммы и числа голограмм накладываемых на одной и той же площадке. Увеличение скорости передачи информации при этом окажется разным для различных случаев. И, наконец, имеется возможность компенсации временных ограничений за счет оптимального распределения последовательности работы компонент голографического устройства и частичной одновременности их работы.

Практически все известные способы записи информации голографическим методом основаны на фиксации интерференционной картины – голограммы, формирующейся как результат суперпозиции опорного и предметного пучков. Основная проблема, с которой сталкиваются экспериментаторы при разработке таких систем – это необходимость точного совмещения опорного и предметного пучков при записи голограмм. Другая проблема – это использование дорогостоящих дефлекторов, необходимых для отклонения опорного пучка на необходимый угол, что сильно усложняет процесс записи информации. Решить рассмотренные проблемы, по крайней мере, на этапе записи голограммы, можно воспользовавшись следующим способом

записи цифровой информации (рис.15). Луч лазера 1 расширяется микрообъективом 2 и коллимируется линзой 3. Далее расширенный луч лазера падает на жидкокристаллический модулятор света 4. На жидкокристаллическом модуляторе света отображается распределение интенсивности световой волны, рассчитанной по методике синтеза цифровой голограммы страницы цифровой информации с использованием опорной волны.

Голограмма несет большой объем информации об объекте. Для получения количественных данных о параметрах объекта и решения сложных задач визуализации внутренней структуры и различных видов объекта необходима автоматизация голографического эксперимента. Одним из наиболее удобных путей автоматизации является ввод голограммы в компьютер с последующим восстановлением (реконструкцией) в цифровом виде. Цифровое восстановление (реконструкция) изображений основано на моделировании процесса распространения света от голограммы к объекту. В простых случаях возможно использование приближения Кирхгофа и следующих из него методов дифракции Френеля и Фраунгофера [144,145]. Для цифровой реконструкции более сложных объектов должны быть применены методы теории рассеяния.

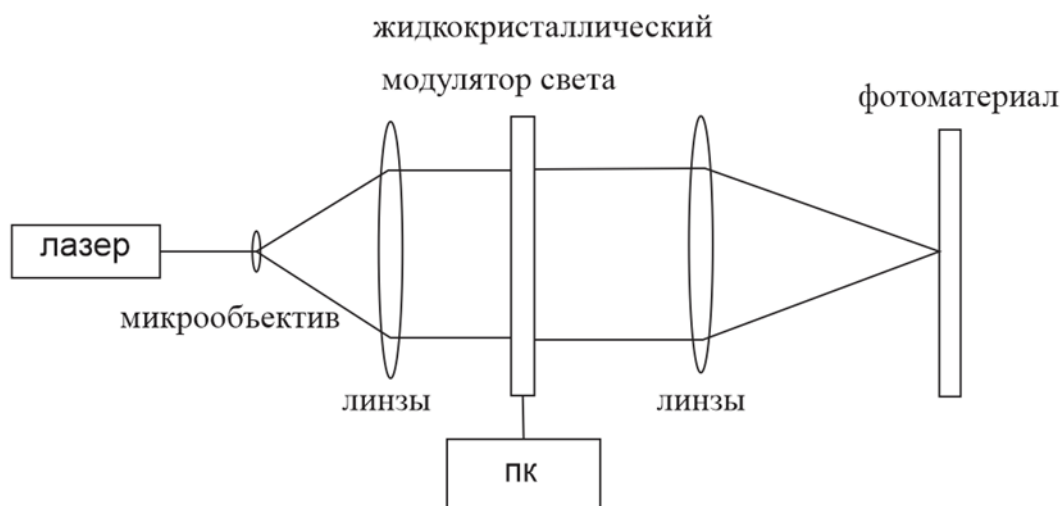


Рисунок 15. Схема записи цифровой информации в виде синтезированных голограмм.

Рассмотрены пути реализации параллельного считывания нескольких страниц в голографических системах хранения информации. Использование голографических устройств с такими возможностями обеспечивает значительного повышения быстродействия выборки информации.

Один из методов создания высокопроизводительных голографических систем является сокращения время записи голографической информации и использование в качестве регистрирующих сред реверсивных фотоматериалов. В голографических устройствах в качестве реверсивных сред часто используются фототермопластические материалы. Процесс записи фототермопластических носителей обычно включает предэкспозиционную обработку (зарядка), времени экспозиции и после экспозиционную обработку (нагрев). В целях сокращения процесса записи нами предложена методика записи на фототермопластические носители позволяющая объединить процессы

экспозиции и нагрева. Данная методика может быть использованы как для хранения информационных массивов, так и для обработки изображений в реальном масштабе времени.

На рисунке 16 приведена оптическая схема устройства реализующего предлагаемый способ. Устройство содержит лазер в ИК диапазоне 1, светоделитель 2, расщепляющий луч лазера 1 на два пучка, зеркало 3, линзу 4, коронатор 5 и ТП носитель 6, расположенный в первом пучке; линзу 7 и объект 8, расположенные во втором пучке.

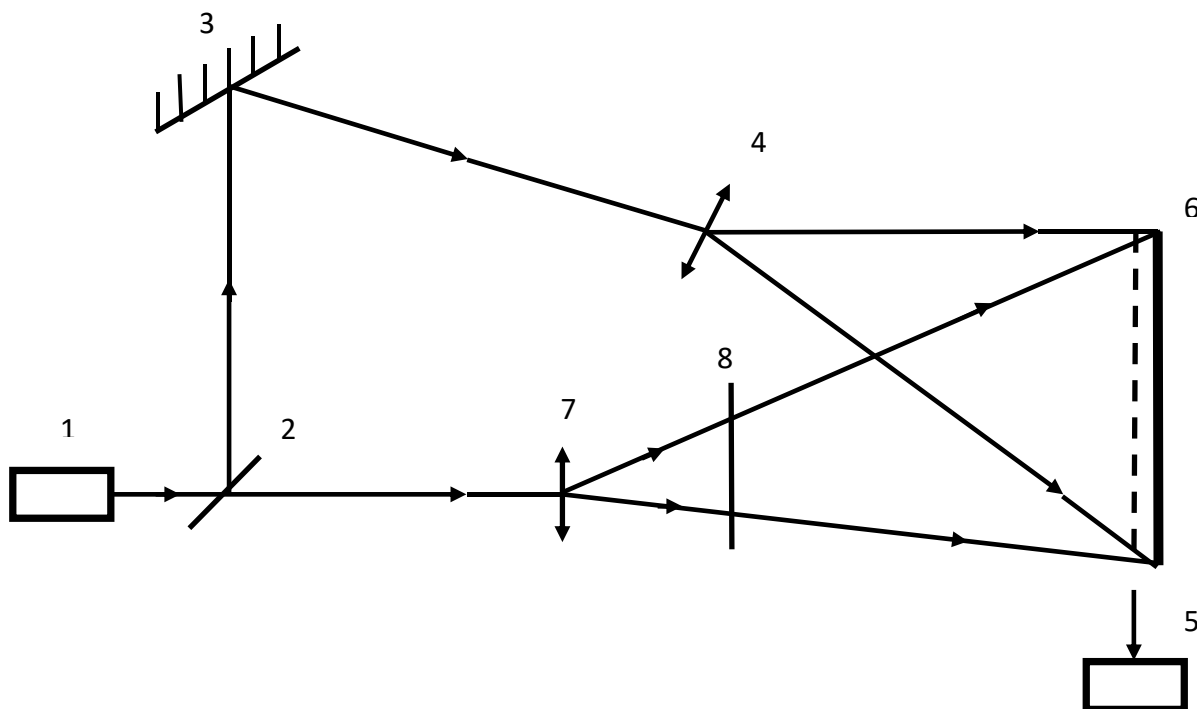


Рисунок 16. Устройство для записи информации на ТП носитель в ИК диапазоне

Суть методики заключается в следующем. На поверхность ТП слоя наносят с помощью коронатора равномерный электрический заряд. Затем эту поверхность облучают одновременно двумя пучками ИК излучения, один из которых имеет равномерную по сечению интенсивность J_1 , а второй, несущий информацию пучок, имеет интенсивность $J_2(x,y)$. Интенсивности пучков J_1 и J_2 подбираются таким образом, чтобы обеспечить нагрев ТП слоя в диапазоне температур от T_1 до $T_1 + \Delta T$. При этом деформация поверхности ТП слоя под действием приложенного электрического поля достигается не за счет пространственных вариаций электрических сил, обусловленных неоднородным распределением зарядов, а за счет пространственной модуляции коэффициента поверхностного натяжения $\sigma(T)$, модуля сдвига $G(T)$ и других параметров ТП слоя, обусловленных вариациями интенсивности в несущем информацию ИК пучке.

В главе 5 рассмотрены процессы, происходящие в акустооптических устройствах. В п.5.1 дан акустооптический анализ широкополосных радиочастотных сигналов. Акустооптический спектроанализатор (АОСА)

реализуют операции акустооптического ввода анализируемого радиосигнала в оптическую систему, Фурье-преобразование этого сигнала, регистрацию спектра сигнала с помощью фотодетектора, и дальнейший анализ этого спектра традиционными методами. Максимальное частотное разрешение может быть получено при использовании ячеек Брэгга с максимальной временной апертурой. Известно, что наибольшая временная апертура может быть получена, если в ячейке используется кристалл диоксида теллура TeO_2 , в котором возбуждается медленная сдвиговая акустическая волна. В таких АОСА достигается частотное разрешение 30 кГц.

Более высокого частотного разрешения можно добиться, используя интегрирование во времени. АОСА с временным интегрированием могут быть выполнены как в одномерном, так и в двумерном вариантах. Простейший АОСА с временным интегрированием может быть построен на базе акустооптического коррелятора. АОСА с временным интегрированием может быть построен на базе акустооптического коррелятора, и его использование приводит к дальнейшему увеличению частотного разрешения. Одной из актуальных задач является анализ части радиоэфира в пределах до 800... 1000 МГц. Решение этой задачи возможно осуществлением последовательного перебора поддиапазонов частот величиной порядка 10 МГц, в каждом из которых осуществляется параллельный анализ данного участка радиоэфира. На этом принципе организован панорамный приемник - спектрометр, предназначенный для анализа сигналов, лежащих в пределах спектра 50...850 МГц.

Панорамный приемник - спектроанализатор представляет собой гибридный оптико-цифровой прибор, в котором применен принцип одновременного обзора участка полосы частот путем его параллельной обработки с помощью акустооптического анализатора спектра с пространственным интегрированием. В п.4.1 проведен анализ недостатков ранее разработанных приборов и приводится опробованная в работе усовершенствованная схема панорамного приемника на базе параллельно работающих акустооптических анализаторов спектра с временным и пространственным интегрированием. В п.5.2 рассматривается мультиплексирование голограмм по длине волны с применением акустооптического перестраиваемого фильтра (АОПФ) - спектрального прибора с электронным управлением, в котором происходит модуляция длины волны. Главная функция, которую выполняют АОПФ - выделение из входного полихромного светового пучка света с определенной длиной волны. Здесь же рассмотрена разрешающая способность АОПФ, обеспечивающая мультиплексирование по длине волны.

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. Классифицированы информационные временные процессы в голографических и акустооптических устройствах; Показаны источники задержек времени передачи информации в отдельных компонентах голографических устройств.

2. Экспериментально и теоретически показаны возможности анализа временных изменений средствами голографической интерферометрии. Предложены и испытаны новые устройства для двух экспозиционных голографических интерферограмм, использующие наряду с объектным пучком два опорных пучка, что позволяет получить серию интерферограмм, отнесенных к различным интервалам времени.

3. Проанализированы процессы, происходящие в голографической интерферометрии реального времени; Показаны возможности одновременно с голографической интерферометрией регистрировать в реальном времени корреляционную функцию изменяющегося во времени объекта.

4. Исследована кинетика процессов голографической записи на различных записывающих средах и их влияние на регистрацию изменяющихся во времени процессов; Продемонстрировано преимущества использования сред записи, в которых процессы записи идут одновременно с временем экспозиции, либо с некоторым сдвигом начала и конца записи.

5. Определены факторы, влияющие на регистрацию временных изменений явлений и объектов и отмечены возможности улучшения временных характеристик.

6. В целях точного совмещения опорного и предметного пучка в процессе записи голограмм, а также упрощения этого процесса, путем исключения сложных компонентов как акустооптические дефлекторы, предложена методика записи голограмм в виде синтезированных с опорным пучком. С точки зрения теории дифракции Френеля- Кирхгофа рассмотрены синтез голограмм трехмерных объектов.

7. В результате исследования предложено теоретическое обоснование использования в качестве источника опорных волн при записи рентгеновских голограмм возбужденных атомов внутри исследуемой атомной структуры (флуоресцентные атомы) – внутренние источники. Показано, также, что подобные атомы могут быть использованы и при регистрации рентгеновской голограммы – внутренние детекторы.

8. Показано, что голограммы, полученные как с помощью метода внутреннего источника, позволяют восстановить трехмерную структуру вблизи какого-либо флуоресцентного атома. Алгоритм, который позволяет восстановить атомные изображения, основывается на интегральной теореме Гельмгольца-Кирхгофа.

9. Методика записи информации в виде синтезированных Фурье голограмм с требуемыми мультипликацией значительно ускоряет и упрощает процесс ввода информации в голографической системы, а также реализует параллельного записи и считывания нескольких страниц.

10. Методика записи информации на фототермопластические носители с предварительным подогревом при использовании инфракрасного лазера значительно сокращает времени регистрации голографической информации.

11. Рассмотрены временные ограничения, вносимые акустооптическими дефлекторами в голографические системы памяти; Показаны особенности временного прохождения информации в устройствах анализа широкополосных радиочастотных сигналов с использованием акустооптических анализаторов спектра; Показаны возможности применения акустооптического перестраиваемого фильтра для мультиплексирования голограмм по длине волны.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. **Исмаилов, Д. А.** Использование компьютера в голографической интерферометрии [Текст] / Д. А. Исмаилов, А. А. Акаев, А. Нуркамилов // Тезисы докладов 2 Всесоюзной конференции по оптической обработке информации. — Фрунзе, 1990. — С. 118.

2. **Исмаилов, Д. А.** Стабилизация излучения мощности полупроводниковых квантовых генераторов (ПКГ) при определении компонентов полидисперсных сред [Текст] / Д. А. Исмаилов, А. Нуркамилов, Т. Турдумаматов // Тезисы докладов 2 Всесоюзной конференции по оптической обработке информации. — Фрунзе, 1990. — С. 117.

3. Голографическая ассоциативная память, основанная на записи наложенных голограмм на ФТПН [Текст] / А. А. Акаев, К. М. Жумалиев, А. А. Жээнбеков, Д. А. Исмаилов // Сборник трудов по методам оптической информации. — Бишкек: Илим, 1992. — С. 303–305.

4. Holographic Interferometer for the study of high-speed processes [Текст] / D. A. Ismailov, J. J. Jeenbaev, K. M. Zhumaliev, He Ching Yu // International Conference on Holography and Optical Information Processing (ICHOIP '96). — 1996. — Т. 2866. — С. 297–303.

5. Holographic interferometry technique [Текст] / D. A. Ismailov, J. J. Jeenbaev, K. M. Zhumaliev, He Ching Yu // International Conference on Holography and Optical Information Processing (ICHOIP '96). — 1996. — Т. 2866. — С. 378–381.

6. Information recording method for photothermoplastic material [Текст] / J. J. Jeenbaev, D. A. Ismailov, J. A. Akkoziev, He Ching Yu // International Conference on Holography and Optical Information Processing (ICHOIP '96). — 1996. — Т. 2866. — С. 73–78.

7. Holographic interferometer for study high-speed processes [Текст] / I. A. Akkoziev, D. A. Ismailov, T. E. Kulish, He Cheng Yu // Proceedings of the international seminar “Holography and optical information processing”. — Bishkek, 1997. — С. 19–24.

8. **Исмаилов, Д. А.** Design of optical technique for research of the polydispersial medium components [Текст] / D. A. Ismailov, T. E. Kulish, T. T.

Turдумаматов // Proceedings of the international seminar “Holography and optical information processing”. — Bishkek, 1997. — С. 64–66.

9. Holographic interferometry technique [Текст] / I. A. Akkoziev, D. A. Ismailov, T. E. Kulish и др. // Proceedings of the international seminar “Holography and optical information processing”. — Bishkek, 1997. — С. 24–26.

10. Разработка голографического интерферометра с расширенной областью применения [Текст] / Д. А. Исмаилов, А. А. Жээнбеков, Н. Н. Романенко и др. // Труды Международного семинара «Голография и оптическая обработка информации». — Бишкек, 2001. — С. 90–93.

11. Совершенствование устройств анализа широкополосных радиочастотных сигналов с использованием акустооптических анализаторов спектра [Текст] / К. М. Жумалиев, Б. С. Гуревич, Н. К. Джаманкызов, Д. А. Исмаилов // Известия Национальной Академии Наук Кыргызской Республики. — 2004. — № 1. — С. 46–49.

12. Возможности увеличения объема данных, хранимых в плоских и объемных голографических средах [Текст] / С. Б. Гуревич, К. М. Жумалиев, Д. А. Исмаилов и др. // Труды международной конференции «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе». — Бишкек, 2004. — С. 28–31.

13. Пространственные модуляторы света в архитектуре постраничной объемной голографической памяти [Текст] / Б. С. Гуревич, К. М. Жумалиев, Д. А. Исмаилов и др. // Труды международной конференции «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе». — Бишкек, 2004. — С. 36–39.

14. Acousto-optic spectrum analyzer with high information productivity [Текст] / B. S. Gurevich, S. V. Andreyev, J.A. Ismailov и др. // Proceedings of SPIE. — 2004. — Т. 5447. — С. 312–320.

15. Разработка голографического интерферометра с расширенной областью применения [Текст] / А. А. Жээнбеков, Д. А. Исмаилов, В. С. Гуревич и др. // Труды международной конференции «Развитие информационно-коммуникационных технологий в информационном обществе». — Бишкек, 2004. — С. 90–93.

16. Acousto-optic tunable filter with variable spectral selectivity [Текст] / B. S. Gurevich, S. V. Andreyev, J.A. Ismailov и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5828. — С. 53–59.

17. Photothermic recording in data storage systems [Текст] / A. Peckus, B. S. Gurevich, J.A. Ismailov и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5946. — С. 1–6.

18. Information metrology of acousto-optic tunable filters [Текст] / B. S. Gurevich, S. V. Andreyev, J.A. Ismailov и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5946. — С. 1–6.

19. Interconnection between the dynamic range and information capacity of acousto-optic devices [Текст] / B. S. Gurevich, S. V. Andreyev, J.A. Ismailov и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5953. — С. 1–6.

20. Study of object surface characteristics using an acousto-optic tunable filter [Текст] / В. S. Gurevich, S. V. Andreyev, J.A. Ismailov и др. // Proceedings of SPIE. — 2005. — Т. 5953. — С. 1–6.
21. Sensitivity of a spectral device based on acousto-optic tunable filter [Текст] / В. S. Gurevich, S. V. Andreyev, J.A. Ismailov и др. // Proceedings of SPIE. — 2007. — Т. 659607. — С. 1–6.
22. Hologram recording kinetics in media with different recording mechanisms [Текст] / S. B. Gurevich, B. S. Gurevich, J. A. Ismailov и др. // Proceedings of SPIE. — 2006. — Т. 5946. — С. 1F-1–1F-7.
23. **Исмаилов, Д. А.** Цифровая спекл-интерферометрия [Текст] / Д. А. Исмаилов // Труды Международного семинара «Оптика и фотоника 2012». — Иссык-Куль, 2012. — С. 38–40.
24. **Исмаилов, Д. А.** Радужные голографии в Кыргызстане [Текст] / Д. А. Исмаилов // Физика. — 2013. — № 3. — С. 107–113.
25. **Исмаилов, Д. А.** Голографический интерферометр на основе ПЗС-камеры [Текст] / Д. А. Исмаилов // Труды Международной конференции «Оптика и Фотоника 2013». — Самарканд, 2013. — С. 25–27.
26. Улучшение характеристик дифракционных решеток в Дот-матрикс голограммах [Текст] / К. М. Жумалиев, Д. А. Исмаилов, А. А. Жээнбеков и др. // Труды Международной конференции «Оптика и Фотоника 2013». — Самарканд, 2013. — С. 57–60.
27. Исследование производства радужных голограмм [Текст] / К. М. Жумалиев, С. А. Алымкулов, Д. А. Исмаилов, А. А. Жээнбеков // Труды V Международного семинара «Новые материалы и технологии для промышленности, охраны окружающей среды и здоровья человека (NMT-2013)». — Иссык-Куль, 2013. — С. 6–10.
28. Запись дифракционных решеток в ДОТ-матрикс голограммах [Текст] / К. М. Жумалиев, С. А. Алымкулов, Д. А. Исмаилов и др. // Труды V Международного семинара «Новые материалы и технологии для промышленности, охраны окружающей среды и здоровья человека (NMT-2013)». — Иссык-Куль, 2013. — С. 118–120.
29. Инновационные технологии для развития экономики Кыргызской Республики [Текст] / К. М. Жумалиев, Н. К. Джаманкызов, Д. А. Исмаилов, и др. // Материаловедение. — 2013. — № 2. — С. 7–16.
30. Улучшение характеристик дифракционных решеток в Дот-матрикс голограммах [Текст] / К. М. Жумалиев, Д. А. Исмаилов, А. А. Жээнбеков и др. // Узбекский физический журнал. — 2014. — Т. 16, № 5. — С. 319–322.
31. Satellite surveys digital information holographic record on ribbon photothermoplastic carriers [Текст] / N.K. Jamankyzov, Ch.S. Akymzhanova, J.A. Ismailov и др. // The Second International Symposium on Earth Observation for Arid and Semi-Arid Environments (ISEO 2014) Central Asia: Looking from Space. Issyk-Kul, Kyrgyzstan, 2014. — С. 19-23.
32. Optimization of modes of the earth's satellite surveys digital information holograms record on photothermoplastic disk carriers [Текст] / N.K. Jamankyzov, Ch.S. Akymzhanova, J.A. Ismailov и др. // The Second International Symposium on

Earth Observation for Arid and Semi-Arid Environments (ISEO 2014) Central Asia: Looking from Space. Issyk-Kul, Kyrgyzstan, 2014. – С. 23-28.

33. Increasing the density of information stored in a holographic memory with the use of angular multiplexing [Текст] / К.М. Zhumaliev, А.А. Jeenbekov, Zh.А. Ismailov, М. Мамырбеков // The Second International Symposium on Earth Observation for Arid and Semi-Arid Environments (ISEO 2014) Central Asia: Looking from Space. Issyk-Kul, Kyrgyzstan, 2014. – С. 48-49.

34. **Jeenbekov, А.А.** Research methods of recording overlapped holograms in archival holographic memory [Текст] / А.А. Jeenbekov, К.М. Zhumaliev, D.А. Ismailov // Optics and Photonics. Japan, 2014. University of Tsukuba, Tokyo, 2014. – 6aDS1.

35. **Jeenbekov, А.А.** Record matrix holograms on dot matrix technology [Текст] / А.А. Jeenbekov, К.М. Zhumaliev, D.А. Ismailov // Optics and Photonics. Japan, 2014. University of Tsukuba, Tokyo, 2014. – 6pE10.

36. **Исмаилов Д.А.** Цифровая голографическая интерферометрия [Текст] / Д.А. Исмаилов // Физика. – 2015. – № 1. – С. 114-117.

37. **Исмаилов Д.А.** Голографическая память цифровой информации на основе синтезированных голограмм [Текст] / Д.А. Исмаилов // Физика. – 2015. – № 1. – С. 108-110.

38. **Исмаилов Д.А.** Измерение перемещений методом спекл-интерферометрии [Текст] / Д.А. Исмаилов // Физика. – 2015. – № 1. – С. 110-114.

39. Голографическая память цифровой информации на основе синтезированных голограмм [Текст] / Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев, А.А. Жээнбеков, А.Д. Аккозов // Труды международной конференции по фотонике и информационной оптике. Москва, НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 185-186.

40. Улучшение записи дифракционных решеток в Дот-матрикс голограммах [Текст] / К.М. Жумалиев, Д.А. Исмаилов, А.А. Жээнбеков и др. // Труды международной конференции по фотонике и информационной оптике. Москва, НИЯУ МИФИ, 2015. – С. 200-201.

41. Голографическая память на основе синтезированных голограмм [Текст] / Д.А. Исмаилов, Ю.Х. Исманов, К.М. Жумалиев, А.Д. Аккозов // Проблемы современной науки и образования. – Иваново, Россия, 2016. – № 17 (59). – С. 6-8.

42. **Исмаилов Д.А.** Френелевские голограммы трехмерных объектов [Текст] / Д.А. Исмаилов, Ю.Х. Исманов, С.А. Алымкулов // Проблемы современной науки и образования. – Иваново, Россия, 2016. – № 17 (59). – С. 9-11.

43. **Исманов Ю.Х.** Методы рентгеновской голографии с внутренним источником [Текст] / Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов // Наука, техника и образование. – Иваново, Россия, 2016. – № 3 (21). – С. 19-22.

44. **Исманов Ю.Х.** Формирование последовательности саморепродукций одномерной линейной-решеткой [Текст] / Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов, С.А. Алымкулов // Academy. – Иваново, Россия, 2016. – № 6 (9). – С. 6-10.

45. **Исманов Ю.Х.** Моделирование в голографии с использованием второго опорного пучка [Текст] / Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов, С.А. Алымкулов // Academy. – Иваново, Россия, 2016. – № 6 (9). – С. 10-12.
46. **Исманов Ю.Х.** Эффективность флуоресцентной рентгеновской голографии [Текст] / Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов // Физика. – 2016. – № 1. – С. 247-251.
47. Некоторые особенности синтеза радужных голограмм [Текст] / К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов, Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов // Физика. – 2016. – № 2. – С. 69-73.
48. Временные процессы в голографических устройствах [Текст] / К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов, Исмаилов и др. // Физика. – 2016. – № 2. – С. 73-78.
49. Ассоциативные свойства голограмм как основа для голографической интерферометрии реального времени [Текст] / К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов, Д.А. Исмаилов и др. // Физика. – 2016. – № 2. – С. 78-83.
50. Анализ голографических интерферограмм [Текст] / К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов, Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – 2016. – № 3 (39). – Ч. I. – С. 56-60.
51. Эффект саморепродуцирования в голографии [Текст] / Ю.Х. Исманов, Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев, С.А. Алымкулов // Материалы VI Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 646-647.
52. Алгоритм синтеза мультиплексных голограмм [Текст] / Ю.Х. Исманов, Н.М. Кулмурзаев, Д.А. Исмаилов, С.А. Алымкулов // Вестник КГУСТА им. Н. Исанова. – 2017. – № 3 (57). – С. 166-171.
53. Многоканальный голографический интерферометр для исследования сложных фазовых и отражающих сред [Текст] / Ю.Х. Исманов, Т.Д. Тынышова, Д.А. Исмаилов, Н.М. Кулмурзаев // Материалы VII Международной конференции по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 264-265.
54. Запись серии двухэкспозиционных голографических интерферограмм на плоских регистрирующих средах [Текст] / Д.А. Исмаилов, Т.Э. Кулиш // Наука и образование сегодня. – Олимп (Иваново), 2018. – № 7 (30). – С. 5-8.
55. **Исмаилов Д.А.** Исследование влияния шумов на качество наложенных голограмм [Текст] / Д.А. Исмаилов, Т.Э. Кулиш // Физика. – 2018. – № 1. – С. 83-88.
56. **Кулиш, Т.Э.** Голографическая интерферометрия на объемных носителях [Текст] / Т.Э. Кулиш, Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев // Физика. – 2019. – № 1. – С. 37-44.
57. **Кулиш, Т.Э.** Состояние и проблемы разработки методик голографической интерферометрии на основе объемных регистрирующих сред [Текст] / Т.Э. Кулиш, Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев // Физика. – 2019. – № 2. – С. 7-14.
58. **Кулиш, Т.Э.** Цифровая голография [Текст] / Т.Э. Кулиш, Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев // Физика. – 2020. – № 1. – С. 57-62.

59. **Жээнбеков, А.А.** Программное обеспечение ПМС для получения компьютерно-синтезированной голограммы [Текст] / А.А. Жээнбеков, Д.А. Исмаилов, К.М. Жумалиев // Сборник материалов международной научно-рецензируемой онлайн конференции «Тенденции развития современной физики полупроводников: проблемы, достижения и перспективы». – Республика Узбекистан, 2020. – Ч. 2. – С. 69-72.

60. **Исмаилов Д.А.** Цифровая реконструкция голограмм [Текст] / Д.А. Исмаилов, Т.Э. Кулиш // Физика. – 2021. – № 1. – С. 9-19.

61. Жумалиев, К.М. Разделение мнимого, реального и нулевого порядка изображения [Текст] / К.М. Жумалиев, Д.А. Исмаилов, Т.Э. Кулиш // Физика. – 2022. – № 1. – С. 33-37.

62. **Исмаилов Д.А.** Метод двух и нескольких длин волн [Текст] / Д.А. Исмаилов, Т.Э. Кулиш, К.М. Жумалиев // Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. – 2022. – № 5. – С. 276-282.

63 **Исмаилов Д.А.** Устройство для получения СНДГИ с использованием матовых рассеивателей [Текст] / Д.А. Исмаилов, Т.Э. Кулиш, К.М. Жумалиев // Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. – 2023. – № 8. – С. 13-17.

64. **Исмаилов Д.А.** Выбор голографического записывающего материала в зависимости от сферы применения методов неразрушающего контроля [Текст] / Д.А. Исмаилов, Т.Э. Кулиш, К.М. Жумалиев // Известия Национальной академии наук Кыргызской Республики. – 2023. – № 8. – С. 18-27.

65. **Исмаилов Д.А.** Свидетельство на программу для ЭВМ №926. Программа для определения смещения поверхности объектов [Текст] / Д.А. Исмаилов; Зарегистрировано в Государственном реестре программ для ЭВМ Кыргызской Республики 28.06.2024 г.

Исмаилов Джапар Авазовичтин “ Сүрөттөлүштөрдү сактоо жана иштетүү үчүн колдонолуучу голограммаларды жазуу жана аларды иштетүү ыкмаларын компьютердик моделдөө жолу менен изилдөө жана иштеп чыгуу” деген темадагы 05.13.16 - илимий изилдөөдө компьютердик технологияны, математикалык моделдөө жана математикалык методдорду колдонуу (илим тармактары боюнча) жана 01.04.05 «Оптика» –адистиктери боюнча техникалык илимдеринин докторлук илимий даражасына талап кылынган диссертациясына

РЕЗЮМЕ

Негизги сөздөр: голографиялык эс тутум, голографиялык интерферометр, мейкиндик жарык модулятору, лазер, акусто-оптикалык дефлектор, голограмма матрицасы, корреляция, Фурье голограммасы, интерферограмма.

Изилдөө объектилери болуп эки өлчөмдүү маалыматты сактоого жана иштетүүгө мүмкүндүк берүүчү голографиялык системалар жана түзүлүштөр саналат; тез процесстерди изилдөөнүн голографиялык ыкмалары; эки нурлуу голографиялык интерферометрлер.

Иштин максаты: теориялык анализдин жана эксперименталдык изилдөөлөрдүн негизинде, убактылуу маалыматты, анын ичинде маалыматтарды берүүгө жана иштетүүгө мүмкүндүк берүүчү голографиялык жана акусто-оптикалык принциптерге негизделген жогорку натыйжалуу системаларды жана түзүлүштөрдү түзүүгө негиз салуу. реалдуу убакытта, бул аларды автоматтык системаларда колдонууга мүмкүндүк берет.

Изилдөө методдору: диссертацияда берилген жыйынтыктар когеренттик оптика, голография, Фурье оптика, акусто-оптика жана маалымат теориясынын методдорун колдонуу менен жүргүзүлгөн теориянын жана эксперименттердин негизинде алынган.

Алынган натыйжалар: голографиялык приборлордогу убакыт процесстерин системалуу анализдөөнүн негизинде голографиялык маалыматты жазуу жана иштетүү ылдамдыгын жогорулатуу ыкмалары сунушталды, убакыт процесстерин изилдөө үчүн кош экспозициялык голографиялык интерферометриянын эки жаңы, кыйла эффективдүү ыкмалары сунушталды жана сыналды, голографиялык системаларда жана жазуу чөйрөлөрүндө жазуу процесстеринин кинетикасына изилдөө жүргүзүлдү жана алардын убактылуу маалыматка тийгизген таасирин жана реалдуу убакыт режиминде маалыматты берүү мүмкүнчүлүгүнө баа берет.

Колдонуу боюнча сунуштар: сунушталган ыкмалар голографиялык системаларда жана приборлордо колдонулушу мүмкүн, алар өз кезегинде голограммалардын жана интерферограммалардын керектүү матрицаларын алуу убактысын кыскартуу аркылуу эки өлчөмдүү маалыматтын агымын иштетүү жана сактоо үчүн кеңири колдонулат.

РЕЗЮМЕ

диссертации Исмаилова Джапара Авазовича на тему: «Исследование и разработка методов записи голограмм для хранения и обработки изображений путём компьютерного моделирования» на соискание ученой степени доктора технических наук по специальностям 01.04.05 «Оптика» и 05.13.16 – применение вычислительной техники, математического моделирования и математических методов в научных исследованиях (по отраслям науки)

Ключевые слова: голографическая память, голографический интерферометр, пространственный модулятор света, лазер, акустооптический дефлектор, матрица голограмм, корреляция, фурье – голограмма, интерферограмма.

Объектами исследования являются голографические системы и устройства позволяющие хранить, обрабатывать двумерные информации; голографические методы исследования быстропротекающих процессов; двух пучковые голографические интерферометры.

Целью работы является: на основе теоретического анализа и экспериментальных исследований заложить основы создания высокопроизводительных систем и устройств на базе голографических и акустооптических принципов, позволяющих передавать и обрабатывать временную информацию, в том числе в реальном масштабе времени, что позволит их использовать в автоматических системах.

Методы исследования: результаты, изложенные в диссертации получены на основе теории и экспериментов, проведенных с использованием методов когерентной оптики, голографии, фурье-оптики, акустооптики и теории информации.

Полученные результаты: на основе систематического анализа временных процессов в голографических устройствах предложены методики, позволяющие повысить их быстродействия записи и обработки голографической информации, предложены и испытаны два новых, более эффективных метода двухэкспозиционной голографической интерферометрии для исследования временных процессов, проведено исследование кинетики процессов записи в голографических системах и в записывающих средах и оценено их влияние на временную информацию и возможность передачи информации в реальном масштабе времени.

Рекомендации по использованию: предложенные методики могут быть использованы в голографических системах и устройствах, которые в свою очередь находят широкие применения для обработки и хранения поток двумерных информации путем сокращения времени получения нужных матриц голограмм и интерферограмм.

RESUME

of Ismailov Dzhapar Avazovich's dissertation on the topic: " Research and development of hologram recording methods for image storage and processing by computer simulation " for the degree of Doctor of Technical Sciences in specialty 05.13.16 - application of computing technology, mathematical modeling and mathematical methods in scientific research (by branches of science) and 01.04.05 – optics.

Keywords: holographic memory, holographic interferometer, spatial light modulator, laser, acousto-optic deflector, hologram matrix, correlation, Fourier hologram, interferogram.

The objects of the study are holographic systems and devices that allow storing and processing two-dimensional information; holographic methods for studying fast processes; two-beam holographic interferometers.

The aim of the work is: to lay the foundations for the creation of high-performance systems and devices based on holographic and acousto-optic principles, based on theoretical analysis and experimental research, allowing the transmission and processing of time information, including in real time, which will allow their use in automatic systems.

Research methods: the results presented in the dissertation were obtained on the basis of theory and experiments conducted using the methods of coherent optics, holography, Fourier optics, acousto-optics and information theory.

Results obtained: based on a systematic analysis of time processes in holographic devices, methods were proposed that allow increasing their speed of recording and processing holographic information, two new, more effective methods of double-exposure holographic interferometry for studying time processes were proposed and tested, a study of the kinetics of recording processes in holographic systems and in recording media was conducted and their influence on time information and the possibility of transmitting information in real time was assessed.

Recommendations for use: the proposed methods can be used in holographic systems and devices, which in turn find wide application for processing and storing a flow of two-dimensional information by reducing the time of obtaining the necessary matrices of holograms and interferograms.