



НА ПРАВАХ РУКОПИСИ

УДК 681.7

ДОНЧЕНКО СЕРГЕЙ СЕРГЕЕВИЧ

**МЕТОДЫ СИНТЕЗА И ЗАПИСИ ГОЛОГРАММ ФУРЬЕ В
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВАХ
АРХИВНОГО ХРАНЕНИЯ ЦИФРОВОЙ ИНФОРМАЦИИ**

специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2018

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Одинокоев Сергей Борисович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры лазерных и оптико-электронных систем

Официальные оппоненты: **Лукин Анатолий Васильевич**, доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник АО «НПО «Государственный институт прикладной оптики», г. Казань

Штанько Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры Физики, Московский государственный технологический университет «Станкин», г. Москва

Ведущая организация: Всероссийский Научно-Исследовательский Институт Оптико-Физических Измерений, г. Москва

Защита диссертации состоится «23» мая 2018 года в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НУК РЛМ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан « » апреля 2018 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.19
кандидат физико-математических наук


Д.А. Семеренко

Актуальность темы исследования. В настоящее время оптические запоминающие устройства активно используются для долговременного (архивного) хранения больших массивов цифровой информации, например, аэрокосмических изображений, полученных в результате дистанционного зондирования Земли; медицинских изображений; биометрических данных для паспортов и виз.

Наибольшее распространение для долговременного хранения цифровой информации получили оптические запоминающие устройства на оптических дисках диаметром 120 мм (CD, DVD, BLU-RAY), которые по сравнению с носителями на жестких магнитных дисках и магнитных лентах невосприимчивы к электромагнитным помехам. При этом величина вероятности битовых ошибок (Bit Error Rate – BER) для таких устройств должна быть не более 10^{-4} [стандарт White Paper Blu-ray Disc™ Format, General, 2015]. Однако такие устройства [например, Panasonic LB-DH8, Япония] подошли к теоретическому пределу по плотности записи цифровой информации ($0,018$ Гбит/мм²) и позволяют хранить информацию в соответствии со спецификацией не более 10 лет. Повышение информационной емкости таких устройств производится путем увеличения количества оптических дисков и роботизированных приводов, что существенно увеличивает их массогабаритные параметры, энергопотребление и стоимость.

Перспективным путем повышения информационной емкости оптических запоминающих устройств для архивного хранения (до 50 лет) цифровой информации является применение голографических методов записи цифровой информации, в частности, записи на один и тот же участок носителя нескольких голограмм (мультиплексирование). На основе носителей информации в виде голографических дисков (или карт) создаются голографические запоминающие устройства (ГЗУ), подразделяемые на ГЗУ записи цифровой информации и ГЗУ считывания цифровой информации.

Разработкой и созданием ГЗУ в России занимались в лабораториях под руководством Микаэляна А.Л., Бобринева В.И. (НИИ Радиооптики, Москва), Вишнякова Г.Н., Левина Г.Г. (ФГУП «ВНИИОФИ», Москва), Твердохлеба П.Е., Штейнберга И.Ш. (Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН), Шойдина С.А. (Сибирский государственный университета геосистем и технологий, Новосибирск), Одинокоева С.Б. (МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва). За рубежом разработкой ГЗУ занимаются в лабораториях под руководством Y. Kaneko, H. Horimai (OPTWARE, Япония), K. Tanaka (SONY, Япония), K. Kurtis, T. Shimura (Inphase и Akonia Holographics, США).

Вышеперечисленными учеными были разработаны прототипы ГЗУ, построенные на основе классического двухлучевого интерференционного метода записи мультиплексированных микроголограмм Фурье (МГФ, площадью ≤ 1 мм²) в фоторегистрирующих средах толщиной не менее 20 мкм и достигли плотности записи цифровой информации ~ 1 Гбит/мм². Однако, такие ГЗУ имеют ряд недостатков:

- необходимость применения виброизолирующих оптических столов и оптико-механических элементов и узлов при записи микроголограмм Фурье приводит к значительному увеличению массогабаритных параметров ГЗУ;

-необходимость использования дорогостоящих фотополимерных регистрирующих сред с толщиной слоя от 100 мкм и до 1 мм для мультиплексной записи МГФ приводит к повышенными требованиями по однородности и равномерности толщины слоя среды (не более ± 300 нм);

- невозможность контроля параметров голограммы при ее записи на фоточувствительную регистрирующую среду и появление дополнительных помех в восстановленном изображении от мультиплексированных голограмм при считывания цифровой информации с голографического носителя приводит к увеличению значения вероятности битовой ошибки BER (Bit Error Rate) до величины $1,6 \cdot 10^{-3}$. Таким образом тема диссертации является актуальной.

Для решения вышеперечисленных недостатков существующих ГЗУ автором предложено вместо классического двухлучевого интерференционного метода записи голограмм использовать метод синтеза одномерных МГФ, которые представляются в компьютере в виде матрицы отсчетов полутонового изображения, и метода записи компьютерно-синтезированных одномерных МГФ на фоточувствительную регистрирующую среду с помощью проекционной оптической системы и пространственного модулятора света (ПМС).

Целью диссертационной работы являлась разработка методов синтеза одномерных микроголограмм Фурье, методов записи одномерных мультиплексированных микроголограмм Фурье на голографический носитель и создание малогабаритных архивных голографических запоминающих устройств с уменьшенной вероятностью битовой ошибки $BER \sim 10^{-6}$ и пониженными требованиями к виброизоляции.

Для достижения поставленной цели диссертации были поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Проведен сравнительный анализ известных голографических методов записи и восстановления страниц цифровой информации с повышенной информационной плотностью (до 1 Гбит/мм² на носитель информации в виде диска диаметром 120 мм).

2. Разработано математическое описание метода синтеза одномерных микроголограмм Фурье, входными данными для которых является цифровая информация, представленная в виде страниц цифровой информации (СЦИ).

3. Разработан метод записи одномерных мультиплексированных микроголограмм Фурье в проекционной некогерентной оптической системе на основе компьютерно-синтезированных одномерных микроголограмм Фурье.

4. Разработан метод расчета вероятности битовых ошибок BER для ГЗУ с проекционной оптической системой записи голограмм, который характеризует качество функционирования ГЗУ.

5. Разработаны методы раздельного восстановления страниц цифровой информации с мультиплексированных одномерных микроголограмм Фурье.

6. Разработаны когерентные оптические системы для ГЗУ-считывания цифровой информации и проведен математический анализ преобразования оптических полей и сигналов в них.

7. Проведенные экспериментальные исследования макета ГЗУ-записи для получения одномерных мультиплексированных МГФ и макета ГЗУ-считывания для восстановления бинарных изображений страниц цифровой информации подтвердили справедливость основных теоретических положений.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовался математический аппарат частотного анализа оптических систем, статистической обработки результатов экспериментов, теории вероятности, а также методы математического и компьютерного моделирования.

Научная новизна полученных в работе результатов:

1. Предложен новый метод синтеза одномерных МГФ для ГЗУ записи цифровой информации, учитывающий параметры дискретизации СЦИ и фазовой маски, нелинейности модуляционной характеристики ПМС, МПФ некогерентной проекционной оптической системы, что позволило получить МГФ на фоторегистрирующей среде с расчетными параметрами и повышенной дифракционной эффективностью.

2. Впервые предложен метод записи одномерных микроголограмм Фурье в проекционной некогерентной оптической системе с угловым мультиплексированием, что позволило отказаться от классической двухлучевой интерференционной схемы получения микроголограмм Фурье и в несколько раз повысить допуск на амплитуду вибрации при экспонировании.

3. Впервые предложено использовать когерентные анаморфотные оптические системы для раздельного считывания одномерных мультиплексированных МГФ, что позволило уменьшить величину вероятности битовой ошибки BER на 2 порядка по сравнению с существующими устройствами ГЗУ считывания цифровой информации.

Практическая значимость результатов работы заключается в том, что разработанные методы синтеза и записи МГФ и созданные на их основе ГЗУ записи и ГЗУ считывания цифровой информации могут быть использованы для хранения цифровой информации (в частности, на предприятии АО «НПО «Криптен»), за счёт увеличения плотности записи информации на 20% и сниженной вероятности битовых ошибок BER на 2 порядка по сравнению с дисками BLU-Ray.

Положения, выносимые на защиту:

1. Разработанный метод синтеза одномерных голограмм Фурье позволяет на 6-10% увеличить дифракционную эффективность микроголограмм Фурье, полученных на фоточувствительной регистрирующей среде, за счёт учёта параметров дискретизации страницы цифровой информации и фазовой маски, линейаризации модуляционной характеристики пространственного модулятора света, модуляционно-передаточной функции некогерентной проекционной оптической системы.

2. Разработанный метод записи с угловым мультиплексированием одномерных микроголограмм Фурье в некогерентной проекционной оптической системе позволяет уменьшить габаритные размеры ГЗУ записи цифровой информации до 10 раз, массу до 50 раз, повысить допуск на амплитуду вибраций в 4 раза и получить плотность записи $\sim 0,02$ Гбит/мм² для голографического диска на основе галогенидосеребряных фоточувствительных регистрирующих сред.

3. Использование анаморфотной оптической системы в ГЗУ считывания цифровой информации позволяет восстанавливать бинарные изображения СЦИ с одномерных мультиплексированных микроголограмм Фурье с вероят-

ностью битовой ошибки BER $\sim 10^{-6}$, что подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Достоверность выводов диссертационной работы обеспечивается согласованностью теоретических положений и результатов экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались и обсуждались на III и IV Международных конференциях по фотонике и информационной оптике «ИнформОптика», конференции «ГОЛО-ЭКСПО-2014», «ГОЛОЭКСПО-2015», международной конференции SPIE Optics and Optoelectronics 2015, международной конференции Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2016, международной конференции SPIE Optics and Optoelectronics 2017.

Внедрение результатов работы:

Работа выполнена в рамках выполнения Соглашения от 2012 г № 14.В37.21.1279, в рамках проектной части государственного задания № 3.9.2014К Минобрнауки России. Разработанные оптико-электронные устройства записи/считывания были внедрены в АО «НПО «КРИПТЕН», что подтверждено Актом о внедрении.

Личный вклад автора состоит в разработке методов синтеза и записи мультиплексированных одномерных МГФ, их математическом моделировании с применением программных средств MATLAB. Автор лично собрал макеты ГЗУ записи цифровой информации и ГЗУ считывания цифровой информации, провёл на них экспериментальные исследования, занимался анализом полученных результатов, в частности автором был разработан алгоритм декодирования информации с изображения бинарной СЦИ.

Публикации Основные результаты диссертации опубликованы в 22 публикациях общим объемом 14 п.л., в том числе в 5 статьях, опубликованных в статьях, входящих в перечень ВАК РФ, и 2 патента на полезную модель.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов и заключения. Работа изложена на 148 страницах машинописного текста, содержащих 92 рисунка, 5 таблиц, список литературы из 72 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи работы, определена научная новизна и практические результаты, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведены обзор и сравнительный анализ литературных источников в области запоминающих устройств для архивного хранения цифровой информации. По физическим признакам их можно разделить на следующие группы: накопители на жёстких магнитных дисках; накопители на полупроводниковых чипах (Flash-память); накопители на магнитных лентах (стримеры); оптические диски (Blu-ray, DVD, CD). Для архивного хранения информации больше всего подходят запоминающие устройства (ЗУ), построенные на оптических дисках, так как они энергонезависимы, не чувствительны к электромагнитным помехам. Однако, ЗУ на оптических дисках подошли к теоретическому пределу по плотности записи цифровой информации (0.018

Гбит/мм²) и позволяют хранить информацию в соответствии со спецификацией не более 10 лет.

Для увеличения плотности записи информации до 1 Гбит/мм² и срока хранения до 50 лет применяют голографические методы, заключающиеся в записи на фоточувствительную среду мультиплексированных голограмм с кодированной информацией в виде СЦИ.

В первой главе приведены результаты разработки ГЗУ таких компаний, как Optware (Япония), Sony (Япония), InPhase (США), Akonia (США). Проведены сравнительный анализ и классификация существующих ГЗУ для хранения цифровой информации в виде цифровых снимков спутниковых снимков большого разрешения; баз данных с медицинскими изображениями людей в течении их жизни; баз данных с биометрической информацией по паспортам, визам.

Такой подход дает следующие преимущества: увеличение срока хранения информации до 50 лет (для галогенидосеребряных эмульсий); увеличение теоретического предела плотности хранения информации по сравнению с другими системами хранения информации, который обуславливается записью нескольких голограмм в одну область наложением; увеличение теоретической скорости записи/считывания информации по сравнению с побитовыми системы за счет работы со страницами цифровой информации; невосприимчивость к электромагнитным помехам; низкое энергопотребление при записи/считывании информации и его отсутствие при хранении; отсутствие механического контакта при записи/считывании информации.

Существующие прототипы голографической памяти помимо высокой плотности хранения информации обладают также и рядом недостатков: повышенными массогабаритными параметрами ГЗУ записи цифровой информации; повышенными требованиями по виброустойчивости к конструкции записывающих устройств ГЗУ; невозможностью контроля параметров голограммы при ее записи на фоточувствительную регистрирующую среду; повышенными требованиями к неравномерности толщины фотополимеров; используемых в качестве фоторегистрирующих сред.

В качестве альтернативы классическому - двухлучевому методу записи голограмм, предлагается использование методов компьютерного синтеза голографических структур, приведены структурно-функциональная схема получения мультиплексированных микроголограмм Фурье и считывания информации с мультиплексированных микроголограмм Фурье (МГФ).

Вторая глава посвящена разработке метода синтеза голограмм для ГЗУ записи цифровой информации и проекционному методу записи синтезированных голограмм на фоточувствительный материал.

При синтезе голограммы необходимо рассчитать распределение интенсивности интерференционного поля в плоскости регистрации голограммы (I_r) согласно основному уравнению голографии:

$$I_r = U_{on}^* \cdot U_{on} + U_{ob}^* \cdot U_{ob} + U_{on} \cdot U_{ob}^* + U_{ob} \cdot U_{on}^*,$$

где U_{on} – комплексная амплитуда опорной волны; U_{ob} – комплексная амплитуда объектной волны. В качестве опорной волны при расчетах использовалась плоская волна, а вид объектной зависит от типа рассчитываемой голограммы, для голограмм Фурье комплексную амплитуду объектной волны

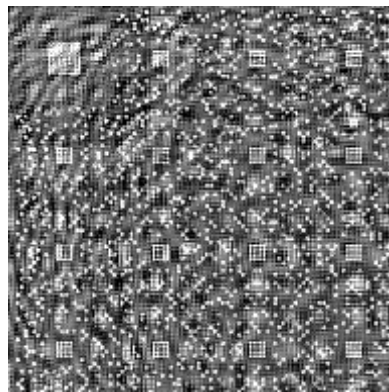
можно записать

$$U_{об}(x_1, y_1) = \frac{\exp(ikz) \exp[i \frac{k}{2z} (x_0^2 + y_0^2)]}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_0, y_0) \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda z} (x_0 x_1 + y_0 y_1)) dx_0 dy_0,$$

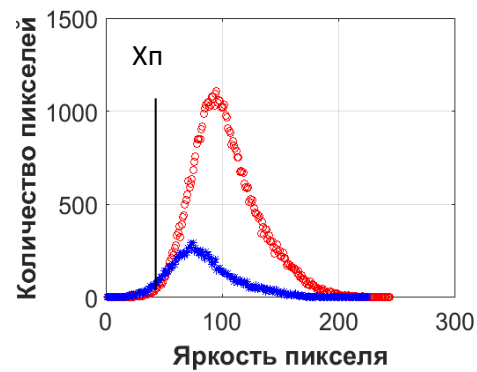
для голограмм Френеля:

$$U_{об}(x_1, y_1) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U(x_0, y_0) \cdot \exp(i \frac{k}{2z} [(x_1 - x_0)^2 + (y_1 - y_0)^2]) dx_0 dy_0,$$

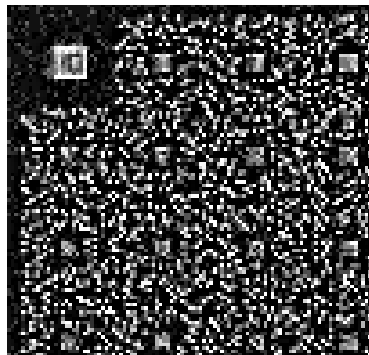
где x_1, y_1 – координаты в плоскости регистрации голограммы, k – волновое число, λ – длина волны излучения, x_0, y_0 – координаты в плоскости объекта, z – расстояние от плоскости объекта до плоскости регистрации голограммы. Задача синтеза голограммы заключается в расчете $U_{он} \cdot U_{об}^* + U_{об} \cdot U_{он}^*$, так как члены $U_{он} \cdot U_{он}$ и $U_{об} \cdot U_{об}$ – автокорреляционные составляющие от опорной и объектной волн и не несут в себе полезную информацию. Для оценки применимости голограмм Фурье и Френеля для хранения информации были рассчитаны голограммы от СЦИ, кодированной по стандарту ЕСМА-378, затем с них были численно восстановлены страницы цифровой информации (Рис. 1).



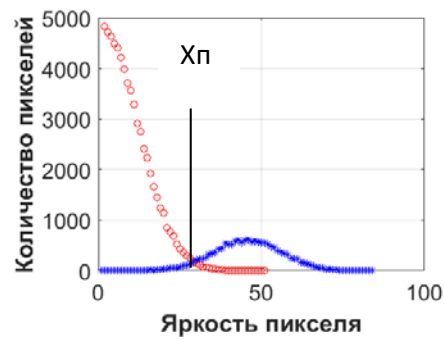
а)



б)



в)



г)

Рис. 1. а) фрагмент восстановленного изображения бинарной СЦИ с голограммы Френеля, б) гистограмма бинарных сигналов изображения а, в) фрагмент восстановленного бинарного изображения СЦИ с голограммы Фурье, гистограмма бинарных сигналов изображения в (синим цветом обозначены – логические «1», красным – логические «0»)

Восстановленные страницы цифровой информации и гистограммы бинарных сигналов приведены на Рис. 1. Пиксели, имеющие яркость выше пороговой $x_{п}$ – принимаются за логические биты «1», меньше – за логические биты «0». Вероятность битовых ошибок BER определялась, как

$$BER = K_{код} \cdot \left(\int_{x_n}^{255} \frac{1}{\sigma_1 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \bar{x})^2}{2\sigma_1^2}\right] + \int_0^{x_n} \frac{1}{\sigma_0 \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{x^2}{2\sigma_0^2}\right] \right),$$

где $K_{код}$ – вероятность битовой ошибки при одном неправильно распознанном символе (в случае, если используется прямая кодировка цифровой информации $K_{код} = 1$), σ_1 – среднее квадратическое отклонение функции плотности распределения битов «1», σ_0 – среднее квадратическое отклонение функции плотности распределения битов «0». Вероятность битовых ошибок для численно восстановленной СЦИ с голограмм Фурье составила $\sim 10^{-4}$ (Рис. 1, в), с голограмм Френеля – 0,3 (Рис. 1, а). Поэтому для ГЗУ записи информации целесообразно использовать Фурье голограммы, как обеспечивающие большую надежность хранения цифровой информации.

Для записи компьютерно-синтезированной голограммы Фурье на фоточувствительный материал используется проекционная оптическая схема (см. Рис. 2).

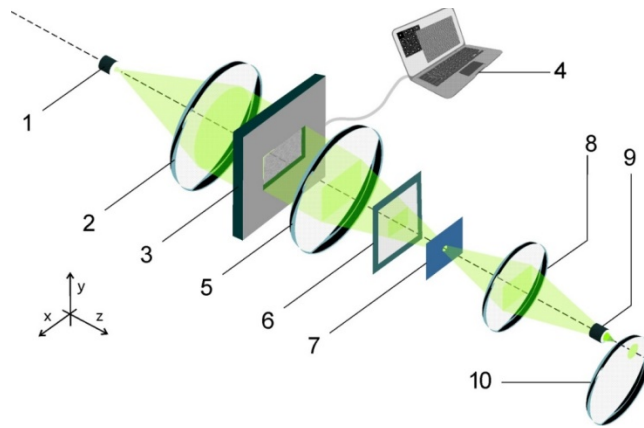


Рис. 2. Схема записи компьютерно-синтезированных голограмм Фурье. 1 – источник излучения (светодиод), 2 – коллимирующий объектив; 3 – ПМС; 4 – персональный компьютер; 5 – Фурье-объектив; 6 – анализатор; 7 – диафрагма; 8 – объектив; 9 – микрообъектив; 10 – голографический диск

Рассчитанная голограмма Фурье выводится на пространственный модулятор света ПМС (3), представляющий из себя жидкокристаллический экран с поляризатором и анализатором. ПМС освещается плоской волной от источника излучения (1). В отличие от классических схем, где требуется высокостабильный одночастотный лазер для формирования интерференционных картин, в проекционной оптической схеме используется светодиод. Это позволяет упростить и удешевить схему записи, и устранить спекл-шумы при регистрации голограммы на фоточувствительной среде.

В работе приведена оценка предельной плотности хранения информации с помощью двумерных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье. Объем информации, который можно записать на диск диаметром 130

мм составляет ~13,27 Гбит. Невысокая плотность записи информации связана с невозможностью селективного восстановления мультиплексированных двумерных МГФ, записанных проекционным методом.

Для увеличения емкости голографических дисков предлагается использовать одномерные голограммы Фурье. При освещении их опорным излучением, оптическое излучение дифрагирует только в направлении, соответствующему ориентации одномерной голограмм.

Эта особенность позволяет мультиплексировать одномерные голограммы Фурье их поворотом относительно оси, перпендикулярной плоскости записи. Оптический эквивалент компьютерного синтеза приведен на Рис.3.

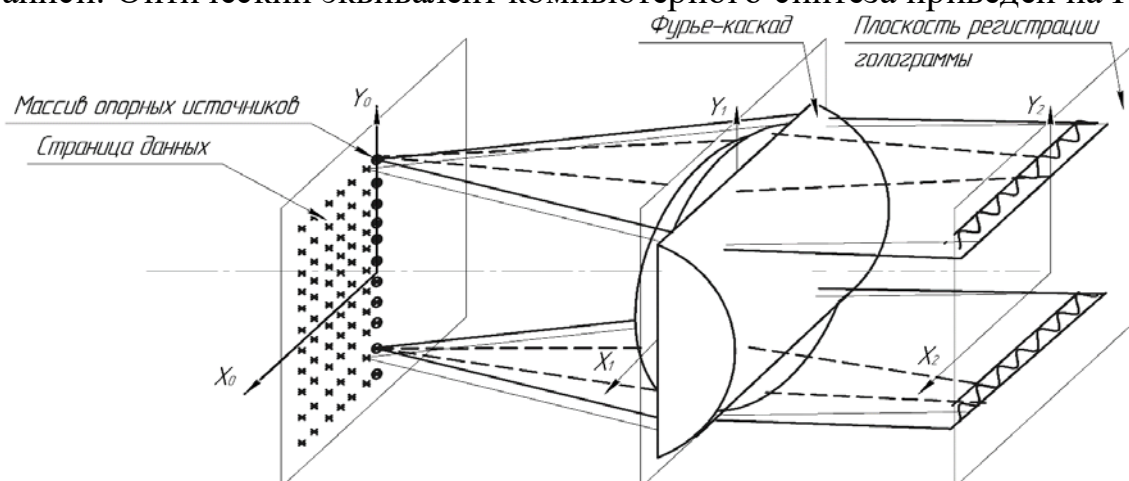


Рис. 3. Оптический эквивалент схемы компьютерного синтеза одномерной голограммы Фурье

При расчете каждая строка СЦИ (Рис. 4, а) представляется в виде одномерной голограммы, таким образом интенсивность i -й $I_{i\Gamma}$ строки голограммы (Рис.4) определяется из выражения

$$I_{i\Gamma}(k) = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^M \text{Obj}(l) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{M} \cdot l \cdot i\right) + C_i,$$

где $\text{Obj}(l)$ – амплитуда отсчета СЦИ по координате l СЦИ, C_i – константа, подбираемая так, чтобы яркость всех строк i была примерно равна, k – номер отсчета голограммы, M – количество отсчетов голограммы. Результат расчета одномерной голограммы Фурье приведен на Рис.4.



Рис. 4. Фрагмент одномерной компьютерно-синтезированной голограммы Фурье

В работе был проведен анализ влияния алгоритма кодирования цифровой информации для одномерной компьютерно-синтезированной голограммы Фурье на вероятность BER (Рис.5). Из Рис. 5,а видно, что гистограмма логических битов «1» для СЦИ, восстановленной с одномерной голограммы, «размыта» больше, чем с двумерной голограммы. Это связано с тем, что стандарт кодировки ЕСМА-378 был разработан для двумерных голограмм и гарантирует одинаковое количество битов «1» для всех СЦИ, при этом в разных

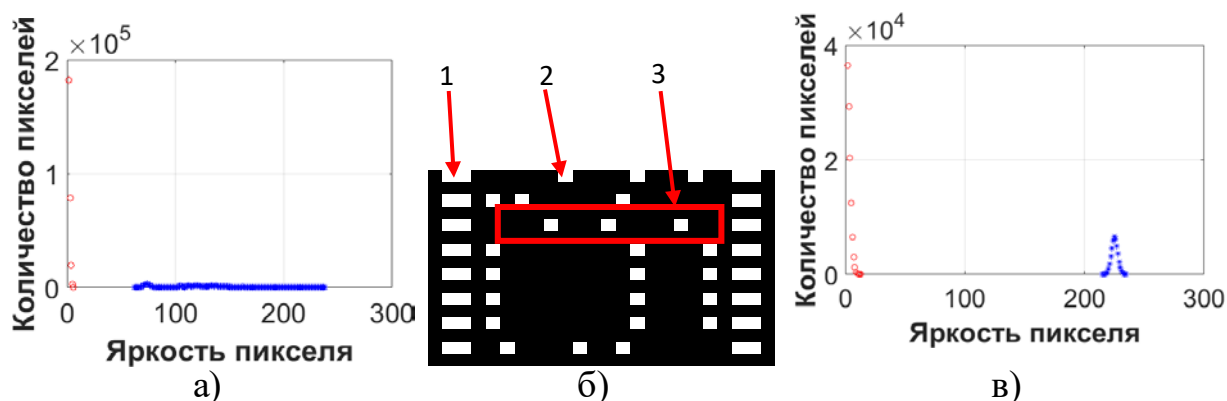


Рис.5. а) гистограмма бинарных сигналов с восстановленного изображения бинарной СЦИ, закодированной по стандарту ЕСМА-378 б) фрагмент СЦИ со специальным кодированием для одномерных голограмм Фурье в) гистограмма бинарных сигналов с восстановленного изображения с специальной кодировкой (синим цветом обозначены – логические «1», красным – логические «0»)

строках СЦИ количество битов «1» может существенно отличаться. Для одномерных голограмм требуется специальное кодирование информации, при котором в каждой строке будет одинаковое количество битов «1», кроме того, необходимо добавить реперные элементы в каждой строке, чтобы при восстановлении можно было определить масштаб восстановленной СЦИ для каждого символа СЦИ и компенсировать локальные искажения из-за спекл-шумов. Фрагмент СЦИ, закодированной по специальному алгоритму приведен на Рис. 5,б, 1 – реперный элемент, 2- логический «1», 3 – символ, кодирующий 8 бит. На Рис. 5,в приведена гистограмма бинарных сигналов с восстановленной СЦИ, закодированной по специальному алгоритму, вероятность BER при этом составила 10^{-8} .

Для увеличения дифракционной эффективности голограмм и уменьшения вероятности битовых ошибок BER автором предлагается на этапе синтеза добавлять к СЦИ псевдослучайную фазовую маску

$$I_{i\Gamma}(k) = \frac{1}{M} \sum_{l=0}^M \text{Obj}(l) \cdot \cos\left(\frac{2\pi}{M} \cdot l \cdot i + \varphi(l)\right) + C_i,$$

где $\varphi(l)$ – значение фазовой маски для отсчета l СЦИ. Было исследовано влияние количества уровней квантования фазовой маски, размерности фазовой маски на дифракционную эффективность голограммы и вероятность битовой ошибки. При использовании фазовой маски с двумя уровнями квантования «0» и « π » и размером фазовой маски в один пиксель СЦИ была получена максимальная эффективность одномерной голограммы Фурье $\sim 40\%$ и вероятность битовых ошибок – 10^{-12} . Но из-за того, что размер логического бита СЦИ составляет 2×1 пиксель, в случае, когда на один пиксель объекта накладывается фазовая маска с разными отсчетами – на границе образуется разрыв, из-за этого реальная вероятность битовых ошибок снижается до 10^{-8} . Если устранить разрывы фазы на одном элементе СЦИ, то есть увеличить элемент фазовой маски до 2×1 пикселей – вероятность битовой ошибки составит 10^{-10} , при этом расчетная дифракционная эффективность составит 34%.

Было исследовано влияние нелинейной модуляционной характеристики

ПМС и фоточувствительного материала при записи компьютерно-синтезированной голограммы Фурье на вероятность BER при восстановлении СЦИ, записанной при неидеальных модуляционных характеристиках ПМС и фоточувствительного материала.

В третьей главе рассмотрены методы восстановления изображения бинарной СЦИ с одномерных МГФ. Возможность раздельного считывания информации с мультиплексированных одномерных МГФ обуславливается тем, что одномерная МГФ состоит из массива элементарных одномерных голограмм, параллельных друг другу, т.е. дифракция и соответственно восстановление изображений с отдельной одномерной голограммы происходит в одном направлении и определяется ее ориентацией на фоточувствительном материале;

В 3й главе рассмотрены два метода раздельного восстановления информации с мультиплексированных одномерных МГФ: построчный и постраничный (см. Рис. 6).

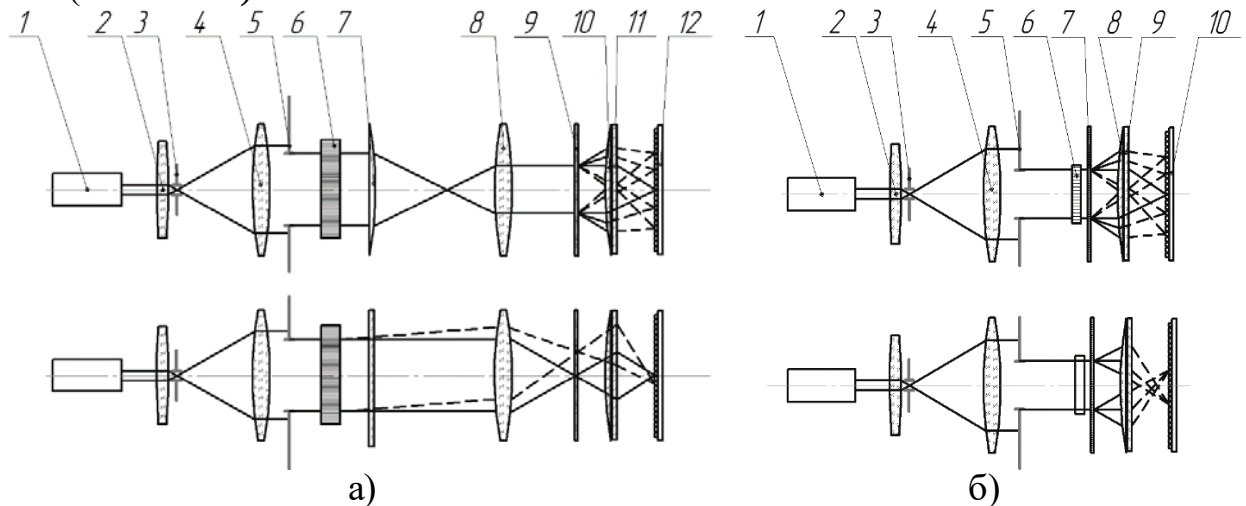


Рис. 6. а) построчная схема восстановления одномерных голограмм б) постраничная схема восстановления одномерных голограмм

При постраничном методе считывания цифровой информации опорный луч, эквивалентный тому, что использовался при расчете МГФ, формируется лазером (1), оптическим узлом фильтрации(2,3), коллиматором (4) и диафрагмой(5). Он освещает целиком голограмму (7) через щелевой фильтр (6), формирующий матрицу лучей, одновременно освещающих все элементарные одномерные голограммы Фурье.

Световое поле U_1 после анаморфотного Фурье каскада(8,9) в плоскости фотоприемника(10), регистрируемое приемником оптического излучения (11) описывается в двух сечениях:

$$U_1(y_1) = \frac{A}{i\lambda f_1} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} U_f \exp[-i \frac{2\pi}{\lambda f_1} (y y_{d1})] dy,$$

$$U_l(x_l) = \frac{A}{i\lambda f_l} \int_{-\infty}^{\infty} U_f \exp[-i \frac{2\pi \cdot b_l}{\lambda}] dx,$$

где U_f – световое поле за Фурье-линзой, b_l – ширина одномерной голограммы, A – амплитуда светового поля.

Для построчного считывания одномерных мультиплексированных МГФ оптическая схема (2-8) формирует в плоскости носителя информации световой пучок в виде линии, сфокусированной по одной из координат в размер ширины отдельной строки одномерной голограмм Фурье (9). Световой пучок совмещается с элементарной одномерной МГФ с помощью дефлектора (6), который отклоняет восстанавливающий пучок вдоль меридиональной плоскости. Продифрагировавшее на элементарной одномерной МГФ излучение преобразуется Фурье-объективом (10,11) в задней фокальной плоскости в строку цифровой страницы данных. В данной схеме нет необходимости фокусирования восстановленного изображения одного бита информации в задней фокальной плоскости объектива (10,11) в точку, если используется матричный приемник оптического излучения (12). Продифрагировавшее световое поле U_f , формирующее строку, восстановленной страницы данных, которая регистрируется матричным фотоприемником, можно описать как

$$U_f(x) = \frac{A \exp[i \frac{k}{2f} (1 - \frac{d_0}{f})(x_f^2)]}{i\lambda f} \int_{-\infty}^{\infty} t(x_0) \exp(-i \frac{2\pi}{\lambda f} (x_0 x_f)) dx_0,$$

где $t(x_0)$ – коэффициент пропускания МГФ, d_0 – расстояние от МГФ до объектива Фурье, x_0 – координата отсчета МГФ.

В четвертой главе изложена методика проектирования ГЗУ архивной голографической памяти для записи/считывания цифровой информации.

Для получения компьютерно-синтезированных голограмм проекционным методом автором предложено использовать оптико-электронный прибор, его функциональная схема (Рис.7, а) защищена патентом РФ № 162199.

В состав ГЗУ записи цифровой информации входят: 1 – оптическая система подсветки, 2- оптическая система фильтрации изображения ПМС, 3 – ПМС, 4 – поворотная моторизированная платформа, 5- диафрагма, 6 – проекционная оптическая система, 7 – фоточувствительная пластина, 8 – моторизированная двухкоординатная платформа, 9 – блок управления поворотной платформой, 10 – источник излучения, 11 – затвор, 12 – компьютер, 13 – блок управления двухкоординатной платформой. Некогерентное излучение, формируемое оптической системой (1) освещает ПМС. На ПМС выводятся компьютерно-синтезированные (КС) ГФ, рассчитанные компьютером (12). Далее КС ГФ преобразуются в распределение интенсивности света, которое фильтруется с помощью оптической системы (2) и диафрагмы (5). После фильтрации проекционная системы (6) переносит с уменьшением отфильтрованное изображение КС ГФ на фоточувствительную пластину.

Исходными данными для проектирования ГЗУ являются: плотность хранения информации, скорость записи цифровой информации, вероятность битовых ошибок при декодировании восстановленных с голограммы изображений бинарных СЦИ, срок хранения информации.

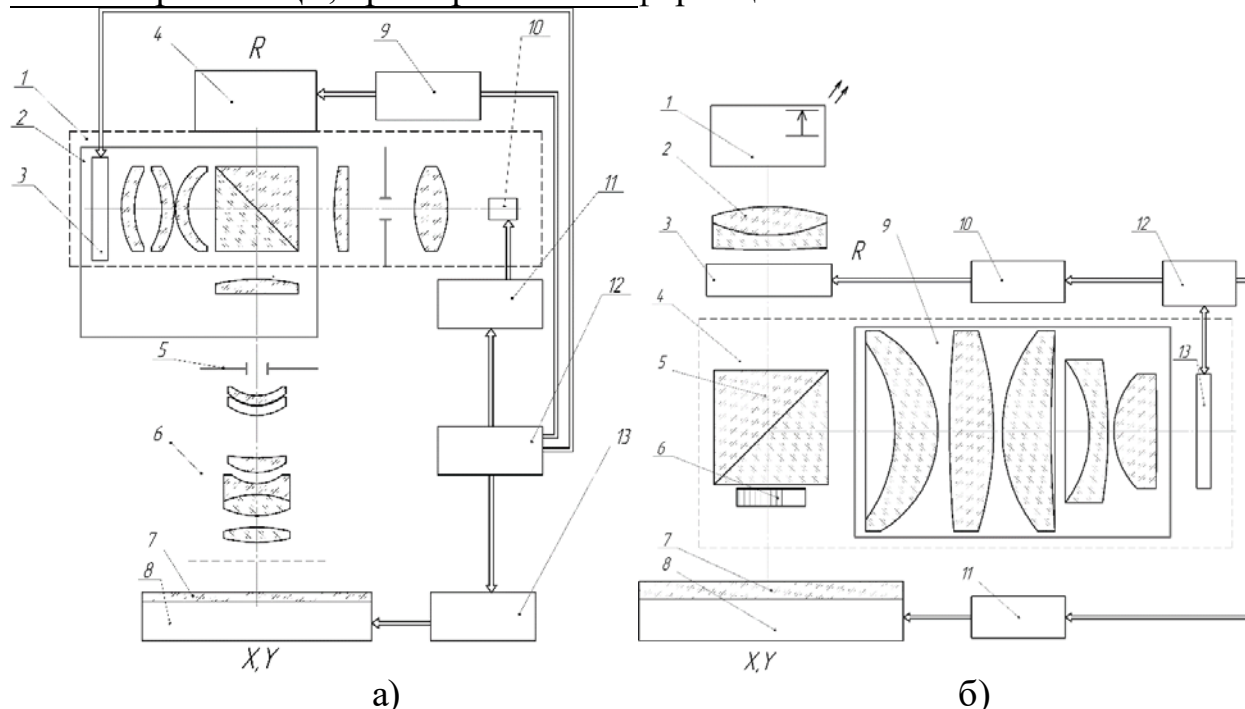


Рис. 7. а) функциональная схема ГЗУ записи цифровой информации б) функциональная схема ГЗУ считывания цифровой информации

Плотность хранения информации $\rho_{\text{зап}}$ определяется по формуле

$$\rho_{\text{зап}} = \frac{M \cdot \Gamma_y^2}{16 \cdot a^2},$$

где M - количество мультиплексированных микроголограмм, Γ_y – уменьшение проекционной системы, a – размер пикселя ПМС.

Скорость записи определяется быстродействием механических узлов (временем перемещения двухкоординатной платформы t_l , временем наведения поворотной платформы t_r), временем расчета КСГФ t_p и экспозиции t_o одной голограммы на фоточувствительном материале.

$$v_{\text{сх}} = \frac{1}{t_l + t_r + t_o + t_p}.$$

Время экспозиции прямо пропорционально мощности излучения в плоскости регистрации голограммы $P_{\text{вых}}$:

$$P_{\text{вых}} = \tau_d \tau_{\text{оо}} \tau_{\text{пвмс}} \tau_{\text{ос}} \tau_{\text{ф}} P_{\text{вх}},$$

где $\tau_{\text{пвмс}}$ - коэффициент пропускания ПВМС, $\tau_{\text{ф}}$ - коэффициент пропускания фильтра, $\tau_{\text{ос}}$ - коэффициент пропускания оптической системы, τ_d - коэффициент пропускания диафрагмы, $\tau_{\text{оо}}$ -коэффициент пропускания осветительной системы.

Допустимая величина вибрации s для устройства записи рассчитывалась по формуле:

$$s \leq \frac{T_{\Gamma}}{4},$$

где T_{Γ} - период записываемой структуры. При проекционном методе записи минимальный период $T_{\min}$ записываемой решетки определяется

$$T_{\min} = 2d \cdot \Gamma_y,$$

где d – размер пикселя ПМС. Тогда минимальный период составит 727 нм для использовавшегося объектива с уменьшением $11^{\times}$, а допуск на вибрацию составит 182 нм. При том для ГЗУ с интерференцией конаправленных лучей типовая величина минимального периода голограмм составляет 330 нм при допуске на вибрацию 83 нм, для контрнаправленных лучей - 100 нм с допуском на вибрацию ~25 нм. Таким образом применение проекционной схемы при записи голограмм позволяет уменьшить допуск на вибрацию по сравнению с существующими схемами в 2 раза. Экспериментальные исследования подтвердили, что разработанному ГЗУ записи цифровой информации не требуется оптический стол с виброизоляцией для записи голограмм.

Для отдельного восстановления с мультиплексированных одномерных МГФ бинарного изображения СЦИ автором предложено использовать оптико-электронный прибор, представленный на Рис.7,б, его функциональная схема защищена патентом РФ № 167474.

В состав ГЗУ считывания цифровой информации входят: 1 – когерентный источник излучения, 2 – осветительная система, 3 – поворотная моторизованная платформа, 4 – оптическая система восстановления изображения цифровых страниц данных, 5 – светоделительный куб, 6 – пространственный фильтр, 7 – фотопластинка, 8- моторизованная двухкоординатная платформа, 9 – аноморфотный Фурье-объектив, 10 – блок управления моторизованной поворотной платформой, 11 – блок управления моторизованной двухкоординатной платформой, 12 – компьютер, 13 – матричный фотоприёмник. Для считывания информации с МГФ осветительная система прибора (2,5,6) освещает голограмму, а матрица КМОП регистрирует распределение интенсивности, формируемое Фурье-объективом (9). Для восстановления информации с соседней мультиплексированной МГФ, моторизованная платформа(3) совмещает ось и направляющую аноморфотного Фурье-объектива(9) с ориентацией считываемой голограммы Фурье.

Исходными данными для проектирования ГЗУ являются: геометрические параметры мультиплексированных МГФ, скорость считывания цифровой информации, вероятность битовых ошибок.

Угловое поле φ оптической системы ГЗУ считывания цифровой информации определяется по формуле:

$$\sin \varphi = \frac{2\lambda}{a},$$

где λ – длина волны оптического излучения, a – размер голографического пикселя.

Выбор матричного приемника излучения (МПИ) и расчет фокусного расстояния оптической системы – взаимосвязанные параметры, которые определяются по формуле

$$d \cdot k_N = \frac{2 \cdot f'_{fs} \cdot \lambda}{a \cdot N},$$

где d – размер пикселя МПИ, k_N – число ячеек МПИ, приходящихся на один пиксель восстановленного бинарного изображения КЦСД, f'_{fs} – фокусное расстояние Фурье-объектива, N – число информационных точек в регистрируемом фрагменте СЦИ.

Скорость считывания цифровой информации определяется быстродействием механических узлов (временем перемещения между МГФ двухкоординатной платформы t_l и временем наведения поворотной платформы t_r) и временем экспозиции МПИ (13) t_g по формуле:

$$v_{cx} = \frac{1}{t_l + t_r + t_g}.$$

У записанных на ГЗУ записи цифровой информации (Рис. 7,а) голограмм исследовалась дифракционная эффективность, затем на ГЗУ считывания цифровой информации (Рис. 7,б) с них восстанавливались СЦИ, которые декодировались и считывалась исходная цифровая информация.

Измерения дифракционной эффективности показали, что дифракционная эффективность одиночной голограммы без фазовой маски составила 3%, с учетом фазовой маски составила – 8-12%. Для мультиплексированных голограмм дифракционная эффективность зависела от количества мультиплексирований, при 40 мультиплексирования, дифракционная эффективность каждой голограммы составила ~0,3%.

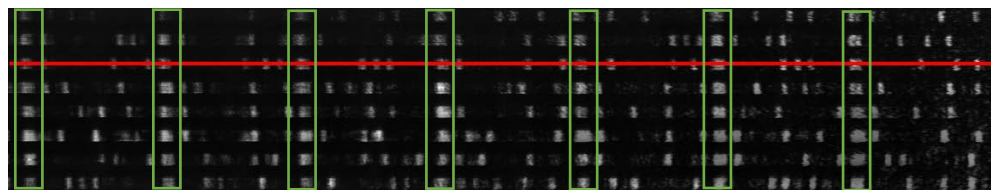
Автором был разработан алгоритм декодирования информации, который позволил экспериментально оценить вероятность битовых ошибок BER ГЗУ считывания цифровой информации. В зарегистрированном изображении бинарной СЦИ находится усредненное распределение яркости по строкам $\bar{I}(x)$, для которого ищется АКФ $F(x)$

$$F(x) = \int_0^{N-\bar{x}} \bar{I}(x) \bar{I}(x-x') dx.$$

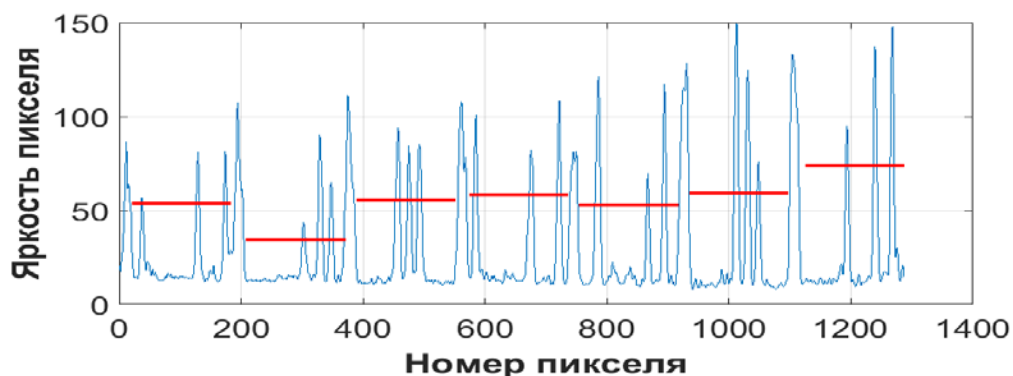
С помощью анализа АКФ определяется расстояние между реперными элементами (на Рис. 8,а показаны зеленым цветом) и строится реперная маска M , затем рассчитывается кросскорреляционная функция исходного кадра с маской M - $(I * M)$, анализ пиков кросскорреляционной функции позволяет определить координаты реперных точек на декодируемом кадре (Рис. 8,а). После нахождения координат реперных точек для каждого символа определяется масштаб восстановленной СЦИ и порог декодирования (красные линии на Рис. 8,б). Все пиксели, которые находятся выше этой линии принимаются за логические биты «1», у них определяются координаты, затем сравниваются с координатами таблицы кодирования и им ставится в соответствие восьмибитное число.

После анализа тестовой выборки восстановленных бинарных изображений СЦИ с 40 мультиплексированных одномерных МГФ, было выявлено, что большая часть ошибок в символах наблюдаются на краю СЦИ, удаленном от нулевого дифракционного порядка, где меньше соотношение сигнал/шум. Кроме того, было установлено, что в большинстве случаев на один ошибочно

декодированный байт информации приходилось не менее двух ошибок в символах.



а)



б)

Рис. 8. а) фрагмент восстановленного бинарного изображения СЦИ (красной линией показана строка СЦИ, распределение яркости ее пикселей приведено ниже) б) распределение яркости пикселей в строке восстановленной СЦИ

На основе априорной информации и избыточности в кодировке часть ошибок в символах была скорректирована, вероятность битовой ошибки BER составила $\sim 1,3 \cdot 10^{-6}$ для матрицы из 400000 восстановленных СЦИ, записанных с плотностью 0,0198 Гбит/мм². Таким образом, в настоящей главе показано, что вероятность битовых ошибок BER снижена ~ 2 порядка по сравнению с существующими ГЗУ, при этом величина допуска на вибрацию при записи голограмм снижена в 2 раза, плотность записи информации увеличена на 10% по сравнению с дисками BLU-Ray.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Разработан метод синтеза одномерных голограмм Фурье, который позволяет увеличить дифракционную эффективность на 6-10% МГФ, полученных на фоточувствительной регистрирующей среде, за счет фазовой маски и учёта параметров дискретизации СЦИ, нелинейности модуляционной характеристики ПМС, МПФ некогерентной проекционной оптической системы.
2. Предложен метод записи одномерных мультиплексированных микроголограмм Фурье в проекционной некогерентной оптической системе на основе компьютерно-синтезированных одномерных МГФ, что позволило снизить в 2 раза требования к виброизоляции.
3. Разработаны методы отдельного восстановления страниц цифровой информации с мультиплексированных одномерных МГФ и их математическое описание.

4. Предложены оригинальные функциональные схемы и предложена методика проектирования ГЗУ записи и считывания цифровой информации, эффективность которых подтверждена в ходе экспериментальных исследований.

ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Holographic memory system based on projection recording of computer-generated 1D Fourier holograms / S.S. Donchenko [et al.] // Optical Society of America APPLIED OPTICS (1 October). 2014. Vol. 53, No. 28. P. 6591-6597. (0,8 п.л./0,5 п.л.).

2. Оптимизация процесса нанесения фоторезиста методом планирования эксперимента/ С.С. Донченко [и др.]// Научное обозрение. 2013. № 12. С. 183-189. (0,66 п.л./0,3 п.л.)

3. Синтез одномерных голограмм Фурье для системы голографической памяти с проекционной схемой записи / С.С. Донченко [и др.] // Естественные и технические науки. 2013. № 5(67). С. 48-51. (0,46 п.л./0,4 п.л.)

4. Оптическая система устройства записи и считывания больших объемов информации, основанная на использовании мультиплексной записи одномерных голограмм / С.С. Донченко [и др.]// Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Приборостроение. 2014. № 2 (95). С. 120-135. (0,46 п.л./0,4 п.л.)

5. Метод проекционной мультиплексной записи компьютерно-синтезированных одномерных голограмм Фурье для систем голографической памяти: математическое и экспериментальное моделирование / С.С. Донченко [и др.] // Квантовая электроника. 2015. Т. 45. № 8. С. 771-775. (0,9 п.л./0,4 п.л.)

6. Методы считывания мультиплексированных компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье / С.С. Донченко [и др.] // Вестник Национального исследовательского ядерного университета МИФИ. 2014. Т. 3. № 4. С. 496 – 500. (0,2 п.л./0,1 п.л.)

7. Экспериментальные исследования метода получения компьютерно-синтезированных микроголограмм Фурье в проекционной оптической системе голографической памяти / С.С. Донченко [и др.] // Вестник Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана. Серия: Приборостроение. 2015. № 3 (102). С. 104-115. (0,6 п.л./0,4 п.л.)

8. Application of optoelectronic micro-displays for holographic binary data recorder based on computer generated Fourier holograms / S.S. Donchenko [et al.] // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). 2016. Vol. 25, Issue 4. P. 255 – 261. (0,6 п.л./0,45 п.л.)

9. Development of projection-type optical scheme for computer-generated Fourier hologram recorder / S.S. Donchenko [et al.] // Chinese Optics Letters. 2017. Vol. 15, Issue 4. P. 040903-40905. (0,4 п.л./0,2 п.л.).

10. Устройство записи мультиплексных компьютерно- синтезированных микроголограмм Фурье в системе оптико- голографической памяти: патент РФ № 162199 / С.С. Донченко [и др.] // заявл. 02.11.2015; опубл. 27.05.2016

11. Устройство считывания мультиплексных одномерных компьютерно-синтезированных голограмм Фурье в системе оптико-голографической памяти: патент РФ № 167474 / С.С. Донченко [и др.] // заявл. 06.07.2016; опубл. 10.01.2017