

*На правах рукописи*

*ШОЙДИН*  
*Сергей Александрович*

**ГОЛОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ  
ИНФОРМАЦИИ В ЗАДАЧАХ УДАЛЁННОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ  
ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЁМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 1.3.6 (01.04.05) – Оптика

*АВТОРЕФЕРАТ*  
*диссертации на соискание ученой степени*  
*доктора физико-математических наук*

Новосибирск  
2023

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Сибирском государственном университете геосистем и технологий (СГУГиТ) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Новосибирск.

Научный консультант: Венедиктов Владимир Юрьевич  
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры Лазерных измерительных и навигационных систем Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты: Шандаров Станислав Михайлович  
доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры электронных приборов Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Томск

Канев Федор Юрьевич  
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева, Сибирского отделения Российской академии наук, г. Томск.

Вениаминов Андрей Викторович  
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Университет ИТМО», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования Национальный исследовательский Томский государственный университет, Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, г. Томск.

Защита состоится « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г. в \_\_\_\_\_ на заседании диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02) при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт автоматизации и электрометрии СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
д.ф.-м.н.

Л. В. Ильичев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Интерес к голографическим методам преобразования оптической информации в различных задачах существует давно, практически с первых работ по голографии, однако актуальность темы возрастает в связи с современными задачами удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений.

Действительно, реальная информационная ёмкость голограмм настолько высока, что задачи создания голографического телевидения разбиваются о проблему передачи голографической информации по известным каналам связи. Прямые оценки количества информации при покадровой передаче 3D сигнала показывают, что один такой голографический канал займёт весь доступный человечеству радиодиапазон, включая все радио- и все телеканалы. Только оптоволоконные каналы TV связи и системы прямой передачи лазерным лучом теоретически могут быть способны передавать такие большие объёмы информации, динамически меняющиеся с необходимой частотой кадровой развёртки. Однако такие широкополосные световодные каналы, во-первых, ограничены своей проводной сетью или дистанцией прямого видения, а во-вторых, ещё не реализованы, а только находятся в стадии вероятных проектов. Поэтому исследование особенностей структуры голограмм с целью разработки методов регистрации и передачи полноценной 3D голографической информации является актуальным и его результаты найдут применение в различных областях приборостроения, при решении задач 3D TV и 3D дополненной реальности, в спецтехнике, в телемедицине и др.

Один из основателей голографии, академик Ю. Н. Денисюк в работе «Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта?» и в других материалах прозорливо определил необходимую область исследований по «воспроизведению процесса движения голографических изображений», «разработке методов устранения избыточности информации, т. е. к исключению из голографического изображения той информации, которая не используется при зрительном восприятии», по разработке голографических методов приёма и преобразования оптической информации, преобразования голографической информации к виду, удобному для передачи по каналам связи, преобразования информации, необходимого для решения задач голографического кино и телевидения<sup>1</sup>.

В настоящей работе подтверждены предположения Ю. Н. Денисюка об актуальности изучения особенностей голограмм и разработки голографических методов в задачах

---

<sup>1</sup> Денисюк Ю. Н. Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта? / Ю. Н. Денисюк // ЖТФ. – 1991. – Т. 61. – № 8. – С. 155, 157.

удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений.

Неразрешимость классической постановки задач передачи голографической информации по стандартным радиоканалам связи звучит практически во всех современных научных обзорах<sup>2</sup>. Развёрнутый анализ современной разработанности темы представлен в главе 1 диссертации. На основе этого анализа с учётом актуальности определены цели и задачи диссертационного исследования.

**Целью диссертационной работы** является определение основных физических закономерностей, ограничивающих плотность записи информации и энтропию (Шеннона) в аналоговых и компьютерных голограммах и поиск методов, позволяющих осуществлять динамическую передачу голографической 3D информации по каналам связи с TV частотой кадровой развёртки, а также экспериментальная проверка предложенных голографических методов преобразования оптической информации, доказывающая возможность передачи по радиоканалу динамических объёмных изображений с принятой в современных TV системах частотой кадровой развёртки и качественного, на уровне стандартов высокого разрешения восстановленного голограммой 3D изображения, подобно Full HD, но обладающего непрерывным вертикальным и горизонтальным параллаксом.

#### **Задачи диссертационной работы:**

1. Провести анализ изученности вопросов телекоммуникации 3D голографической информации и её количественного определения в аналоговых и в компьютерных голограммах. Рассмотреть достоинства и недостатки известных технологий воспроизведения объёмных изображений (полигональной, воксельной, облака точек, технологии Pleno, микропробоев и дисплеев светового поля) в сравнении с голографическими методами удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений.

2. Исследовать физические свойства голограмм для определения методов преобразования и сжатия передаваемой 3D голографической информации с учётом проблем ограничения пропускной способности традиционных каналов связи и принципиальных трудностей их использования с целью формирования на приёмном конце канала связи динамических 3D изображений с TV частотой кадровой развёртки, высоким пространственным разрешением, а также непрерывным вертикальным и горизонтальным параллаксом.

3. Исследовать проблемы синтеза компьютерных голограмм и их физической реализации с использованием метода регистрации карты высот динамично изменяющегося

---

<sup>2</sup> Lucente M. The First 20 Years of Holographic Video – and the Next 20 // SMPTE 2nd Annual International Conference on Stereoscopic 3D for Media and Entertainment. New York, NY, June, 2011. [https://www.researchgate.net/publication/268387890\\_The\\_First\\_20\\_Years\\_of\\_Holographic\\_Video\\_-\\_and\\_the\\_Next\\_20](https://www.researchgate.net/publication/268387890_The_First_20_Years_of_Holographic_Video_-_and_the_Next_20) (дата обращения: 18.01.2023).

3D объекта голографирования с помощью латерального освещения объекта структурированным светом.

4. Исследовать физические причины имманентно присущих голограммам и принципиально неустранимых в полной мере ограничений дифракционной эффективности (ДЭ) и энтропии аналоговых и компьютерных голограмм, включая перекрёстное взаимодействие нескольких видов нелинейности, спекл-резонанс и алиасинг.

5. Провести физические эксперименты по передаче необходимой информации с ТВ частотой кадровой развёртки, достаточной для синтеза аналоговой голограммы, записанной на материальном носителе на приёмном конце канала связи.

#### **Научная новизна диссертации:**

1. На основе анализа причин противоречия между большим объёмом голографической информации 3D видеопотока и пропускной способностью радиоканала связи, проведённых расчётов и экспериментов определены пути и возможности преодоления противоречия.

2. Доказано, что предложенный метод передачи голографической информации путём двух модальностей (маска + текстура) без несущей пространственной частоты позволяет восстанавливать 3D изображение с более высоким пространственным разрешением, чем при спектральной селекции минус первого порядка дифракции.

3. Впервые дано объяснение физического смысла причины недостижимости ДЭ, предсказанной в модели Когельника, вызванного взаимодействием двух нелинейных характеристик – неравномерности экспозиции по полю голограммы и нелинейной зависимости ДЭ от экспозиции, объяснённого как формфактор голограмм. Этот эффект является имманентным для голограмм с дифракцией Брэгга и Рамана-Ната. Он проявляется при записи голограмм гауссовыми пучками, пучками спекл-полей и другими сложными изображениями.

4. Определены основные неустранимые в полной мере причины снижения ДЭ и энтропии голограмм, в т. ч. за счёт эффекта формфактора голограмм, резонанса спекл-поля и алиасинга, предложены методы ограничения их влияния.

5. Показано, что эффект формфактора целесообразно использовать при исследовании кинетики фотоотклика новых голографических материалов. При этом точность измерений фотоотклика предложенным дифракционным методом сравнима с точностью интерференционных методов.

6. Впервые экспериментально показано, а затем теоретически обосновано Б. Я. Зельдовичем в модовой теории голограмм, что при записи голограмм спекл-полей в объёмных, по критерию Клейна, голографических материалах с безынерционным фотооткли-

ком, формируемым прямым образом в процессе записи голограмм за счёт энергии экспозиции, возникает резонансное взаимодействие между записанной спекл-структурой фотоотклика голографического материала и спекл-структурой записывающего излучения.

7. Предложенный метод передачи 3D голографической информации с помощью двух основных модальностей – текстуры поверхности и карты высот голографируемого объекта, похожий на передачу карты высот голограммы в радиодиапазоне электромагнитного излучения, а текстуры поверхности, как 2D фотоизображения, позволяет легко комплексовать любые 3D изображения электромагнитного спектра, включая ИК, УФ и радиодиапазон, а также изображения, сформированные частично электромагнитным излучением и частично (карта высот или маска) ультразвуковым. При этом восстановленные изображения обладают вертикальным и горизонтальным непрерывным параллаксом.

8. Впервые численным экспериментом показана эквивалентность 3D изображения, восстановленного дифракцией излучения на дифракционной структуре, образованной латеральным освещением 3D объекта структурированным светом в виде параллельных полос и дифракцией на голограмме этого объекта. Показаны небольшие отличия восстановленных ими изображений, объясняемые наличием продольных аберраций у дифракционной структуры.

9. Впервые численными экспериментами показано, что дифракционные структуры, сформированные с помощью латеральной проекции структурированного света из параллельных полос, позволяют получать восстановленные 3D изображения на разных длинах волн при медианном увеличении частоты этих полос. Причём восстановленные таким образом 3D изображения тоже обладают одновременно и вертикальным, и горизонтальным непрерывным параллаксом.

10. Впервые по стандартному радиоканалу передана 3D голографическая информация о динамически изменяющемся изображении живого человека с TV частотой кадровой развёртки и выше, с высоким пространственным разрешением и непрерывным вертикальным и горизонтальным параллаксом, по которой были записаны аналоговые голограммы.

**Теоретическая и практическая значимость** работы заключается в развитии физических основ представления информации в голограмме, определяющих разделение её дифракционной структуры на две группы пространственных гармоник, одна из которых имеет физический смысл дифракции света в нужный порядок для сепарации информационного потока, а другая несёт этот информационный поток, обеспечивая на приёмном конце канала связи синтез цифровых голограмм с TV частотой кадровой развёртки, восстанавливающих серию голографических изображений, причём, при передаче этой группы не в виде спектра, а двумя основными модальностями 3D изображения, картой высот и

текстурой, обеспечивается более высокое пространственное разрешение и непрерывный горизонтальный и вертикальный параллакс восстановленного видеоряда 3D голографического видео. Практическая значимость этого результата подтверждается действующим патентом RU2707582C1.

Предложен метод сокращения рендеринга голограмм сфокусированных изображений на основе отказа от синтеза компьютерных голограмм на передающем конце канала связи с последующим их энтропийным кодированием, а на приёмном – на основе замены синтеза дифракционной структуры компьютерных голограмм на синтез дифракционной структуры, созданной на основе переданного по каналу связи паттерна структурированного света, сформированного латеральным освещением 3D объекта голографирования системой параллельных полос. Последующий синтез дифракционной структуры, восстанавливающей 3D изображение, производится медианным мультиплицированием полос паттерна без использования интегральных преобразований.

Разработанный метод при одновременном упрощении 3D комплексирования и трансформации длин волн записи – восстановления, позволяет сделать существенный вклад в решение задач 3D гиперспектральных изображений, которые ставятся как в задачах спецтехники, так и в гражданских разработках, как, например, в телемедицине и работах в агрессивной среде, под водой и в космосе. Метод имеет большие перспективы в решении задач создания 3D TV и систем 3D дополненной реальности без использования индивидуальных средств и устройств оператора. В части расчётов голографических дифракционных элементов он используется в приборостроении (Акт АО «Новосибирский приборостроительный завод» о практическом применении полученных результатов).

Теоретическая значимость изучения динамических эффектов в объёмных голографических материалах, формирующих фотоотклик без отдельного этапа проявления, непосредственно во время экспозиции, заключается в выявлении нового физического эффекта – эффекта резонанса спекл-поля, который послужил экспериментальным доказательством модовой теории голографии, разработанной Б. Я. Зельдовичем и сотрудниками Физического института АН СССР.

Объяснён физический эффект ограничения достижимой величины ДЭ и увеличения оптимальной экспозиции голограмм за счёт перекрёстного взаимодействия двух нелинейных эффектов – распределения по полю голограммы интенсивности записывающего её излучения и нелинейной, с локальными максимумами, зависимости ДЭ от экспозиции. Теоретически и экспериментально доказано, что этот эффект имеет место и для случая дифракции Брэгга, и для случая дифракции Рамана-Ната не только для гауссовых пучков, но и для пучков, формирующих сложные изображения, обладающих в силу Центральной

пределной теоремы Ляпунова (ЦПТ) гауссовыми гистограммами распределения интенсивности в формируемых ими изображениях. Практическая значимость этих результатов уже подтверждена совершенствованием технологии изучения кинетики фотоотклика разрабатываемых голографических материалов (Акт о практическом применении полученных результатов Ministry of Education and Research of Republic of Moldova, Institute of Applied Physics) и действующим патентом RU2734093C1.

**Методология и методы исследования** основываются на скалярном приближении теории дифракции, в рамках которой классическим методом, в виде интеграла Релея-Зоммерфельда и его следствий – интегралов Френеля и Фраунгофера, вычисляются преобразования, описывающие распространение и изменения комплексной амплитуды электромагнитных полей. Преобразования 3D голографической информации при её передаче по радиоканалу анализировались в рамках классической теории К. Шеннона. Для анализа пространственных гармоник светового поля используется двумерное преобразование Фурье. Для моделирования фазы волнового фронта в численных расчётах использовалось представление чисел в формате с плавающей запятой. В некоторых случаях в работе применялся оригинальный метод вычисления преобразований Френеля, основанный на использовании имеющихся симметрий ядра преобразования. Все численные модельные расчёты были проделаны на основе среды MATLAB и подтверждены в ключевых этапах исследования прямыми физическими экспериментами.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Дифракционная структура, представляющая голограмму, содержит два типа пространственных гармоник, один из которых близок известным в радиотехнике несущим частотам, а другой их девиации. Поскольку эти два типа гармоник имеют разную физическую природу, то могут быть искусственно разделены для передачи 3D голографической информации по радиоканалу и на его приёмном конце снова объединены в голограмму аналогично технологии SSB одномерного сигнала.

2. Предложенный метод передачи кадров 3D цифрового голографического видео без несущей пространственной частоты двумя 2D модальностями – картой высот и текстурой поверхности 3D объекта, позволяет значительно сжимать передаваемую голографическую информацию без сопровождающей спектральную селекцию (как, например, в SSB) потери пространственного разрешения и с сохранением непрерывного параллакса.

3. Метод медианного мультиплицирования полос структурированного света, рассеянного 3D объектом, позволяет создавать дифракционную структуру, формирующую несколько порядков дифракции, один из которых, при выполнении условий Брэгга, восстанавливает с непрерывным параллаксом 3D изображение исходного объекта на заданной,



при мультиплицировании полос, длине волны, без использования интегральных преобразований.

4. Одна из причин ограничения дифракционной эффективности и энтропии как у объёмных, по критерию Клейна, голограмм, работающих в режиме дифракции Брэгга, так и у тонких голограмм, работающих в режиме дифракции Рамана-Ната, заключается в перекрёстном взаимодействии двух нелинейных процессов – нелинейного распределения интенсивности записываемого излучения по полю голограммы и нелинейной, с локальными максимумами, зависимости дифракционной эффективности от экспозиции, проявляющихся как фактор формы (формфактор) голограмм, увеличивающий оптимальную экспозицию. Формфактор позволяет оперативно измерять кинетику фотоотклика голографического материала непосредственно в процессе записи голограмм.

5. Имманентно присущие компьютерным голограммам шумы алиасинга, связанные с дискретизацией цифрового представления поля голограммы, неограниченно возрастают на тех участках, где направление тангенциальной составляющей поверхности 3D объекта приближается к направлению нормали волнового фронта, регистрируемого голограммой. Для голограмм сфокусированных изображений алиасинг можно уменьшить при использовании бителецентрической телескопической системы.

**Достоверность** полученных в диссертации результатов подтверждается их согласованностью между собой, не противоречивостью известным научным положениям, экспериментальными и теоретическими результатами других работ, ясной физической трактовкой, а также серией численных и физических экспериментов и практическим использованием в научных исследованиях. Полноту и достоверность результатов изучения научной проблемы обеспечили методология и методы, описанные выше.

**Апробация** результатов работы проводилась на 21 международной конференции и 4 национальных конференциях с международным участием. На трёх конференциях «Лазеры. Измерения. Информация» (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, Оптическое общество России им. Д. С. Рождественского, г. Санкт-Петербург, 2013-2015 гг.). На трёх Международных конференциях «СибОптика» (г. Новосибирск, СГУГиТ, ИАиЭ, КТИ НП, 2015-2017 гг.). На четырёх национальных конференциях с международным участием «СибОптика» (г. Новосибирск, СГУГиТ, ИАиЭ, КТИ НП, 2018-2021 гг.). На шести Международных конференциях «HoloExpo» (МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017-2022 гг.). На XXV Международном Симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, Институт оптики атмосферы, 01-05 июля 2019 г.). На двух Международных Школах-симпозиумах по голографии когерентной оптике и фотонике: (г. Томск, Национальный исследовательский Томский государственный универси-

тет, XXIX Школа-симпозиум, 2015 г.; г. Санкт-Петербург, Университет ИТМО, XXXII Школа-симпозиум, 2022 г.). На IX Международном форуме технологического развития «Технопром-2022» «Технологический суверенитет и устойчивое развитие России» (г. Новосибирск, Экспоцентр, 23-26 августа 2022).

**Публикации.** Результаты по теме диссертации опубликованы в 54 научных статьях, 18 из которых – в изданиях, входящих в международные базы цитирования WoS, 6 – в изданиях Scopus и одна – в журнале, рекомендованном ВАК для публикации материалов докторских диссертаций.

**Личный вклад.** Постановка задач, направления и принципы исследования, теоретические положения и постановка экспериментов определены персонально автором. Идеи, методика автора, постановка и проведение работ по синтезу компьютерных голограмм, а также измерения их голографических характеристик осуществлялись под руководством автора на базе оборудования Лаборатории прикладной голографии в СГУГиТ, запись аналоговых голограмм на основе синтезированных компьютерных – на базе кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н. Э. Баумана и компании JAMES RIVER BRANCH, LLC с участием коллег соответствующих организаций, измерения микроструктуры голограмм – на специализированном оборудовании ИАиЭ СО РАН РФ, запись и исследование голограмм в режиме дифракции Рамана-Ната – в Институте прикладной физики АН Молдовы, Кишинёв.

**Благодарности.** Автор выражает благодарность С. Б. Одинокону и И. С. Гибину за поддержку основных направлений и результатов работы, И. К. Цыганову, Е. А. Дроздовой, А. Ф. Смыку, А. В. Шурыгину за помощь в записи голограмм, В. П. Бессмельцеву за измерения их микрохарактеристик, А. Ю. Мешалкину за организацию работ по исследованию влияния формфактора при разработке новых голографических материалов, моему аспиранту А. Л. Пазоеву за творческое участие в проведении экспериментов и компьютерных вычислений.

**Структура и объём работы.** Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы, включающего 265 наименований. Общий объём работы 400 страниц, включая 166 рисунков, 115 формул, 8 таблиц и 5 приложений.

### **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** обоснована актуальность разработки голографических методов преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений, сформулированы цели и задачи исследования, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, отражены применённые мето-

дология и методы, сформулированы положения, выносимые на защиту, определена степень достоверности полученных результатов, показана их апробация.

**Глава 1 «Изученность проблем предельной информационной ёмкости голограмм и динамического воспроизведения 3D изображений»** посвящена рассмотрению базовых сведений об информационных характеристиках голограмм, содержащихся в известных работах по созданию голографических запоминающих устройств (ГЗУ) и распространённых методов цифрового представления 3D сигнала, содержащихся в открытых публикациях. Показана, образно говоря, «лаборатория исследований», помогающая на основе существующих публикаций сформулировать цели, проблемы и методы решения задач удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений.

Первое препятствие в решении этих задач заключается в большой информационной ёмкости голограмм, которую отмечали ещё её первые исследователи: Ю. Н. Денисюк, Э. Лейт и Ю. Упатниекс и P. J. Van Heerden. Именно в работах по ГЗУ отражена простейшая оценка плотности записи голографической информации, основанная на записи бинарных изображений с разрешающей способностью, определяемой пятном Эйри. Нами делается переход к голограммам, восстанавливающим сложные изображения, когда каждая точка восстановленного изображения может иметь целый ряд состояний, количество которых определяется допустимым отношением сигнал/шум.

На основе известной формулы Шеннона, переведённой на язык пространственных частот, сделаны оценки количества информации, содержащейся в голограмме формата А4. Так, при количестве дискретных значений каждого пикселя (глубине цвета), равном стандартному в TV системах  $m = 256$ , количество информации в одном голографическом кадре размера А4 будет около  $1,7 \cdot 10^{11}$  байт. Передача таких массивов с частотой кадровой развёртки 25 Гц требует пропускной способности канала, по Шеннону, примерно  $C = 4 \cdot 10^{12}$  байт/сек.

Ширина полосы пропускания при этом только для монохромного изображения составляет 500 ГГц, что с лихвой перекрывает весь доступный человечеству сегодня радиодиапазон и требует выделения проблемы передачи 3D голографической информации в отдельную задачу.

Большие объёмы голографической информации, безусловно являющиеся преимуществом в других областях, в области голографического TV и задач 3D дополненной реальности сыграли с разработчиками злую шутку, представляя одно из существенных препятствий её передачи по каналам связи. Выходом из сложившегося противоречия является либо значительное уменьшение размера голографического изображения, что плохо соответствует задачам 3D дополненной реальности, либо сжатие голографической информа-

ции таким образом, чтобы её объём не превышал возможностей современных каналов связи 3G и 4G.

Сжатие информации путём повышения отношения сигнал/шум некоторыми специальными методами, аналогичными импульсно-кодовой модуляции, терпят неудачу<sup>3</sup>, поскольку за это приходится платить серьёзным снижением информационной плотности, т. е. заменой линейной зависимости информационной ёмкости от ширины используемого спектра на логарифмическую зависимость.

В связи с этим актуальным является определение имманентно присущих голограммам, не устранимых в полной мере физических ограничений достижимой ДЭ, определяющей отношение сигнал/шум, влияющее на степень сжатия и энтропию голограмм.

Известно, что в восьмидесятые годы XX столетия В. Г. Комар сделал голографическое кино, а голографического TV нет до сих пор. Сравнение задач создания голографического кино и голографического TV также выводит нас на проблемы сжатия голографической информации. Укажем на принципиальные отличия фотоматериалов для голографического кино и фотоматриц для голографического TV. Первые, по сравнению с длиной волны записывающего излучения, можно считать непрерывной средой, а вторые – принципиально дискретной, с вытекающими последствиями. С учётом этого, нами были сформулированы *три группы проблем*, требующие решения при создании 3D голографического TV и систем 3D дополненной реальности.

*Первая* – связана с формированием цифрового 3D голографического сигнала о реальной сцене окружающего пространства – регистрацией событий в динамике, с качеством не менее, чем сегодняшние телевизионные стандарты, и наличием непрерывного параллакса в восстановленных голограммами 3D изображениях. *Вторая группа* – со сжатием этой информации до уровня, пригодного для передачи по радиоэлектронным каналам связи, желательно уже развитым, как 4G и 4G LTE или находящимся в финальной стадии разработки, как 5G. *Третья* – с созданием голографических динамических мониторов, способных с TV частотой отображать 3D голографические изображения в пространство наблюдения. Отметим, что в настоящей работе решаются только первые две проблемы, в свою очередь, состоящие из более детально сформулированных во введении задач. Третья исследуется только по публикациям в части доказательства перспектив создания 3D динамических голографических дисплеев и в качестве задела для дальнейших работ в развитие настоящей.

К *первой группе* относятся три основных *метода формирования* (регистрации)

---

<sup>3</sup> Oliver B. M. The Philosophy of PCM / B. M. Oliver, J. R. Pierce, C. E. Shannon // Proceedings of the IRE. – 1948. – Т. 36. – № 11. – С. 1324-1331.

цифрового сигнала, пригодного для передачи по радиоканалу с нужной частотой кадровой развёртки, об объёмной 3D сцене. Временно исключая, ввиду больших объёмов информации, метод прямого голографирования, рассмотрим два других широко распространённых сегодня метода регистрации объёма: зондирование структурированным светом и технологию Time of Flight (ToF), являющуюся развитием лазерного зондирования.

Обретший в последнее время большую популярность метод ToF имеет принципиальные ограничения, связанные с технологическими проблемами СВЧ электроники. Пространственное разрешение таких систем невелико, что видно на примере самого на сегодня совершенного ToF устройства фирмы Texas Instruments<sup>4</sup>.

Альтернативным является метод формирования карты поверхности 3D объекта с помощью структурированного света, не требующий сложной аппаратуры. Задача формирования цифрового, пригодного для передачи по радиоканалу, 3D голографического сигнала о реальной сцене окружающего пространства событий в динамике и с качеством, не хуже сегодняшних телевизионных стандартов, решена во второй главе диссертации.

Создание голографических динамических мониторов (*третья группа проблем*), способных с частотой TV кадровой развёртки отображать 3D голографические изображения в пространство наблюдения, тесно связано со сложностью математических инструментов обработки голографической информации, в т. ч. преобразования Френеля.

В этих условиях лучшими из известных средств реализации 3D динамических изображений являются дисплеи светового поля, хотя они не позволяют восстанавливать 3D изображения с непрерывным параллаксом и обладают А-С противоречием, когда аккомодация показывает одно расстояние до точки изображения, а конвергенция – другое.

При довольно обширной библиографии по первой и третьей группе проблем голографического и в целом оптического 3D TV, *второй группе проблем* – передаче голографической информации, уделяется существенно меньше внимания. Традиционные пути сжатия информации, основанные на энтропийном кодировании, трудно реализуемы. Так, группа Pleno до сих пор делала ставку на такие методы, дополняя их спектральным сжатием. Однако они, развиваясь в этом направлении последние 20 лет, не достигли желаемых результатов<sup>5</sup>. В настоящее время наиболее актуальным является поиск эффективных методов сжатия голографической информации с устранением *лишней* избыточности.

---

<sup>4</sup> Li L. Time-of-Flight Camera – An Introduction. Technical White Paper / L. Li. – Dallas: Texas Instruments, 2014. – 10 с. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf> (дата обращения: 18.02.2022).

<sup>5</sup> Muhamad R. K. JPEG Pleno holography: scope and technology validation procedures / R. K. Muhamad, T. Birnbaum, A. Gilles [и др.] // Appl. Opt. – 2021. – Т. 60. – № 3. – С. 641-651. <https://doi.org/10.1364/AO.404305>.

К аналогичному выводу приходят и авторы ряда обзоров: «Статистика сигнала голограммы значительно отличается от обычного естественного изображения и видео. Следовательно, обычные алгоритмы представления и кодирования, такие как стандартные семейства кодеков JPEG и MPEG, являются неоптимальными. При создании голографического контента с использованием методов компьютерной голографии (CGH) требуются алгоритмы, значительно отличающиеся от алгоритмов, необходимых для классического синтетического изображения. Требуется рендеринг, основанный на физике лучевого пространства. ... Наиболее естественное 3D изображение с непрерывным параллаксом получается только при восстановлении голограмм»<sup>6</sup>.

Действительно, только голографическое представление 3D сигнала обеспечивает природное, непротиворечивое восприятие объёма с помощью механизмов аккомодации, конвергенции, окклюзии, неламбертовского затенения и параллакса движения без дополнительных средств и устройств, приданных наблюдателю. Это особенно актуализирует поиск голографических методов преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений. Таким образом, на основании проведённого анализа обоснованы и сформулированы цели и задачи настоящей диссертации, решаемые в следующих главах.

**В главе 2 «Методы передачи 3D голографической информации по каналам связи без пространственной несущей»** разработан и защищён патентом RU2707582C1 метод дистанционного формирования голографической записи, обеспечивающий высокое пространственное разрешение восстановленного 3D голографического изображения, непрерывный параллакс и малый объём передаваемой по каналу связи информации. Исследуется ряд проблем синтеза компьютерных голограмм удалённого объекта и передачи необходимой для этого информации о нём, без ненужной избыточности, выполняемой в пять этапов. Вначале происходит фоторегистрация с любым разрешением, необходимым для TV воспроизведения текстуры 3D голографируемого объекта (рисунок 1а) и изопроекции зондирующего его паттерна параллельных полос (рисунок 1б). Паттерн обрабатывается с сохранением периода полос или с его изменением для согласования с длиной волны восстановления (рисунок 1в), и по нему строится карта поверхности (маска) голографируемого 3D объекта (рисунок 1г). Эта карта в виде 2D изображения вместе с 2D текстурой (две основные модальности 3D изображения) передаётся на приёмный конец канала связи, где синтезируется модель 3D объекта (рисунок 1д). По модели 3D объекта (рисунок 1д) син-

---

<sup>6</sup> Blinder D. Signal processing challenges for digital holographic video display systems / D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens [и др.] // Signal Processing: Image Communication. – 2019. – Т. 70. – С. 114-130. <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.09.014>.

тезируется компьютерная голограмма, которая для наглядности на рисунке 1е приведена для длины волны  $\lambda = 16$  мм.

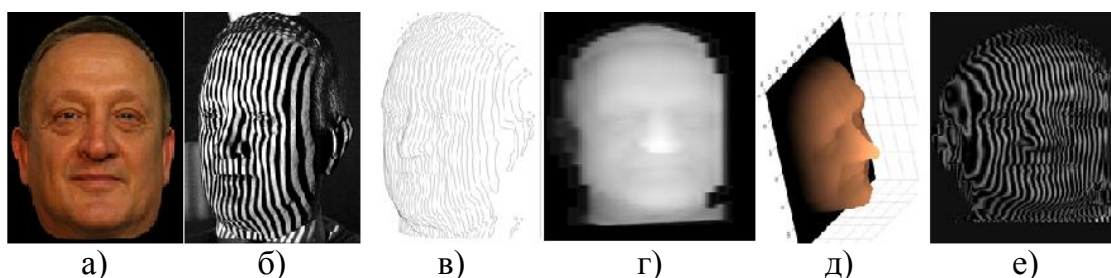


Рисунок 1 – Регистрация 3D голографической информации: а) фоторегистрация текстуры поверхности объекта; б) латеральная проекция структурированного света из параллельных полос; в) выделение границ полос; г) синтез карты поверхности (маски); д) 3D модель объекта; е) синтез голограммы 3D объекта

Указанная система полос не обязательно должна иметь частоту, сравнимую с голографической в видимом диапазоне длин волн, поскольку поверхностный рельеф (глубина деталей изображения – морщинки на лице) стереоскопической системой зрения не определяется, мы его видим по рисунку на текстуре. Поэтому для передачи топографической поверхности лица человека достаточно создавать картину параллельных полос с периодом от миллиметров до сантиметров, что соответствует радиодиапазону. Размер регистрируемой точки в таком изображении определяется разрешающей способностью объектива и фотоприёмной матрицы. Количество же информации в таком регистрируемом массиве точек изображения существенно меньше, чем содержится в голограмме оптического диапазона и сравнимо с информацией радиоголограммы. Однако зрительное восприятие деталей, определяемое разрешением фотографии с текстурой объекта, вполне удовлетворяет требованиям высококачественного зрительного восприятия. Таким образом, осуществляется сжатие 3D голографической информации, необходимое при её передаче по каналу связи без наличия зрительно воспринимаемых ограничений качества 3D изображения.

Изображение с непрерывным параллаксом (рисунок 2) формируется при освещении голограммы (рисунок 1е) излучением соответствующей длины волны.

В диссертации показана простота перевода, в рамках предложенного метода, 3D изображения, зарегистрированного в одном участке спектра, в другую область спектра (рисунок 2), что регулируется изменением несущей частоты при синтезе голограммы. Более того, метод допускает



Рисунок 2 – Две проекции 3D изображения в видимом диапазоне и две – в ИК, синтезированные по двум двумерным картинам – картине текстуры и картине топографии поверхности (маске), синтезированной в видимом диапазоне

не только синтез изображений, когда маска создаётся в одном спектральном диапазоне, а текстура в другом, но и формирование гиперспектральных изображений. Также имеется возможность комбинации разных типов излучения, например, когда маска создаётся акустическим излучением, а текстура поверхности – электромагнитным. Это открывает огромный пласт новых решений в технике интроскопии, в подводных исследованиях, в медицине и др.

Таким образом, реализуются три параметра качества: непрерывный параллакс, большая глубина и большая площадь отображаемого пространства, что и является конечной целью 3D TV и систем дополненной 3D реальности.

Без ограничения общности, на примере амплитудной пропускающей голограммы проанализирован фотоотклик голографического материала на языке пространственных частот. Приводятся результаты численного анализа спектральных свойств текстуры и маски на примере 3D портретного изображения человека в схеме Лейта – Упатниекса.

Когерентное сложение амплитуд объектной  $U_o(x_1, y_1)$  и опорной  $R(x_1, y_1)$  волны формирует голограмму  $\tau(x_1, y_1)$  (1)

$$\begin{aligned} \tau(x_1, y_1) &\sim I(x_1, y_1) = |U_o(x_1, y_1) + R(x_1, y_1)|^2 = \\ &= \{I_o(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)\} \left\{ 1 + 2 \frac{\sqrt{I_o(x_1, y_1) I_r(x_1, y_1)}}{I_o(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)} \cos[\varphi_o(x_1, y_1) - \varphi_r(x_1, y_1)] \right\}, \quad (1) \end{aligned}$$

где, соответственно,  $I_o(x_1, y_1)$ ,  $I_r(x_1, y_1)$  – интенсивности объектного и опорного пучков. При освещении голограммы восстанавливающим пучком излучение дифрагирует на основной пространственной гармонике  $\omega_x$ ,  $\omega_y$  с периодом  $d_x$ ,  $d_y$ , определяющей угол поворота восстанавливающего пучка, а также в пределах двух боковых гармоник:  $\omega_x \pm \Omega_x$ ;  $\omega_y \pm \Omega_y$ , определяемых девиацией фазы объектного пучка в плоскости голограммы. Спектр голограммы, несмотря на фундаментальные отличия, имеет, для простых сигналов, схожие признаки со спектром радиосигнала с частотной модуляцией, определяемой разницей  $\varphi_o - \varphi_r$ , и с амплитудной модуляцией, определяемой переменным по полю голограммы коэффициентом видности перед косинусом в (1).

Реально несущие пространственные частоты  $\omega$  высоки. Они сравнимы с обратной длиной волны записи, и их период в оптическом диапазоне составляет единицы микрометров. Спектр же объекта  $\pm\Omega$  определяется степенью сложности его структуры. Даже при высоком разрешении, например, стандарт Full HD, максимально возможная пространственная частота составляет около 2000 линий на размере экрана, что при диагонали 36" (~0,9 м), составляет около 3 лин/мм. Почти три порядка ( $10^3$ ) разницы линейных пространственных частот позволяют рассчитывать на высокую степень сжатия ( $10^6$ ) гологра-



фической информации при кодировании на одной боковой полосе.

По спектрам сигналов высокого качества ( $2000^2$  пикс.) с ещё большей глубиной дискретизации серого (до 512 и 1024 градаций) получено, что ширина отсечки спектра восстановленного сигнала по таким низким уровням шумов не даёт значимого уширения диапазона передаваемых частот. Спектр объекта, ограниченный такой шириной девиации пространственных частот, остаётся по-прежнему на много порядков меньше несущей пространственной частоты. Следовательно, у передачи голографической информации в модальностях 3D сигнала (текстура + маска) есть запас прочности, заключающийся в возможности представления 3D сигнала не только в стандарте Full HD, но и в 4K и даже 8K.

Численный эксперимент показал неэффективность кодирования голограммы спектральной селекцией и существенные преимущества передачи голографической информации о 3D объекте двумя его модальностями – двумя 2D кадрами (текстура + маска). Важно, этот метод позволяет получить из паттерна параллельных полос голограмму, восстанавливающую изображение с горизонтальным и вертикальным параллаксом.

Алгоритм синтеза голограммы в численном эксперименте состоял из двух этапов. Первый этап – послойное преобразование Френеля от амплитуды излучения  $U_{oP}(x_{oM}, y_{oN})$ , рассеянного слоем  $p$  объекта голографирования и суммирование слоёв по  $z_p$  (2) – расстоянию до голограммы, где  $\theta_{Fr}$  – ядро преобразования Френеля (3), а  $k=2\pi/\lambda$ :

$$U_1(x_1, y_1) = \sum_p \exp(-ikz_p) \sum_{M,N} \sum_{m,n} \exp(j\Delta_{M,N}) \cdot U_{oP}(x_{oM}, y_{oN}) \cdot \theta_{Fr}(x_{oM}, y_{oN}, z_p, x_{1m}, y_{1n}), \quad (2)$$

$$\theta_{Fr}(x_{oM}, y_{oN}, z_p, x_{1m}, y_{1n}) = \exp\left\{-\frac{ik}{2z_p} \left[ (x_{1m} - x_{oM})^2 + (y_{1n} - y_{oN})^2 \right]\right\}. \quad (3)$$

Второй этап – когерентное сложение полученного объектного пучка  $U_1(x_1, y_1)$  с опорным и нахождение фотоотклика (1), формирующего голограмму  $\tau(x_1, y_1)$ . Появляющийся при синтезе компьютерной голограммы алиасинг (aliasing) демпфировался введением в плоскости объекта голографирования случайной фазовой маски  $\Delta_{M,N}$ . Кроме того, для удовлетворения критерию Найквиста и одновременному выполнению условия пространственного разделения порядков дифракции выполнялось ограничение на угол падения ( $\mu$ ) восстанавливающего пучка (4):

$$\arctg\left(\frac{L_x}{z_{rec}}\right) \leq \mu \leq \arcsin\left(\frac{\lambda}{2\delta x}\right), \quad (4)$$

где  $L_x$ , и  $z_{rec}$  – размер поля голографирования и расстояние восстановленного изображения от голограммы соответственно,  $\delta x$  – шаг между пикселями, откуда брались требования на разрешающую способность синтезированной модели голограммы. Из (4), при  $N_x=L_{0x}/\delta x$ , где  $L_{0x}$  – размер объекта, получено условие на количество пикселей  $N_x$  в голограмме (5),

перекликающееся по смыслу с количеством открытых зон Френеля:

$$N_x \geq 2 \frac{L_x L_{0x}}{\lambda z_{rec}} \quad (5)$$

С учётом указанных ограничений была синтезирована голограмма портретного 3D изображения человека и получен её спектр, который наглядно показал наличие разницы почти в три порядка между линейными компонентами несущей частоты и частоты девиации, содержащей информацию о голографируемом объекте, что соответствует её уплотнению в  $10^6$  раз. Такая большая разница между шириной спектра голограммы и шириной спектра информационной части сигнала снова указала на их разную физическую природу, что позволило их разделить при передаче 3D голографической информации.

Численным экспериментом показано, что алгоритм передачи по каналу связи спектра голограммы, равного и даже большего размера (по числу пикселей), чем алгоритм передачи пары кадров (текстура + маска), более чем на порядок уступает по разрешающей способности последнему. Предложенный метод передачи 3D голографической информации более эффективен, чем передача эквивалентной по объёму информации о спектре голограммы, которая является одним из основных элементов сжатия в JPEG.

Нарушение условий дифракции и потеря информации, восстанавливаемой голограммой, также может происходить при значительном наклоне интерференционных полос, приводящем к нарушению условия (6), (рисунок 3):

$$\Delta x_i \leq md \quad (6)$$

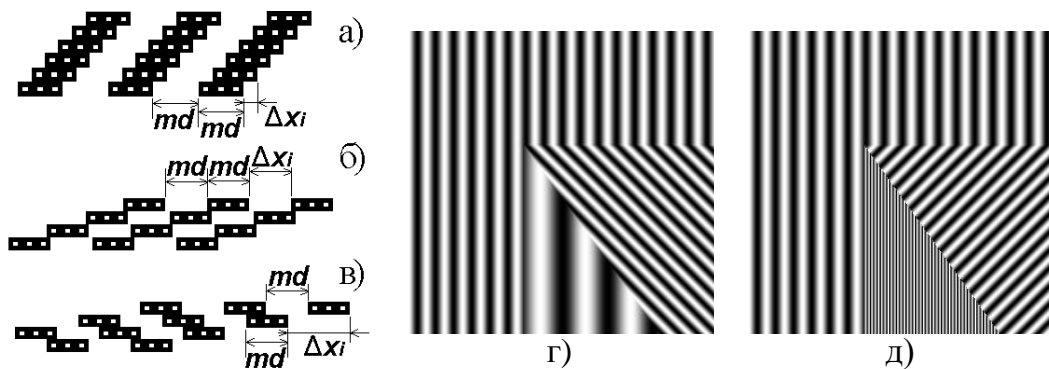


Рисунок 3 – Макет участка голограммы тестового объекта – пирамиды с дискретно синтезированными интерференционными полосами шириной три пикселя и таким же пробелом: а) полосы, сдвинутые от строки к строке примерно на один пиксель; б) примерно 2,7 пикселя; в) на 1,5 пикселя; г) и д) структуры интерференционных полос тестового объекта – глубиной  $16\lambda$  и  $496\lambda$  соответственно

На примере тестового объекта – пирамиды, численным экспериментом показано, что с ростом глубины объекта структура интерференционных полос искажается и, когда наклон её граней превышает критическое значение, полосы даже могут изменить наклон на противоположный, что может соответствовать инвертированию восстановленного го-

лограммой ортоскопического изображения на псевдоскопическое. Этот эффект для любого 3D объекта неизбежен ввиду ограниченности объекта в пространстве, т. е. всегда есть участки его поверхности, перпендикулярные голограмме. Размер этих участков определяется областью с нарушениями критерия Найквиста.

На примере сферического объекта показано, что для видимого диапазона длин волн записи – воспроизведения  $\lambda \sim 0,5$  мкм и разрешающей способности голографических материалов порядка 10 тыс. лин/мм углы, где проявляется алиасинг, составляют несколько градусов. Для сферы радиусом 1 см отношение площадей голограммы с нарушением критерия Найквиста к полной площади голограммы (сфокусированных изображений) сферы будет порядка  $10^{-5}$ . Такого же порядка (одна тысячная процента) будет и интенсивность ложного сигнала, восстановленного этим участком голограммы. Он часто не наблюдаем в силу его малости по сравнению с другими шумами голограмм. Но для цифровых голограмм, зарегистрированных фотоматрицами, разрешение которых меньше, чем у голографических материалов, этот эффект значителен.

Полноценным методом борьбы с этим эффектом является только увеличение числа пикселей голограммы. Также есть метод борьбы, позволяющий устранить его с помощью цифрового уменьшения глубины объекта с последующим увеличением глубины восстанавливаемой голограммой сцены пропорционально квадрату её поперечного размера с помощью бителецентрической оптической системы, что показано в главе 4.

*Таким образом, в главе 2* показано, что пространственный спектр дифракционной структуры голограммы состоит из двух групп гармоник, одна из которых имеет смысл несущих частот и отвечает за разделение дифракционных порядков, а вторая – их девиации, и несёт информацию о голографируемом 3D объекте. Решена задача значительного сжатия передаваемой 3D голографической информации без пространственной несущей путём передачи двух основных модальностей 3D изображения – текстуры и маски, когда последняя образована методом латерального освещения объекта структурированным светом из параллельных полос. При этом обеспечивается непрерывный параллакс и высокое пространственное разрешение восстанавливаемого голограммой 3D изображения объекта лучшее, чем при спектральном сжатии. Метод удобен при передаче гиперспектральных 3D сигналов и позволяет вычислительно легко перемещать записываемые и восстановленные 3D изображения по спектру. Определено основное противоречие между требованиями разделения порядков дифракции при восстановлении голограмм и ограничениями критерия Найквиста при их цифровом представлении. Получено неравенство, аналогичное числу открытых зон дифракции Френеля, накладывающее ограничение на дискретизацию цифровых голограмм.

**В главе 3 «Ограничения информационной ёмкости голограмм фактором формы и использование его свойств»** наряду с ранее обнаруженным резонансом спекл-поля, увеличивающим практически в два раза скорость исчерпания динамического диапазона фототклика голографического материала и послужившим одним из обоснований модовой теории голограмм Б. Я. Зельдовича, рассматриваются приводящие к аналогичным последствиям (снижению ДЭ и энтропии голограмм) ограничения, определяемые перекрёстным взаимодействием двух нелинейных эффектов. Всплеск внимания к объёмным голографическим материалам наблюдается и сегодня, в т. ч. и в задачах разработки голографических мониторов. При этом не учитывается влияние таких, имманентно присущих объёмным голограммам, ограничений на ДЭ и энтропию.

Показано, что максимально достижимая ДЭ голограммы гауссовых пучков ограничена и не достигает значений, предсказанных теорией Когельника. Наибольшие значения ДЭ и энтропии можно получать в голографических материалах с фазовым откликом. Для таких материалов, к которым относятся все объёмные, в т. ч. полимерные материалы, работающие в брэгговском режиме дифракции, впервые было проанализировано взаимное влияние неравномерной по полю голограмм экспозиции и нелинейной от экспозиции ДЭ, впоследствии распространённое на голограммы Рамана-Ната. Для учета их перекрёстного влияния предложено использовать специальный параметр, названный формфактором голограммы, по аналогии с описанием гравитационного взаимодействия тел сложной формы с помощью корректирующей функции или параметра, учитывающего влияние протяженности (формы) частицы на ее взаимодействие с другими частицами и полями. При отсутствии хотя бы одной нелинейности проявление формфактора исчезает.

Описана методика вычисления формфактора. Отличия оптимальных экспозиций от классических, приводимых в технических условиях (ТУ) на материал, можно учесть с помощью поправочных коэффициентов, определяемых формфактором голограмм. Показано хорошее совпадение с ранее полученными экспериментальными данными, что объясняет причину того, что оптимальная экспозиция практически всегда бывает выше декларированной в ТУ на голографическую среду.

В приближении медленно (по сравнению с периодом интерференционной структуры) меняющихся по полю голограммы полей, средняя ДЭ ( $\eta'$ ), влияющая на энтропию голограммы, описывается (7), где  $s$  – площадь голограммы,  $E$  – энергия экспозиции,  $V$  – видность интерференционной картины,  $\beta$  – фотоотклик голографического материала:

$$\eta' = \left( \frac{1}{s} \right) \int \sin^2 \{ \beta(E) E(x, y) V(x, y) \} dx dy \quad (7)$$

Её график (рисунок 4) показывает, что в пространстве видность ( $V$ ) – экспозиция

( $E$ ) есть область, в которой ДЭ постоянна, что позволяет управлять их оптимальными значениями.

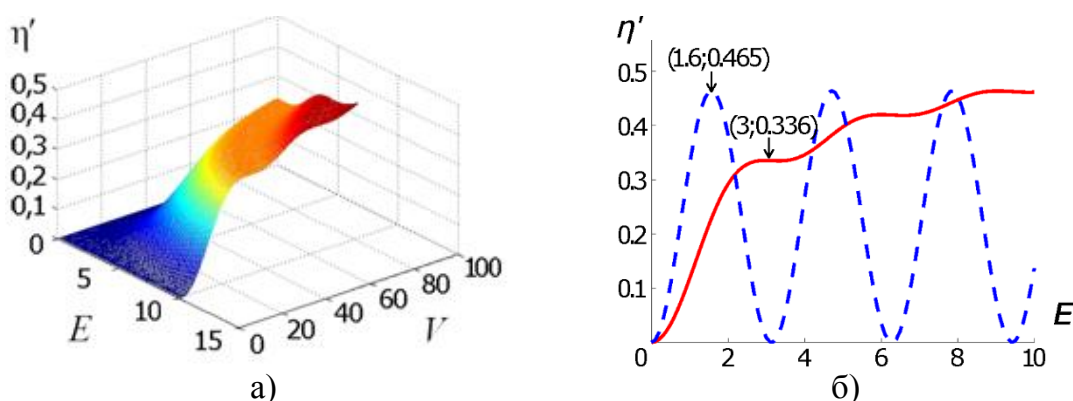


Рисунок 4 – а) зависимость  $\eta'(E, V)$ , записанной гауссовыми пучками брэгговской голограммы; б)  $\eta'(E)$  при  $V = 0,95$ . Пунктиром показана  $\eta$  когельниковской голограммы с  $E(x,y) = \text{const}$ , для удобства сравнения нормированной на максимум  $\eta'$

На графиках (рисунок 4б) видно, что средняя по голограмме ДЭ ( $\eta'$ ) вплоть до первого максимума  $\eta' = \chi = 0,336$  и её локальные значения, описываемые формулой Когельника ( $\eta$ ), с большой точностью описываются одинаково (8):

$$\eta' = \chi \sin^2 \{ \Psi \beta E V \}, \quad (8)$$

где  $\Psi$  – (формфактор) коэффициент запаздывания средней ДЭ голограммы, записанной гауссовыми пучками, по сравнению с голограммой, записанной плоскими равномерными пучками, в соответствии с теорией связанных волн Когельника, а  $\chi$  – коэффициент снижения величины этого первого максимума (для равномерных пучков  $\Psi = \chi = 1$ ).

В упрощённом виде, полагая, что средняя ДЭ, как это видно для гауссовых пучков на рисунке 4, ограничивается значением  $\chi$ , можно считать, что и глубина модуляции восстановленного голограммой изображения стабилизируется около этого значения. По Шеннону это уменьшает энтропию голограммы, поскольку при сохранении уровня шумов ( $\eta_{ш}$ ) число различимых состояний сигнала  $p_m = \eta' / \eta_{ш}$  в каждом пикселе голограммы пропорционально уменьшается и в приближении равновероятных состояний, когда все  $p_m = p$ , приводит к приближённому выражению для энтропии  $h$  на один пиксель (9):

$$h = -\log_2 (p_m / \chi) = -[\log_2 (p) - \log_2 (\chi)] \quad (9)$$

При подстановке в (9) полученных выше значений  $p = 1/256$  и  $\chi \approx 0,336$  происходит уменьшение энтропии голограммы с 8 до 6,43.

Ввиду такой связи между энтропией голограммы и величиной  $\chi$ , её ограничивающей, появляющейся из-за наличия эффекта формфактора, в практической работе следует учитывать не только коэффициент требуемого увеличения экспозиции –  $\Psi$ , называемый формфактором, но и величину ограничения максимальной по голограмме ДЭ ( $\chi$ ) и, следовательно, энтропии  $H = h \cdot (M \cdot N)$ , где  $M, N$  – число пикселей по осям цифровой голограммы.

Ограничения ДЭ и энтропии проявляется как у аналоговых голограмм, записываемых на фоточувствительные материалы, так и у компьютерных, моделирующих аналоговые.

Эффект формфактора существует не только для голограмм гауссовых пучков, но и для изобразительных, поскольку большинство сложных по форме пучков имеют гауссову статистику распределения яркости в силу ЦПТ (рисунок 5). Поэтому область применения формфактора расширяется на все методы преобразования голографической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений.

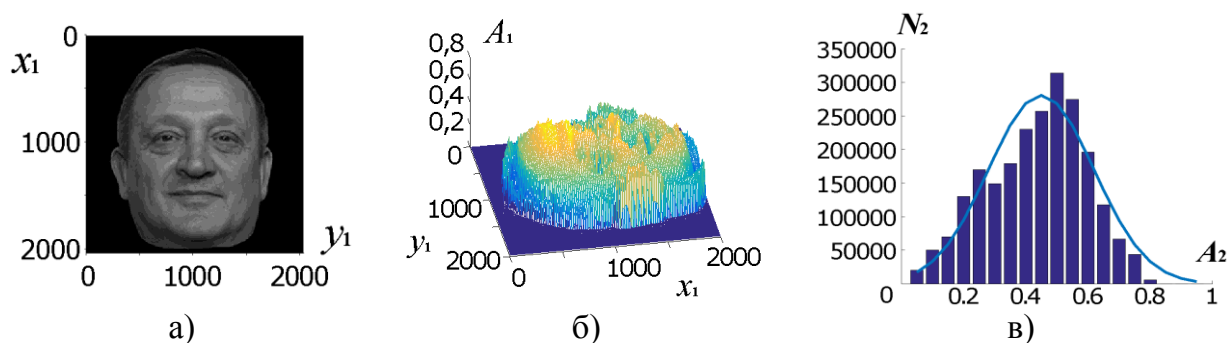


Рисунок 5 – а) изображение в серых тонах; б) 3D развёртка динамического диапазона яркостей составляющих его точек; в) гистограмма распределения яркости

Показано, что вычисленная по (7), аппроксимированная по (8) ДЭ для сложных, портретных изображений (рисунок 5) даёт значения для  $\Psi$  и  $\chi$  очень близкие к соответствующим значениям, вычисленным для голограмм гауссовых пучков, показывая большую степень общности полученных результатов. Это показано не на одном изображении, а на серии. Сумма регрессионных остатков разброса ДЭ уменьшается при увеличении выборки из числа обработанных портретов разных людей. Отличие гистограмм изображения и ближайшей к ним гауссовой кривой составило  $D = 18 \%$ , а отличие в величине формфактора между ними ( $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ ) не превышало  $10 \%$ . Такой точности вполне достаточно для практического выбора экспозиции при известной величине видности записывающей голограмму интерференционной картины и оценке предельных значений информационной ёмкости голограмм по найденной энтропии.

Сложные голографические изображения, формирующиеся с помощью пучков, неоднородность яркости которых является следствием влияния многих факторов (поглощение, дифракция и др.), обладающих гистограммой распределения яркости, близкой к гауссу, формируют голограммы с формфактором, близким к гауссовым голограммам.

Далее показано, что модификация записываемого на голограмму объектного пучка, вызываемая записью расфокусированного или удалённого от поверхности голограммы объекта, не приводит к существенным изменениям формфактора и достигаемой ДЭ.

В численном эксперименте сравнивались значения формфактора и величины достижимой ДЭ для четырёх изображений – портретного изображения, слабо расфокуси-

ванного того же изображения, сильно расфокусированного и удалённого при освещении монохроматическим излучением на расстояние, когда явно проявляются эффекты дифракции Френеля и вплоть до дальней зоны дифракции Фраунгофера.

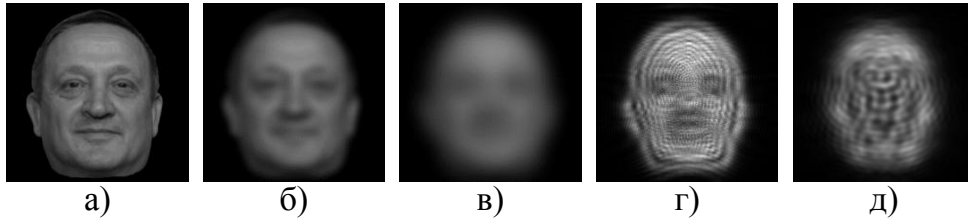


Рисунок 6 – а) портретное изображение; б) портретное изображение, расфокусированное на 1 %; в) портретное изображение, расфокусированное на 10 %; г) изображение в ближней зоне дифракции; д) изображение в дальней зоне дифракции

Полученные значения формфактора ( $\Psi$ ) для каждого изображения и отклонения их статистики от гауссовой ( $D$ ) были, соответственно: ( $\Psi; D$ ) = (0.53; 17.9 %); (0.63; 27.5 %); (0.62; 45.2 %); (0.61; 47.9 %); (0.51; 48.4 %). В работе показано, что даже когда гистограмма яркости уже сильно отличается от гауссовой формы, величина формфактора остаётся близкой к формфактору исходного изображения. Полученные результаты говорят о том, что формфактор более консервативен к изменению записываемого изображения, чем его статистическое распределение яркости, напоминая этим известные интегралы движения.

При нелинейном отклике голографического материала максимум ДЭ достигается гораздо позже, что означает большее расходование динамического диапазона фотоматериала, необходимое для его достижения. Этот недостаток компенсируется тем, что средняя ДЭ (8) становится выше, чем в случае линейного фотоотклика. Из численного эксперимента было получено, что для нелинейности фотоотклика близкой к нелинейности реального голографического материала «Реоксан», соответствующая величина максимума ДЭ ( $\chi$ ) на 40 % выше, чем для случая линейного фотоотклика, а формфактор  $\Psi=2,5$ . Это означает, что используется значимо больший динамический диапазон фотоотклика материала. Одновременно увеличивается максимально достижимая ДЭ, т. е. параметр  $\chi$  растёт, а с ним логарифмически и максимально достижимая энтропия голограммы.

Показано, что аналогично описанному выше (пространственному) формфактору, существуют частотные ограничения на максимально достижимую ДЭ голограмм, которые проявляются через длину когерентности излучения лазера. Изменения видности такой интерференционной структуры вдоль продольной координаты, связанные с технической шириной линии излучения, также влияют на характеристики голограммы:

$$\eta' = \left( \frac{1}{s} \right) \int \sin^2 \{ \beta(E) E(x, y) V(x, y, z) \} dx dy \quad (10)$$

Получено, что для каждого  $z$  есть свой участок, где  $\eta'(E)$  стагнирует. Он всегда сле-

дует за первым максимумом, что препятствует установлению оптимального значения экспозиции. Так же, как и в случае описанного выше пространственного формфактора, можно приближённо вычислять ДЭ по (8), а энтропию голограммы по (9).

Показана связь величины формфактора и ДЭ двумерных (тонких) голограмм, изображения на которых восстанавливаются в режиме дифракции Рамана-Ната. Проявление формфактора в регистрирующей среде на основе многослойной структуры халькогенидных стеклообразных полупроводников и в азополимерах было экспериментально показано для голографических решеток, записанных гауссовскими пучками. Близкие значения формфактора для объёмных и тонких гауссовых голограмм дает основание считать эффект проявления формфактора одинаково применимым для обоих режимов дифракции: Брэгга и Рамана-Ната. Изучение кинетики изменения их ДЭ показывает практическое совпадение значений формфактора, выражая, предположительно, его единую природу.

Практическое значение обнаруженного эффекта формфактора голограмм подтверждено его использованием при изучении кинетики регистрирующих сред на основе структуры ХСП и в азополимерах, что защищено патентом RU2734093C1.

На голограммы, работающие в режиме дифракции Рамана-Ната, распространяются все свойства формфактора, полученные ранее для голограмм, работающих в режиме дифракции Брэгга, причём параметры увеличения оптимальной экспозиции  $\Psi$  для получения максимально ДЭ у них близки, а величина самой максимально достижимой экспозиции  $\chi$  у голограмм с дифракцией Рамана-Ната примерно втрое меньше, чем в случае дифракции Брэгга, что ещё больше ограничивает энтропию голографических дисплеев этого типа.

**Таким образом, в главе 3** кроме экспериментально обнаруженного эффекта резонанса спекл-поля, обнаружен эффект формфактора голограмм, объяснена его физическая природа, определяемая перекрёстным взаимодействием двух нелинейных зависимостей – ДЭ от экспозиции и экспозиции по полю голограммы. Ограничения, к которым приводит этот эффект (формфактор), существуют как у голограмм с дифракцией брэгговского типа, так и у голограмм с дифракцией Рамана-Ната. Это имеет и теоретическое значение, показывая новые, в полной мере неустранимые, имманентные свойства голограмм, и прикладное, заменяя интерференционные измерения в задачах изучения кинетики ДЭ разрабатываемых голографических материалов на дифракционные.

Показаны особенности формфактора, включая увеличение ДЭ при увеличении нелинейности фотоотклика голографического материала или фотоматрицы, его консервативную природу, напоминающую интегралы движения, поскольку он слабо меняется при значительных искажениях голографируемого изображения (дефокусировке и дифракции).



Показана его применимость не только для гауссовых пучков, но и для сложных сигналов, формирующих реальные изображения.

ДЭ восстановленных голограммой участков изображения изменяется не только в плоскости голограммы, но и по глубине изображения. Эффект продольного формфактора, определяемого длиной когерентности записывающего голограмму излучения, позволяет изменять яркость восстановленного изображения по глубине сцены.

**Глава 4 «Методы синтеза голограмм для удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений»** посвящена экспериментальной проверке теоретически обоснованной возможности реализации 3D удалённой реальности, передачи по радиоканалу голографического 3D видео и синтеза аналоговых голограмм из кадров этого видео, восстанавливающих 3D изображения живого человека с высоким пространственным разрешением и параллаксом.

Показано, что выбранный метод латерального освещения объекта структурированным светом из параллельных полос позволяет синтезировать голограммы 3D объектов, обладающие как горизонтальным, так и вертикальным параллаксом. Численный эксперимент показал, что изображение изопроекции таких полос на 3D объект голографирования само является дифракционной структурой, при освещении которой монохроматическим излучением появляется несколько порядков дифракции, один из которых восстанавливает 3D изображение, аналогичное восстановленному голограммой, записанной на большей длины волны, от долей миллиметра до сантиметров, что соответствует радиодиапазону.

Мелкие перепады глубины на голографируемом объекте не видны глазом ни с помощью механизма вергенции, ни с помощью аккомодации. Поэтому для численного экс-

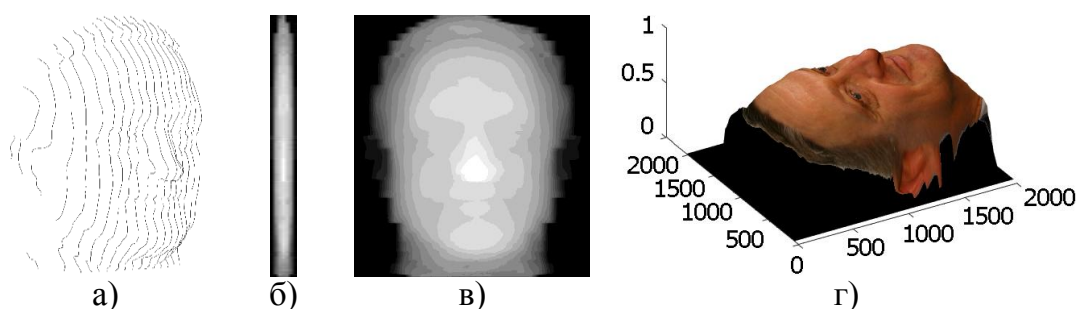


Рисунок 7 – Преобразование координат каждой полосы (а) в карту высот (б) и (в), 3D изображение, сформированное наложением текстуры на карту высот (г)

перимента оказалось достаточным изображение 3D поверхности (рисунок 7в) из структуры, образованной 26 полосами (рисунок 7а, б).

По полученному виртуальному 3D изображению (рисунок 7г), без ограничения общности, в схеме Лейта-Упатниекса синтезирована виртуальная голограмма с углом падения опорной волны  $10^\circ$  на длине волны  $\lambda = 0,53$  мкм.

Проверка эквивалентности голограммы и паттернов структурированного света из

латерально освещающих объект параллельных полос была реализована по следующему алгоритму. С целью исключить развёртывание фазы 3D изображение объекта сжималось по глубине в  $K$  раз до  $\lambda/2$ , и по нему формировались голограмма и паттерн структурированного света. Последний – с медианным увеличением частоты полос до периода на голограмме. Далее, и от голограммы, и от паттерна вычислялись спектры Френеля, что соответствовало восстановлению трёх порядков дифракции. На рисунке 8 показаны действительные части спектра Френеля.

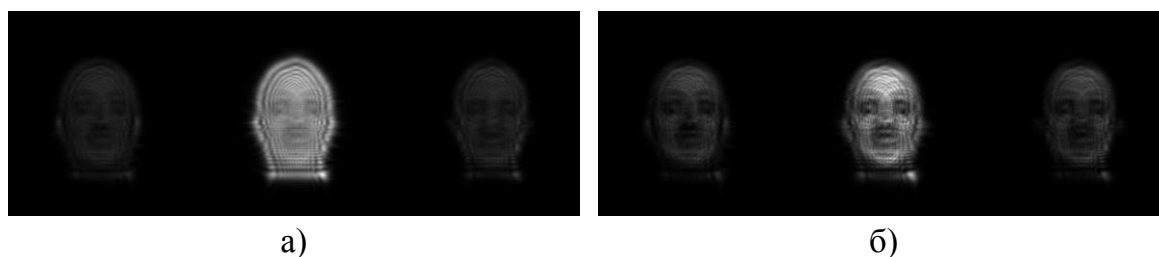


Рисунок 8 – Действительная часть спектра Френеля: а) от голограммы; б) от паттернов структурированного света

Затем из каждого спектра выделялся минус первый порядок дифракции, несущий информацию об объекте голографирования. Это соответствовало операции вычитания несущей пространственной частоты как в голограмме, так и в структуре паттерна.

Далее, из полученных спектров объектов обратным преобразованием Френеля восстанавливалось исходное 3D изображение без несущей пространственной частоты, и для восстановления объёма его глубина умножалась на обратный коэффициент сжатия  $K^{-1}$ . Полученные при восстановлении голограммой и паттерном 3D изображения сравнивались (рисунки 9а, б).

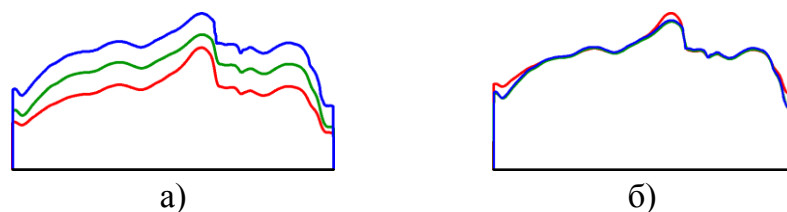


Рисунок 9 – Профиль центрального участка карты глубин: а) синий – исходный, зелёный – восстановленный голограммой, красный – восстановленный структурированными полосами (для наглядности профили смещены по вертикали); б) профили синий, зелёный, красный – совмещены

Видно практическое совпадение восстановленных голограммой и паттерном 3D изображений, что указывает на близость их дифракционных структур. Восстановленные паттерном 3D изображения (рисунок 10) обладают непрерывным горизонтальным и вертикальным параллаксом, как и восстановленные голограммой.



Рисунок 10 – Восстановленное паттерном структурированного света изображение живого 3D объекта: а) горизонтальный параллакс; б) вертикальный параллакс

Структура, образованная паттерном параллельных полос, настолько точно повторяет свойства голограммы, что, просто увеличивая частоту полос, что аналогично увеличению несущей частоты голограммы, паттерн можно превращать в голограмму, восстанавливающую 3D изображение объекта. Простота, с которой можно изменять несущую частоту паттерна, позволяет легко перемещаться по всему диапазону электромагнитного излучения, включая ИК, УФ, радиодиапазон и др. (рисунок 11).

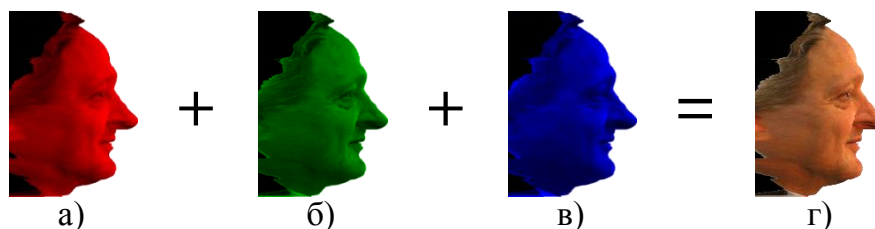


Рисунок 11 – Проекция восстановленного 3D объекта, зарегистрированного фронтально, но восстановленного с поворотом на 90° относительно оптической оси съёмки: а) в красном; б) в зелёном; в) синем участках спектра; г) совмещённое изображение в стандарте RGB

Полученные результаты легко применимы для других видов излучения. Например, можно создавать карту высот акустической локацией, а восстанавливать 3D объекты в видимом диапазоне электромагнитного излучения и наоборот. Использование подобных систем в задачах удалённой хирургии и в ряде специальных задач трудно переоценить.

Методом двух модальностей с возвращением несущей пространственной частоты были синтезированы компьютерные голограммы на приёмном конце канала связи. Первая материальная голограмма (рисунок 12), синтезированная на приёмном конце канала связи по рассчитанной компьютерной голограмме была записана по схеме записи С. Бентона.

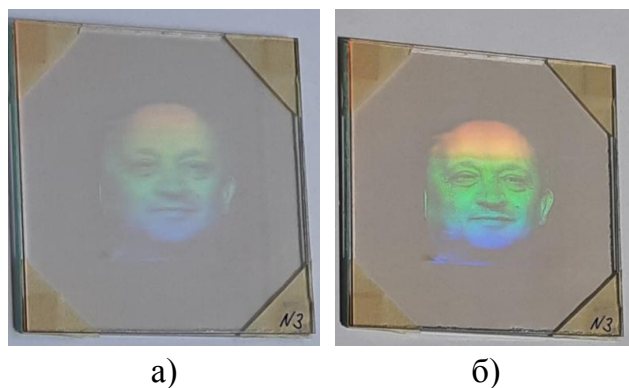


Рисунок 12 – Радужная голограмма 3D живого объекта в солнечном свете: а) свет, рассеянный облаком в солнечный день; б) прямой солнечный свет

На рисунке 13 приведены изображения, восстановленные радужной голограммой. У восстановленного изображения видно

наличие параллакса, аналогичного параллаксу в передаваемом изображении. Параллакс был измерен в пространстве перед голограммой, куда было вынесено восстановленное изображение.

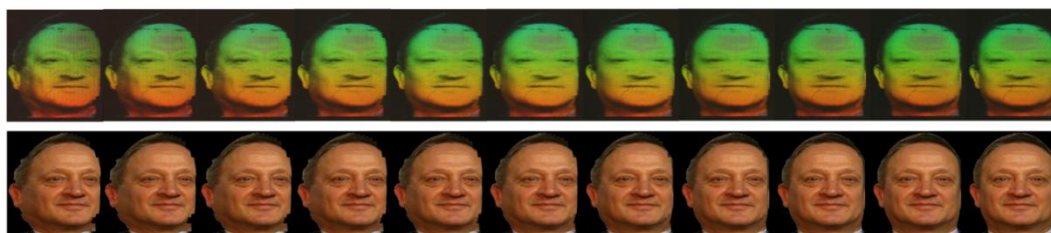


Рисунок 13 – Восстановленные голограммой изображения 3D объекта с горизонтальным параллаксом (верхний ряд); исходные изображения 3D объекта, записанные на голограмму в устройстве «KineMax» (нижний ряд)

Следовательно, изображение карты высот, зарегистрированное с помощью паттерна структурированного света, вместе с текстурой 3D объекта (рисунок 7) на голограмме (рисунок 12), является 3D изображением исходного объекта (рисунки 1, 2).

Ещё одним подтверждением работоспособности голографического метода двух модальностей являются результаты эксперимента в технологии DotMatrix по синтезу материальной аналоговой голограммы 3D объекта при использовании его компьютерной модели 3D маски, имеющей непрерывный параллакс (рисунок 14).

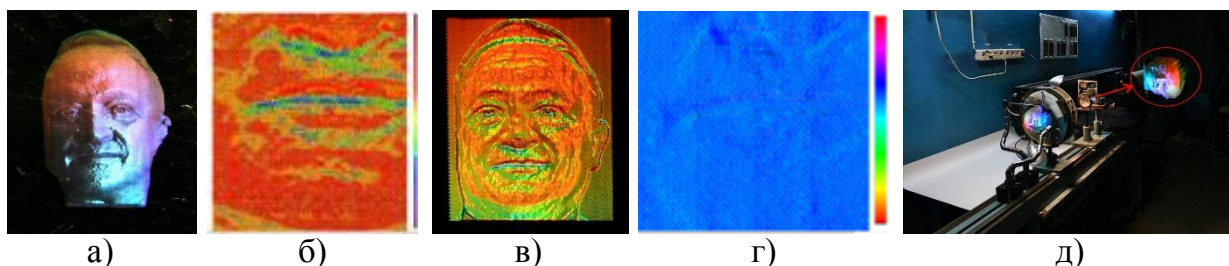


Рисунок 14 – Голограммы: а) с регулярным расположением голопикселей, скважность 1,5; б) её карта интерференционных полос; в) с полигональным расположением голопикселей, покрывающих всю 3D поверхность маски; г) её карта интерференционных полос; д) бителлцентрическая система измерения параллакса

Экспериментальные измерения микроструктуры голопикселей для анализа структуры полученных голограмм были проведены на оборудовании, разработанном в ИАЭ СО РАН. Результаты измерений показали, что структура голопикселей (рисунок 14б и рисунок 14г) состоит из набора прямых отрезков. Каждый голопиксель представляет собой полигон от 17 до 34 мкм с решётками периодом от 0,47 до 1,15 мкм со статистически средним периодом 0,9 мкм. Средний азимут направления решёток  $60^\circ$  с девиацией  $\pm 10^\circ$ .

Из структуры голограмм, представленных на рисунке 14а, в, и измеренных характеристик (рисунок 14б, г) видно, что синтезированные голограммы обладают несущей частотой и её девиацией, что представлено как изменяющимся периодом, так и азимутом решёток. Следовательно, на приёмном конце канала связи была получена полноценная голо-



грамма. Измеренный угол наблюдения непрерывного параллакса составил для голограммы (рисунок 14а)  $10,5^\circ$ , а для голограммы (рисунок 14б)  $9,27^\circ$ .

Изложенные выше результаты получили подтверждение в ходе экспериментальной проверки возможности передачи видеопотока 3D голографической информации по беспроводному каналу связи Wi-Fi с частотой кадровой развёртки больше 25 Гц. Получены результаты такой передачи с помощью протокола FTP. Измеренное программой «FileZilla» время передачи показало, что передавать голографическую информацию, необходимую и достаточную для синтеза на приёмном конце канала связи голограмм, восстанавливающих 3D изображения с высоким пространственным разрешением и непрерывным параллаксом, можно с кадровой частотой развёртки от 27 до 194 Гц в формате PNG и от 99 до 644 Гц в формате JPEG (70 %) для TV стандартов, близких по размеру кадров к Full HD и (PAL, SECAM), соответственно.

Разработанный метод позволяет передавать видеопоток 3D голографической информации с TV частотой кадровой развёртки и синтезировать на приёмном конце канала связи компьютерные голограммы, восстанавливающие 3D изображения с высоким пространственным разрешением и непрерывным параллаксом. На рисунке 15а приведена

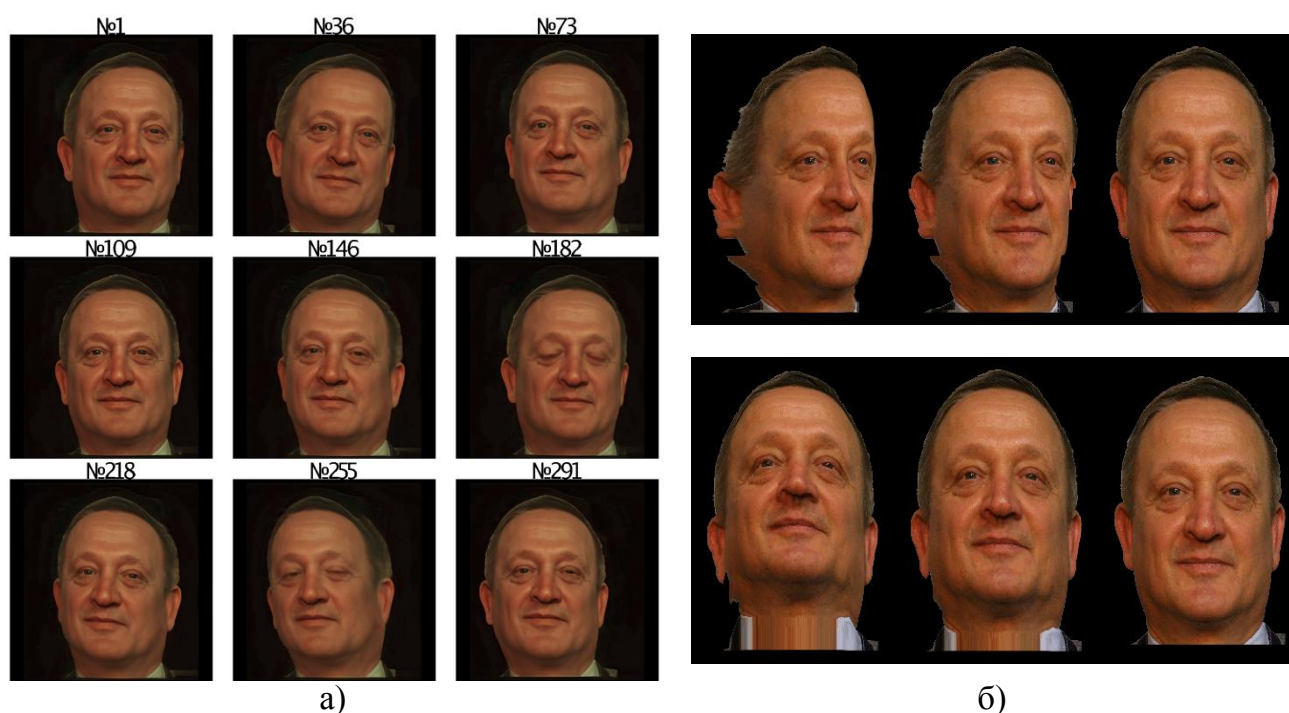


Рисунок 15 – а) выборка из 291 кадра голографического 3D видео, переданного по радиоканалу с TV частотой кадровой развёртки; б) горизонтальный и вертикальный параллакс в каждом кадре

выборка из 291 кадра голографического 3D видео каждого тридцать шестого кадра, показывающая наличие динамики в переданном сюжете. На рисунке 15б приведена сборка изопроекций одного из 3D кадров этого видео, на котором явно виден горизонтальный и вертикальный параллакс. С учётом того, что приведённые результаты получены на неспе-

циализированном оборудовании, очевидно, что при небольшой его доработке, можно увеличить пропускную способность канала так, как необходимо для передачи голографического TV стандартов 4K и 8K UHD.

**Таким образом, в главе 4** показано, что паттерны структурированного света, в виде латерально освещающих 3D объект параллельных полос, после их медианного мультиплицирования образуют дифракционную структуру, при освещении которой излучением, согласованным по условию Брэгга, восстанавливаются три порядка дифракции, один из которых формирует 3D изображение объекта. Отсутствие необходимости применять для синтеза такой дифракционной структуры интегральные преобразования Фурье и Френеля снижает требования к оборудованию рендеринга таких 3D изображений, а их небольшой информационный объём существенно ускоряет передачу голографической информации.

По результатам расчёта компьютерных голограмм записаны аналоговые голограммы, восстанавливающие 3D изображения с высоким пространственным разрешением и непрерывным параллаксом, что подтверждает корректность их расчётов и принципиальную возможность, при наличии динамического голографического монитора, формирования покадрового голографического видео.

Осуществлена передача пакетов 3D голографической информации с телевизионной частотой кадровой развёртки, по которым синтезированы на приёмном конце радиоканала компьютерные голограммы. По нескольким из них записаны аналоговые голограммы, обладающие высоким пространственным разрешением восстановленного глубокого 3D изображения и его непрерывным параллаксом. Таким образом, продемонстрирована реализуемость удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений голографическими методами преобразования информации.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В работе предложены, проанализированы и апробированы голографические методы преобразования информации, основанные на физических особенностях голограмм, методы рендеринга 3D видеопотока, преодолевающие проблемы энтропийного кодирования, обеспечивающие передачу по радиоканалу динамических объёмных изображений высокого качества.

1. На основе изучения материалов открытых публикаций по предельной информационной ёмкости голограмм и проблемам динамического воспроизведения 3D изображений были определены основные актуальные направления исследований в этой области, сформулирована тема настоящего исследования, обоснованы его цели и задачи.

2. Проведённые исследования показали, что дифракционная структура, представ-

ляющая голограмму, имеет два типа пространственных гармоник (несущая пространственная частота и её девиация), первая из которых влияет на пространственное разделение порядков дифракции, а вторая – на формирование 3D изображения в соответствующем порядке. Для наблюдения 3D объекта на приёмном конце канала связи, достаточно информации, содержащейся в девиации пространственных гармоник голограммы, без передачи всей информации о голограмме.

3. Исследованы физические свойства голограмм, проведены численные эксперименты, разработан, подвергнут экспериментальной апробации, защищён патентом и применён для решения актуальной научной задачи *метод передачи 3D голографической информации двумя модальностями (2D текстура поверхности и 2D карта высот), без несущей пространственной частоты*, по стандартному радиоканалу Wi-Fi (40 МГц), с TV частотой кадровой развёртки, позволяющий синтезировать на приёмном конце канала связи голограммы, восстанавливающие глубокое 3D изображение, обладающее непрерывным параллаксом и пространственным разрешением на порядок более высоким, чем при передаче спектра голограмм методом SSB. При существенном сжатии передаваемой информации (на 4-5 порядков) метод обеспечивает качество восстановленного на приёмном конце канала связи 3D изображения не ниже современных стандартов TV высокой чёткости (HD, Full HD и даже 4K).

4. Метод передачи 3D голографической информации двумя модальностями позволяет легко изменять несущую частоту, перемещая 3D изображение по спектру электромагнитных колебаний как в сторону ИК и в радиодиапазон, так и выше – в УФ и далее, а также формировать гиперспектральные 3D изображения. Он так же просто объединяет изображения, записанные электромагнитным излучением и акустическим, когда карта высот создаётся ультразвуковым зондированием. При синтезе по этим двум модальностям на приёмном конце канала связи голограммы, должно выполняться неравенство, полученное из условий разделения порядков дифракции при восстановлении 3D голографического изображения и критерия Найквиста на число отсчётов в каждом периоде несущих гармоник голограммы.

5. Методом двух модальностей без несущей пространственной частоты передана по радиоканалу информация о 3D объекте голографирования, *синтезированы компьютерные и записаны аналоговые голограммы, восстанавливающие 3D изображение голографируемого объекта*. Характеристики дифракционной структуры аналоговых голограмм измерены на специальном оптическом оборудовании. Измерения показали наличие непрерывного параллакса восстановленного ими изображения и наличие в этих голограммах несущих пространственных частот, а также их девиации.

6. Предложен, исследован и экспериментально апробирован новый метод синтеза дифракционной структуры, несущей информацию о 3D объекте голографирования на основе её формирования медианным мультиплицированием фотографически зафиксированного паттерна структурированного света из параллельных полос, латерально спроецированных на 3D объект. При дифракции на такой структуре опорного пучка с выполнением условий Брэгга восстанавливается 3D изображение объекта, аналогичное восстанавливаемому голограммой. Метод позволил почти вдвое увеличить скорость передачи голографической информации и синтезировать компьютерные голограммы сфокусированных изображений сравнительно простым способом, без использования интегральных преобразований.

7. Экспериментально обнаружен имманентно присущий объёмным, по критерию Клейна, голограммам *эффект резонанса спекл-поля*, ограничивающий максимально достижимую ДЭ и энтропию, послуживший одним из обоснований модовой теории голограмм Б. Я. Зельдовича.

8. Ограничения максимально достижимой ДЭ и энтропии голограмм определяются, в частности, их формфактором. Это справедливо для случаев записи голограмм гауссовыми пучками, а также для записи сложными объектными пучками, как при дифракции Брэгга, так и Рамана-Ната. Формфактор проявляется как в аналоговых голограммах, записанных на фотоматериале, так и в компьютерных голограммах, моделирующих запись аналоговых.

9. При искажениях объектного пучка, вызванных как расфокусировкой изображений, так и дифракцией в ближней зоне, формфактор слабо изменяется, что указывает на его консервативную природу, в некотором смысле, схожую с интегралами движения.

10. Взаимодействие двух нелинейных эффектов (нелинейность с локальными максимумами ДЭ от экспозиции и нелинейность пространственного распределения экспонирующего голографического материал излучения), приводящих к появлению ограничений, вызванных формфактором, с третьим нелинейным эффектом (нелинейностью фотоотклика голографического материала) приводит не к снижению средней ДЭ и энтропии голограммы, а к их увеличению.

11. Защищен патентом и используется в научных исследованиях по разработке новых голографических материалов (азополимеры и халькогенидные стеклообразные полупроводники) *метод, позволяющий* оперативно, в процессе записи голограмм, простым дифракционным способом, вместо интерференционного, *измерять кинетику фотоотклика на основе эффекта формфактора* с достаточной точностью.

12. Доказано, что явление алиасинга имманентно присуще всем типам голограмм



3D объектов на тех их участках, где направление тангенциальной составляющей их поверхности приближается к направлению нормали волнового фронта, регистрируемого голограммой. Предложенный *метод компенсации алиасинга голограмм сфокусированных изображений* заключается в *искусственном сжатии глубины отображаемого пространства при записи голограмм и возвращении глубины при восстановлении голограммой 3D изображения путём его проекции через бителецентрическую телескопическую систему.*

13. Получено динамическое 3D изображение живого, изменяющегося объекта (человека), состоящее из 291 объёмного кадра, каждый из которых виртуально восстановлен с частотой кадровой развёртки 25 Гц из серии компьютерных голограмм, синтезированных по информации, переданной методом двух модальностей по каналу связи Wi-Fi (40 МГц). Это изображение имеет высокое пространственное разрешение (2000×2000 пикс.), превышающее стандарт HD и Full HD (1920×1080 пикс.), высокое качество передачи глубины цвета и глубины сцены (по 256 градаций), а также непрерывный параллакс. Таким образом, *экспериментально подтверждена теоретически обоснованная возможность реализации 3D удалённой реальности, передачи по радиоканалу голографического 3D видео высокого разрешения.*

**Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы.** Для дальнейшего развития работ по созданию 3D голографического телевидения и дополненной реальности требуется создание специализированных пакетов программ, обеспечивающих не только более точное и быстрое моделирование описанных в настоящей диссертации процессов передачи информации, но и анализ подходящих решений проблемы синтеза голограмм, восстанавливающих 3D изображения голографируемого объекта, в частности вычислений большеразмерных преобразований Френеля и Фраунгофера трёхмерного сигнала с отладкой алгоритмов развёртки фазы.

На основе анализа структуры голограммы, проведённой в настоящей работе, позволяющей передавать только ту часть информации о голограмме, которая позволяет восстанавливать 3D изображение объекта с необходимым для восприятия пространственным разрешением и непрерывным параллаксом, проработать пути и методы создания голографических мониторов, преобразующих двухмодовый состав 3D изображений, переданных по каналу связи в голографические кадры с TV частотой кадровой развёртки.

Провести расчёты и предложить конструктивные решения устройств фото-видеофиксации динамических объёмных изображений с пространственным разрешением современных TV стандартов, глубиной цвета и глубиной отображаемого пространства не хуже 256 градаций, позволяющие работать с TV частотой кадровой развёртки и выше, а также определить принципиальные перспективные направления развития таких систем.

## *Основные публикации автора по теме диссертации*

### **В изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science**

1. Шойдин С. А. Запись голограмм в динамических безрелаксационных средах / С. А. Шойдин, Е. А. Сандер – Текст: непосредственный // *Опт. и спектр.* – 1985. – Т. 58. – № 1. – С. 200-202.
2. Сандер Е. А. Экспериментальное наблюдение пространственного резонанса спекл-поля с неоднородностями показателя преломления / Е. А. Сандер, В. В. Шкунов, С. А. Шойдин – Текст: непосредственный // *ЖЭТФ.* – 1985. – Т. 88. – № 1. – С. 116-119.
3. Шойдин С. А. Парадоксальные изображения и парадоксальные технические решения в голографии на примере гражданских разработок / С. А. Шойдин // *Известия высших учебных заведений. Физика.* – 2015. – Т. 58. – № 11-3. – С. 140-144.
4. Шойдин С. А. Требования к лазерному излучению и формфактор голограмм / С. А. Шойдин – Текст: непосредственный // *Оптический журнал.* – 2016. – Т. 83. – № 5. – С. 65-75.
5. Шойдин С. А. Метод достижения максимальной дифракционной эффективности голограмм на основе оптимизации формфактора / С. А. Шойдин – Текст: непосредственный // *Компьютерная оптика.* – 2016. – Т. 40. – № 4. – С. 501-507. – <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-4-501-507>.
6. Шойдин С. А. Формфактор голограмм сложных изображений / С. А. Шойдин, А. В. Трифанов – Текст: непосредственный // *Компьютерная оптика.* – 2018. – Т. 42. – № 3. – С. 362-368. – <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-3-362-368>.
7. Привалов В. Е. Формфактор и временная когерентность излучения / В. Е. Привалов, С. А. Шойдин, А. В. Трифанов // *Опт. журнал.* – 2018. – Т. 85. – № 9. – С. 25-30. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-09-25-30>.
8. Шойдин С. А. Влияние нелинейности фотоотклика на дифракционную эффективность голограмм / С. А. Шойдин – Текст: непосредственный // *Автометрия.* – 2019. – Т. 55. – № 1. – С. 35-39. – <https://doi.org/10.15372/AUT20190105>.
9. Shoydin S. A. Use of spatial symmetries for problems of modeling of image transfer processes / S. A. Shoydin, A. L. Puzov – Текст: электронный // *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.* – 2019. – Т. 11208. – С. 74-79. – <https://doi.org/10.1117/12.2539833>.
10. Shoydin S. A. Use of spatial symmetries for problems of modeling of image transfer processes / S. A. Shoydin, A. L. Puzov – Текст: электронный // *Proc. SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics.* – 2019. – Т. 11208. – С. 74-79. – <https://doi.org/10.1117/12.2539833>.
11. Шойдин С. А. Пространственный фотоотклик, формфактор и требования к голографическим материалам / С. А. Шойдин, М. С. Ковалев – Текст: непосредственный // *Опт. и спектр.* – 2020. – Т. 128. – № 7. – С. 885-896. – <https://doi.org/10.21883/OS.2020.07.49557.108-20>.
12. Шойдин С. А. Синтез голограмм на приёмном конце канала связи с объектом голографирования / С. А. Шойдин – Текст: непосредственный // *Компьютерная оптика.* – 2020. – Т. 44. – № 4. – С. 547-551. – <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-694>.
13. Shoydin S. A. Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer / S. A. Shoydin, A. Yu. Meshalkin, M. S. Kovalev – Текст: электронный // *Optical Materials Express.* – 2020. – Т. 10. – № 8. – С. 1819-1825. – <https://doi.org/10.1364/OME.399017>.
14. Шойдин С. А. Способ дистанционного формирования голографической записи / С. А. Шойдин, А. Л. Пазов – Текст: непосредственный // *Автометрия.* – 2021. – Т. 57. – № 1. – С. 92-102. – <https://doi.org/10.15372/AUT20210110>.
15. Shoydin S. A. Transmission of 3D Holographic Information via Conventional Communica-

- tion Channels and the Possibility of Multiplexing in the Implementation of 3D Hyperspectral Images / S. A. Shoydin, A. L. Puzoev – Текст: электронный // Photonics. – 2021. – Т. 8. – № 10. – С. 448-471. – <https://doi.org/10.3390/photonics8100448>.
16. Shoydin S. A. Recording a Hologram Transmitted over a Communication Channel on One Sideband / S. A. Shoydin, S. B. Odinkov, A. L. Puzoev, I. K. Tsyganov, E. A. Drozdova – Текст: электронный // Appl. Sciences. – 2021. – Т. 11. – № 23. – С. 11468. – <https://doi.org/10.3390/app112311468>.
  17. Шойдин С. А. Сжатие 3D голографической информации аналогично передаче информации на одной боковой полосе / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев – Текст: непосредственный // Оптический журнал. – 2022. – Т. 89. – № 3. – С. 79-88. – <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2022-89-03-79-88>.
  18. Шойдин С. А. Синтезированные на приёмном конце канала связи голограммы 3D объекта в технологии Dot Matrix / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин – Текст: непосредственный // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46. – № 2. – С. 204-213. – <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1037>.

### **В изданиях, входящих в международные базы цитирования Scopus**

19. Shoydin S. A. Application of Denisjuk's holograms in advertising / S. A. Shoydin – Текст: электронный // Optical Memory and Neural Networks. – 2013. – Т. 22. – № 4. – С. 272-274. – <https://doi.org/10.3103/S1060992X13040127>.
20. Shoydin S. A. Influence of laser parameters on information capacity of communication channel / S. A. Shoydin – Текст: электронный // Optical Memory and Neural Networks. – 2014. – Т. 23. – № 4. – С. 287-294. – <https://doi.org/10.3103/S1060992X14040122>.
21. Shoydin S. A. Paradoxical images and counterintuitive technical solutions in holography in the context of civil projects / S. A. Shoydin – Текст: электронный // Optical Memory and Neural Networks. – 2016. – Т. 25. – № 3. – С. 180-183. – <https://doi.org/10.3103/S1060992X16030048>.
22. Shoydin S. A. Requirements to lasers and formfactor of holograms / S. A. Shoydin – Текст: электронный // Optical Memory and Neural Networks. – 2016. – Т. 25. – № 2. – С. 95-101. – <https://doi.org/10.3103/S1060992X16020053>.
23. Shoydin S. A. Holographic memory without reference beam / S. A. Shoydin – Текст: электронный // Optical Memory and Neural Networks. – 2016. – Т. 25. – № 4. – С. 262-267. – <https://doi.org/10.3103/S1060992X16040056>.
24. Privalov V. E. Holograms Form Factor and the Recording Laser Radiation Mode Structure / V. E. Privalov, V. G. Shemanin, S. A. Shoydin – Текст: электронный // Optical Memory and Neural Networks. – 2018. – Т. 27. – № 3. – С. 196-202. – <https://doi.org/10.3103/S1060992X18030098>.

### **В изданиях из перечня ВАК РФ**

25. Пазоев А. Л. Передача 3D голографической информации по радиоканалу методом, близким SSB / А. Л. Пазоев, С. А. Шойдин – Текст: непосредственный // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2023. – С. 132–134. – <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2023-23-1-21-27>.

### **Патенты по теме диссертации**

26. Шойдин С. А.; Способ дистанционного формирования голографической записи. Патент RU2707582С1, Россия, МПК G03Н 1/00; заявл. 03.07.2018; опубл. 28.11.2019. Бюл. № 34.
27. Шойдин С. А., Мешалкин А. Ю.; Способ экспресс анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала. Патент RU2734093С1, Россия, МПК G03Н 1/00, G01М 11/00; заявл. 07.04.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29.

**Акты о практическом применении полученных в диссертации результатов:**

1. Акт о практическом применении полученных результатов диссертационного исследования С. А. Шойдина на тему «Голографические методы преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений» Ministry of Education and Research of Republic of Moldova, Institute of Applied Physics.
2. Акт о практическом применении полученных результатов диссертационного исследования С. А. Шойдина на тему «Голографические методы преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений» Акционерного общества «Новосибирский приборостроительный завод».

Подписано в печать XX.XX.2023. Формат 60×84 1/16.

Печ. л. 2,0. Тираж 120 экз. Заказ 35.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ  
630108, Новосибирск, Плехотного, 8