

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
СИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГЕОСИСТЕМ И ТЕХНОЛОГИЙ  
(СГУГиТ)

*На правах рукописи*

Шойдин Сергей Александрович

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

1.3.6 (01.04.05) – Оптика

Диссертация на соискание учёной степени  
доктора физико-математических наук

Научный консультант:  
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.  
Венедиктов Владимир Юрьевич

Новосибирск – 2023

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
Актуальность темы.....	7
Цель и задачи диссертационной работы.....	9
Научная новизна.....	11
Теоретическая и практическая значимость.....	13
Методология и методы исследования.....	15
Положения, выносимые на защиту.....	17
Степень достоверности и апробация результатов.....	18
Объём и структура работы.....	21
ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМ ПРЕДЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЁМКОСТИ ГОЛОГРАММ И ДИНАМИЧЕСКОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ.....	22
Параграф 1.1. Информационная ёмкость голограмм.....	22
<i>1.1.1. Оценки количества информации.....</i>	<i>27</i>
<i>1.1.2. Проблемы сжатия голографической информации.....</i>	<i>28</i>
<i>1.1.3. Влияние величины динамического диапазона.....</i>	<i>30</i>
<i>1.1.4. Исправление ошибок.....</i>	<i>40</i>
<i>Выводы параграфа 1.1.....</i>	<i>41</i>
Параграф 1.2. Информационные особенности голографического формирования динамических изображений.....	44
<i>1.2.1. Регистрация 3D информации для синтеза голограмм.....</i>	<i>45</i>
<i>1.2.2. Вторая проблема – передача голографической информации.....</i>	<i>49</i>
<i>1.2.3. Третья из упоминаемых выше проблем – создание динамических голографических дисплеев.....</i>	<i>50</i>
<i>1.2.4. Обсуждение.....</i>	<i>61</i>
<i>Выводы параграфа 1.2.....</i>	<i>63</i>
Параграф 1.3. Голографические дисплеи.....	64
<i>1.3.1. Обзор существующих подходов к реализации голографических 3D дисплеев.....</i>	<i>65</i>
<i>1.3.2. Хогель-кодирование и дисплеи светового поля.....</i>	<i>67</i>
<i>1.3.3. Многоканальные голографические системы.....</i>	<i>76</i>
<i>1.3.4. Новые направления исследований.....</i>	<i>80</i>
<i>Выводы параграфа 1.3.....</i>	<i>82</i>

Обсуждение основных результатов главы 1 .....	87
Выводы главы 1 .....	90
<b>ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ 3D ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО КАНАЛАМ СВЯЗИ БЕЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕСУЩЕЙ</b> .....	<b>93</b>
Параграф 2.1. Способ дистанционного формирования голографической записи .	94
<i>2.1.1. Способы создания карты глубин</i> .....	<i>95</i>
<i>2.1.2. Способ записи и передачи по каналу связи</i> .....	<i>96</i>
<i>Обсуждение</i> .....	<i>105</i>
Выводы параграфа 2.1 .....	107
Параграф 2.2. Спектральный состав голограммы и голографического изображения .....	107
<i>2.2.1. Фотоотклик голограммы</i> .....	<i>109</i>
<i>2.2.2. Структура голограммы</i> .....	<i>113</i>
<i>2.2.3. Численное моделирование, спектры объекта и голограммы</i> .....	<i>119</i>
<i>Выводы параграфа 2.2</i> .....	<i>126</i>
Параграф 2.3. Разделение несущей частоты и частот девиации .....	127
<i>2.3.1. Условия формирования голограммы с необходимым параллаксом восстановленного изображения и причина допустимого сжатия голографической информации</i> .....	<i>131</i>
<i>2.3.2. Запись голограммы и область наблюдения параллакса</i> .....	<i>134</i>
<i>2.3.3. Пространственный спектр голограммы</i> .....	<i>138</i>
<i>Выводы параграфа 2.3</i> .....	<i>141</i>
Параграф 2.4. Сравнение передачи на боковой полосе и передачи со спектральным сжатием, содержащим элементы JPEG .....	142
<i>2.4.1. Энтропия источника</i> .....	<i>143</i>
<i>2.4.2. Численный эксперимент сравнения разрешающей способности</i> .....	<i>144</i>
<i>2.4.3. Сравнение передачи сжатыми фурье-образами с передачей двумя модальностями</i> .....	<i>150</i>
<i>Выводы параграфа 2.4</i> .....	<i>151</i>
Параграф 2.5. Неустраняемые ошибки, алиасинг и формфактор.....	152
<i>2.5.1. Примеры нарушения условия Котельникова – Найквиста и меры противодействия их следствиям</i> .....	<i>159</i>
<i>2.5.2. Методы борьбы с артефактами, возникающими при больших градиентах перепадов высот 3D объектов</i> .....	<i>163</i>
<i>Выводы параграфа 2.5</i> .....	<i>169</i>
Выводы главы 2 .....	170

ГЛАВА 3. ОГРАНИЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЁМКОСТИ ГОЛОГРАММ ФАКТОРОМ ФОРМЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО СВОЙСТВ .....	173
Параграф 3.1. Формфактор гауссовых пучков и оптимальные информационные характеристики голограммы .....	178
<i>3.1.1. Вычисление влияния двух нелинейных эффектов .....</i>	<i>189</i>
<i>3.1.2. Сложные пучки и энтропия .....</i>	<i>205</i>
<i>Выводы параграфа 3.1 .....</i>	<i>208</i>
Параграф 3.2. Формфактор голограмм сложных изображений .....	209
<i>3.2.1. Статистика сложных изображений.....</i>	<i>211</i>
<i>3.2.2. Повторяемость полученных результатов .....</i>	<i>217</i>
<i>Выводы параграфа 3.2 .....</i>	<i>219</i>
Параграф 3.3. Формфактор голограмм сфокусированных изображений и голограмм Фурье и Френеля .....	220
<i>3.3.1. Численный эксперимент .....</i>	<i>222</i>
<i>Выводы параграфа 3.3 .....</i>	<i>227</i>
Параграф 3.4. Проявление формфактора при нелинейности фотоотклика голографического материала .....	228
<i>3.4.1. Численный эксперимент .....</i>	<i>230</i>
<i>Выводы параграфа 3.4 .....</i>	<i>233</i>
Параграф 3.5. Формфактор и временная когерентность лазерного излучения ....	234
<i>3.5.1. Численный эксперимент .....</i>	<i>237</i>
<i>Выводы параграфа 3.5 .....</i>	<i>243</i>
Параграф 3.6. Формфактор голограмм в режиме дифракции Рамана – Ната.....	245
<i>3.6.1. Моделирование формирования гауссовой решётки и дифракции света</i>	<i>247</i>
<i>3.6.2. Экспериментальная проверка результатов. Голографическая запись и восстановление гауссовых решёток.....</i>	<i>253</i>
<i>Выводы параграфа 3.6 .....</i>	<i>259</i>
Выводы главы 3 .....	261
ГЛАВА 4. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ ДЛЯ УДАЛЁННОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЁМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ .....	263
Параграф 4.1. Основные вопросы синтеза голограмм по карте поверхности (маске) и текстуре объекта голографирования .....	263
<i>4.1.1. Голограмма и паттерны структурированного света.....</i>	<i>271</i>
<i>4.1.2. Восстановление изображений .....</i>	<i>276</i>
<i>Выводы параграфа 4.1 .....</i>	<i>285</i>

Параграф 4.2. Синтез радужной голограммы Стефана Бентона из маски и текстуры голографируемого объекта .....	286
<i>4.2.1. Экспериментальная запись голограмм.....</i>	<i>293</i>
<i>4.2.2. Восстановление 3D изображения голограммой.....</i>	<i>300</i>
<i>Выводы параграфа 4.2 .....</i>	<i>303</i>
Параграф 4.3. Синтез голограммы 3D объекта с непрерывным параллаксом.....	303
<i>4.3.1. Запись голограмм и исследование их структуры.....</i>	<i>306</i>
<i>4.3.2. Измерения характеристик голограмм, записанных по технологии «Dot Matrix».....</i>	<i>310</i>
<i>4.3.3. Измерения характеристик восстановленных голограммами изображений.....</i>	<i>314</i>
<i>Выводы параграфа 4.3 .....</i>	<i>318</i>
Параграф 4.4. Передача 3D голографической информации по радиоканалу .....	319
<i>4.4.1. Техника эксперимента.....</i>	<i>321</i>
<i>4.4.2. Результаты эксперимента.....</i>	<i>323</i>
<i>4.4.3. Передача текстуры и паттерна структурированного света.....</i>	<i>334</i>
<i>Выводы параграфа 4.4 .....</i>	<i>337</i>
Выводы главы 4 .....	338
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	340
Рекомендации и перспективы дальнейшей разработки темы .....	343
СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ .....	345
Литература главы 1 .....	345
Литература главы 2 .....	366
Литература главы 3 .....	370
Литература главы 4 .....	374
ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ.....	379
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ДИССЕРТАЦИИ .....	383
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	386
Приложение А. Патент РФ № 2707582. Способ дистанционного формирования голографической записи / Шойдин С. А., Опубл. 28.11.2019 .....	386
Приложение Б. Патент РФ № 2734093. Способ экспресс-анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала / Шойдин С. А., Мешалкин А. Ю., Опубл. 12.10.2020 .....	389
Приложение В. АКТ О практическом применении полученных результатов диссертационного исследования в Ministry of Education and Research of Republic of Moldova, Institute of Applied Physics № 11-310 от 30.12.2022.....	393

Приложение Г. АКТ О практическом применении полученных результатов диссертационного исследования в Акционерном обществе «Новосибирский приборостроительный завод» .....	394
Приложение Д. Изображения не из «Зловещей долины» .....	395

## ВВЕДЕНИЕ

### 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. Интерес растёт с развитием голографии и голографических технологий, что видно, например, из работ по развитию ГОСТов по голографии.

Так, согласно скромной формулировке ГОСТ 24865.1-81 [1.1], в голограмме *записывается информация* об объекте, заключённая в физически реализуемом или математически описываемом голографическом поле. Видно, что понятие информации здесь упомянуто как-то вскользь. Основное внимание в то время было направлено на физические характеристики голограммы, действительно вызвавшие взрывной интерес со стороны исследователей во многих областях науки и техники. Сегодня, когда изучение физических свойств голограмм достигло большого размаха, активизировалась работа по поиску голографических методов преобразования оптической информации и изучению информационных характеристик голограмм. Потребность шире ввести их в научно-технический оборот отражается даже в документах. Так, например, в недавно вышедшем новом ГОСТ Р 59321.1-2021 [1.2], ГОСТ Р 59321.2-2021 [1.3], ГОСТ Р 59321.3-2021 [1.4] говорится, что голография это «раздел науки и техники, *изучающий процессы регистрации, обработки и воспроизведения информации*, содержащейся в параметрах физически реализуемых или математически описываемых волн, с использованием явлений интерференции и дифракции оптических опорной и объектной волн, а также возможности практического применения этих процессов» [1.2, с. 2]. Такая формулировка сама по себе уже указывает на актуальность всех задач, связанных с методами преобразования оптической

информации, поскольку прогресс в науке и технике инициирует актуальные изменения и совершенствование в отраслевых ГОСТах, в которых с необходимостью отражаются последние тенденции соответствующих областей знаний.

Уже начиная с первых работ по голографии исследователи обращали внимание на большую информационную ёмкость голограмм при сравнительной простоте их создания и при использовании доступного на сегодняшний день оборудования. Совсем непонятно на этом фоне, почему ещё так и не было реализовано голографическое TV и 3D дополненная реальность, несмотря на множество непрофессиональных и ошибочных публикаций о, якобы, создании голографического TV в средствах массовой информации.

Действительно, реальная информационная ёмкость голограмм настолько высока, что задачи создания голографического телевидения разбиваются о проблему передачи голографической информации по известным каналам связи [1.5, 1.6]. 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 изучение голографических методов преобразования оптической информации и задач регистрации и передачи полноценной 3D голографической информации, чему посвящена настоящая работа, является актуальным и, безусловно, найдёт применение в различных областях приборостроения, начиная от решения задач 3D TV и 3D дополненной реальности в спецтехнике и заканчивая решением задач, например, в телемедицине.

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» [1.5, с. 155], «разработке методов устранения избыточности информации, т. е. к исключению из голографического изображения той информации, которая не используется при зрительном восприятии» [1.5, с. 157], 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. По мнению Юрия Николаевича, «основную роль в сокращении избыточности будет играть, по-видимому, компьютер» [1.5, с. 157]. В настоящей работе подтверждены предположения Ю. Н. Денисюка об актуальности изучения голографических методов преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений.

Неразрешимость классической постановки задач передачи голографической информации по стандартным радиоканалам связи звучит практически во всех современных научных обзорах [1.7].

Развёрнутый анализ современной разработанности темы представлен в главе 1 диссертации. На основе этого анализа с учётом актуальности определены цели и задачи диссертационного исследования.

### **Цель и задачи диссертационной работы**

Целью настоящей 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

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

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 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**

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 фотооткликом, 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 голограмму 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 комплексировать 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 aberrаций 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 (Full HD) пространственным разрешением и непрерывным вертикальным и горизонтальным параллаксом, по этой информации были записаны аналоговые (материальные) голограммы и измерен их параллакс.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Теоретическая 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 высокое пространственное разрешение и непрерывный горизонтальный и вертикальный параллакс восстановленного видеоряда 3D

голографического видео. Практическая значимость этого результата подтверждается действующим патентом RU2707582C1.

Предложена методика сокращения рендеринга голограмм сфокусированных изображений за счёт отказа от синтеза цифровых голограмм на передающем конце канала связи с последующим энтропийным кодированием, а на приёмном – за счёт замены синтеза модели дифракционной структуры цифровых голограмм на дифракционную структуру, созданную на основе паттерна структурированного света, сформированного латеральным освещением 3D объекта голографирования с последующим медианным мультиплицированием структуры полос полученного паттерна и синтезом математической модели дифракционной структуры на его основе без интегральных преобразований.

Разработанная методика 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 при проведении работ в агрессивной среде, под водой и в космосе. Эта методика 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 она используется в приборостроении (Акт АО «Новосибирский приборостроительный завод» о практическом применении полученных результатов) (приложение Г).

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 дифракционной эффективности 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 дифракционной эффективности 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 предельной 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 (приложение В – Акт о практическом применении полученных результатов Ministry of Education and Research of Republic of Moldova, Institute of Applied Physics) и действующим патентом RU2734093C1 (приложение Б).

### **Методология и методы исследования**

Методология настоящего исследования основывается 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.

Информационные особенности голограмм при передаче 3D голографической информации по радиоканалу связи анализировались в рамках классической теории К. Шеннона и было доказано, что в такой передаче скорость передачи голографической информации можно значительно увеличить, передавая только информацию о девиации несущих частот, а не их собственные значения.

Для анализа пространственных гармоник светового поля используется двумерное преобразование Фурье. В тех случаях, когда невозможно в полной

мере представить указанные выше интегральные преобразования в аналитическом виде, выделяются отдельные их признаки, как например, пространственный спектр голограмм, хотя он имеет значительно более сложную структуру, чем в радиотехнике, однако полученные таким образом результаты вполне достаточны для качественного понимания информационного содержания пространственных частот голограммы. В тех же случаях, когда необходимы точные расчёты, используются математические методы, в основе которых лежит метод быстрого преобразования Фурье (FFT) и основанные на нём различные методы преобразования Френеля, которые тоже называются быстрыми (D-FFT). При этом объём 3D изображений как в преобразованиях FFT, так и в D-FFT в силу особенностей FFT может быть представлен только как послойная нарезка по глубине (slicing), что ставит задачу поиска иных методов вычисления преобразований Френеля.

Предложенный в работе метод искусственного сжатия глубины записываемого голограммой пространства до размеров меньше длины волны и последующего восстановления глубины без внесения значимых ошибок основан на представлении чисел в формате с плавающей запятой. Формат даёт излишнюю избыточность точности представления сигнала при описании смещений фазы, что позволяет достаточно точно представлять изменения фазы внутри диапазона с глубиной меньше длины волны и обходиться без операций слайсинга и развёртки фазы.

В некоторых случаях в работе применялся оригинальный метод вычисления преобразований Френеля, основанный на использовании имеющихся симметрий ядра преобразования.

Для представления обрабатываемых 3D изображений в численном виде, их спектров и других преобразований в работе была выбрана среда MATLAB, основанная на матричном представлении переменных, что хорошо подходит для работы с 2D объектами и в нашем представлении 3D объекта как суммы двух 2D объектов также. На основе MATLAB были проделаны все численные модельные

расчёты. Значительная их часть, в ключевых этапах исследований, была подтверждена прямыми физическими экспериментами.

Так, в экспериментах по передаче 3D голографического видеопотока по радиоканалу связи была доказана возможность использования для этой цели радиоканала Wi-Fi с полосой пропускания 40 МГц.

В экспериментах по синтезу аналоговых голограмм по принятой на приёмном конце канала информации, получены материальные голограммы, восстанавливающие в видимом диапазоне спектра 3D изображения объекта с непрерывным параллаксом.

В целом методология и методы исследования позволили получить достоверные, полные результаты при решении поставленных в работе задач.

### **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. 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 восстанавливаемого голограммами изображения.

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 записывающего 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.

### **Степень достоверности и апробация результатов**

Все полученные в диссертации результаты согласуются между собой и не противоречат известным научным положениям, экспериментальным и теоретическим результатам других работ, имеют ясную физическую трактовку и

подтверждаются серией численных и физических экспериментов. Достоверность и обоснованность полученных результатов также определяется правильно выбранным предметом изучения (голографические методы преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений), который исследуется в рамках используемого скалярного приближения теории дифракции, с применением основных понятий и формул теории информации и методов спектрального анализа, а также корректностью численных расчётов и физических экспериментов.

Применённые в работе численные методы позволяли расширять экспериментальную базу с их помощью при использовании проверенной среды MATLAB.

Полученные в работе результаты были проверены в ряде физических экспериментов по восстановлению 3D изображений синтезированными на приёмном конце канала связи голограммами. В соответствии с предложенным в патенте автора RU2707582C1 методом поставлены эксперименты по передаче 3D голографической информации по радиоканалу Wi-Fi (40 МГц), в результате которых измерена скорость передачи 3D видеопотока для разных стандартов видеокadra и подтверждена справедливость проведённых ранее расчётов. Эксперименты показали, что передача предложенным методом 3D голографической видеоинформации позволяет создавать на приёмном конце канала связи голограммы, восстанавливающие 3D изображения с непрерывным параллаксом и с пространственным разрешением не хуже требований TV стандарта Full HD, глубиной изображения в 256 градаций и частотой кадровой развёртки 25 Гц и 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 «НолоЕхро»** (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 университет, 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 г.).

**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.

**Патенты.** По результатам диссертации получены два патента.

1. Шойдин С. А.; Способ дистанционного формирования голографической записи. Патент RU2707582C1, Российская Федерация, МПК G03H 1/00; заявл. 03.07.2018; опубл. 28.11.2019. Бюл. № 34 (приложение А).

2. Шойдин С. А., Мешалкин А. Ю.; Способ экспресс анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала. Патент RU2734093C1, Российская Федерация, МПК G03H 1/00, G01M 11/00; заявл. 07.04.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29 (приложение Б).

**Акты** о практическом применении полученных результатов от Ministry of Education and Research of Republic of Moldova, Institute of Applied Physics и от Акционерного общества «Новосибирский приборостроительный завод».

**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.

### **Объём и структура 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.

## **ГЛАВА 1. ИЗУЧЕННОСТЬ ПРОБЛЕМ ПРЕДЕЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЁМКОСТИ ГОЛОГРАММ И ДИНАМИЧЕСКОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Проблемы преобразования оптической информации изначально были в центре исследований в области голографии. При этом методы преобразований цифровой информации в голографическую и обратно рассматривались, в первую очередь, в работах по созданию голографических запоминающих устройств (ГЗУ). Позднее появились работы в области синтеза компьютерных голограмм. В настоящий момент особую актуальность приобрела *проблема удалённого воспроизведения голографических объёмных динамических изображений*, которая органично включила в себя обе вышеуказанные. На момент начала работы над диссертацией она была далека от разрешения.

Первая глава посвящена выявлению основных проблем и противоречий, стоящих на пути исследователей, разрабатывающих методы передачи и обработки голографической информации по известным каналам связи. В ней изложена логика появления подходов и методов решения задачи синтеза с TV частотой голографического видеопотока, восстанавливающего удалённый динамически меняющийся во времени 3D живой объект. Показана, образно говоря, «лаборатория исследований», помогающая на основе существующих публикаций сформулировать цели, задачи и методы решения этой научной проблемы и показать место, которое в ней занимают наши разработки.

### **Параграф 1.1. Информационная ёмкость голограмм**

О больших объёмах информации в голограммах говорится буквально с первых работ Ю. Н. Денисюка [1.8, 1.9] и Э. Лейта с Ю. Упатниекса [1.10, 1.11]. В них было отмечено, что голограмма несёт в себе всю основную информацию об

объекте, поскольку регистрирует не только амплитуду, но и фазу волнового фронта, т. е. информацию об объёме регистрируемого на голограмме 3D объекта.

Практически сразу после появления этих работ стали активно разрабатываться голографические запоминающие устройства (ГЗУ) в качестве памяти для ЭВМ. Первые оптические схемы ГЗУ были предложены в работах [1.12, 1.13]. Исследователи стали обращать внимание на пути использования такого большого количества зарегистрированной и хранящейся в голограмме информации. Это связано с тем, что голограмма регистрирует практически всю информацию о волновом фронте, формируемом при рассеянии монохроматического излучения на отображаемом в голограмме объекте. Восстановленное голограммой изображение имеет поперечное разрешение  $h$  как и в обычной оптической системе переноса изображения, определяемое так называемым критерием Рэлея [1.14], равное диаметру пятна Эйри (1.1):

$$\sigma \sim \frac{\lambda}{D/f}, \quad (1.1)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения,  $D$  – поперечный размер голограммы,  $f$  – расстояние от голограммы до точки восстановленного изображения. В силу высокого разрешения количество информации  $N$ , которое может быть записано на такую голограмму, согласно [1.12, 1.13], по порядку величины может быть оценено как (1.2):

$$N = S / h^2 \approx \varpi^2 (D/\lambda)^2 = S (\varpi/\lambda)^2 = S \cdot W_x \cdot W_y. \quad (1.2)$$

Здесь  $\varpi = D/f$  – относительное отверстие отображающей системы, в нашем случае голограммы, а  $S$  – её площадь. Отношение  $(\varpi/\lambda)^2$  – максимально возможная плотность записи бинарной информации на плоском голографическом носителе, имеет смысл квадрата максимальной пространственной частоты, присутствующей в голограмме, точнее – произведения максимальных значений пространственных частот по ортогональным осям ( $W_x$ ,  $W_y$ ). Следовательно, при

$\varpi = 1$ , что характерно для хороших оптических отображающих систем, плотность записи информации ( $n = N/S$ ) в голограмме соответствует примерно одному биту на площади, равной  $\lambda^2$ . Соответственно, пространственные частоты будут тоже сравнимы с  $1/\lambda$ .

$$n = 1/h^2 = (\varpi/\lambda)^2 = W_x \cdot W_y \quad (1.3)$$

Такие голограммы в видимом диапазоне длин волн состоят из интерференционных полос с пространственными частотам примерно 2–3 лин/мкм. Более подробно это будет обсуждаться в главе 2.

Дальнейшие практические разработки [1.15–1.34] вносили существенные коррективы, связанные, с одной стороны с определением ограничений на плотность записи информации в модели записи в ГЗУ матриц бинарных изображений, а с другой – с поиском путей увеличения плотности записи.

На практике всегда приходится учитывать несовершенство схем записи голографической информации. Например, нельзя абсолютно устранить aberrации записывающей оптики [1.27, 1.28], которые увеличивают эффективный размер голограмм Фурье и сложным образом, как функцию от соотношения дифракционного размытия и aberrационного  $F\{\delta_1\delta_2/\lambda f\} < 1$ , снижают плотность записи  $n$  (бит/см<sup>2</sup>) [1.29], эффективно снижая диапазон записываемых пространственных частот. Здесь  $\delta_1, \delta_2$  – лучевые aberrации записывающей и восстанавливающей оптических систем.

$$n = \left(\frac{\varpi}{\lambda}\right)^2 \cdot F\left\{\frac{\pi\delta_1\delta_2}{\lambda f}\right\} \quad (1.4)$$

Также снижает плотность записи и ряд других физических эффектов, к которым следует отнести различные виды шумов, о которых будет подробнее сказано в главе 2.

Для случая записи матриц бинарных точек на тонкий голографический материал, приближённо оценивать достижимую ёмкость записи информации « $N$ »

в голограммах можно по (1.2), взяв за основу [1.12–1.33], однако, если выйти из этого, довольно узкого, приближения, в более сложных, например, в изобразительных голограммах, следует учитывать ещё и градацию яркости точек.

Для более точного определения количества информации в голограмме с учётом количества градаций серого в каждом из монохромных слоёв изображения (глубины цвета) следует пользоваться формулой Шеннона для оценки максимально возможного количества информации в канале с шумами [1.35, 1.36].

$$N = W \cdot T \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_c}{P_{ш}} \right) \quad (1.5)$$

Здесь  $W$  по Шеннону – максимальная частота, присутствующая в передаваемом сигнале,  $T$  – его продолжительность, а  $P_c/P_{ш}$  – отношение мощности полезного сигнала к мощности шума. В голографии временные частоты заменяются на пространственные, двумерные для плоских голограмм, записанных на тонких средах и трёхмерные для объёмных сред, а временная развёртка сигнала  $T$  на пространственную развёртку изображения. Для плоских, двумерных, голограмм максимальная пространственная частота  $W$  в кадре равна произведению максимальной строчной частоты расположения пятен Эйри (1.1) на частоту строк, а отношение  $P_c/P_{ш}$  равно отношению соответствующих интенсивностей  $I_c/I_{ш}$  [1.36, 1.37]. Здесь  $I_c$  определяется дифракционной эффективностью голограммы, определяемой созданной на ней дифракционной решёткой, а  $I_{ш}$  – шумами. Количество и природа шумов голограмм, влияющих на характеристики голографических устройств анализируются многими авторами. Так, в [1.38] анализируются ограничения, вызванные шумами в ГЗУ. В [1.39] исследуется природа шумов на примере широко распространённой голографической среды «Бихромат желатины», а в [1.40] – влияние перекрёстных шумов, появляющихся из-за aberrаций используемой оптики. Хотя природа этих оптических шумов различна, все они объединяются линейной зависимостью величины шума от интенсивности восстанавливающего пучка. Даже нелинейные шумы, появляющиеся при записи голограмм, приводящие к появлению

дополнительных дифракционных решёток на голограмме, при восстановлении ею записанного изображения, линейны по отношению к интенсивности восстанавливающей волны. Поэтому все собственные шумы голограммы можно объединить в один интегральный шум с интенсивностью  $I_{ш}$ , который определяется через один интегральный коэффициент  $\eta_{ш}$ . И отношение  $I_c/I_{ш}$  для этого (линейного) случая можно заменить на  $\eta_c/\eta_{ш}$ , где  $\eta_c$  – дифракционная эффективность полезного сигнала, а  $\eta_{ш}$  – дифракционная эффективность рассеяния восстанавливающего пучка на всех решётках голограммы, не относящихся к записи информационного сигнала. С учётом вышесказанного из выражения (1.3) и (1.5) для плотности записи информации на голограмме получаем (1.6) для плотности записи информации на единицу площади.

$$n = W_x \cdot W_y \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{\eta_c}{\eta_{ш}} \right), \quad (1.6)$$

что эквивалентно (1.3), но уже для канала с шумами.

Здесь  $n$  – плотность записи информации на единицу площади тонкой голограммы, эквивалентная в оригинальных работах Шеннона скорости «С» передачи информации во времени, а  $W_x$  и  $W_y$  – пространственные частоты, записанных на голографическом материале голографических дифракционных решёток, соответственно вдоль оси  $x$  и вдоль оси  $y$ , или частоты разрешимых столбцов и строк на голограмме, в пределе стремящиеся к  $1/h$  (1.1). Они эквивалентны временной полосе частот в сигнале, разворачивающемся во времени. В случае трёхмерной, объёмной среды [1.5, 1.32, 1.39] выражение (1.6) будет домножаться ещё на пространственные частоты  $W_z$  вдоль третьей координаты  $z$ , если оставлять в стороне вопрос о способах записи и извлечения этой информации из объёмной голографической среды. На основании полученных формул можно провести количественные оценки информации, содержащейся в изобразительных голограммах.

### 1.1.1. Оценки количества информации

Приведём некоторые оценки количества информации, содержащейся в изобразительных голограммах реальных портретов человека, размером  $S=A4$  ( $210 \times 297$  мм<sup>2</sup>), что соответствует телевизионному экрану с диагональю 14 дюймов. Оценки плотности записи будем делать по (1.6) в приближении слабо меняющихся частот по глубине голограммы  $z$ . При  $\lambda=0,63$  мкм количество точек на один квадратный миллиметр достигает  $n'=2,5 \cdot 10^6$ , а на всю голограмму размера А4, что при бинарной записи соответствует такому же количеству информации, измеренному в битах,  $n = Sn' = 1.6 \cdot 10^{11}$ . Это примерно  $n=2 \cdot 10^{10}$  байт или ~20 ГБ и эквивалентно информации, содержащейся в часовом кинофильме стандарта Full HD. Однако реально каждая из этих точек несёт в себе разные значения яркости (полутоновые изображения), чей вклад, согласно формуле Шеннона [1.35, 1.36], может быть оценён из (1.6). Для случая голограмм сфокусированных изображений это очевидно, а для голограмм, записываемых в дальней зоне дифракции, будем придерживаться модели, когда окклюзия отсутствует и количество информации в восстановленной волне остаётся, при её распространении, прежним.

При  $P_S/P_N \gg 1$  аргумент логарифма в выражении (1.6) имеет смысл количества различимых состояний ( $m$ ) восстановленного голограммой сигнала в каждой точке изображения (или голограммы), аналогично формулам Найквиста и Хартли [1.41, 1.42]. Сам логарифм, при этом, превращается (1.7) в отношение сигнал/шум, восстановленного голограммой изображения, выраженное в децибелах:

$$\Theta = 10 \cdot \log_2 (m). \quad (1.7)$$

Тогда, основываясь на (1.6) и (1.8) количество информации на голограмме можно оценить по (1.8):

$$N = S \cdot W_x \cdot W_y \cdot \frac{\Theta}{10}. \quad (1.8)$$

Для количества градаций  $m$  – часто именуемых «глубина цвета» равного значению  $m=256$ , что соответствует цифровому стандарту TrueColor, величина  $\Theta$  будет достигать 80 дБ. Таким образом, увеличение числа градаций яркости в голограмме не приводит к значительному увеличению количества записанной в ней информации, но всё же может увеличивать общую информационную ёмкость почти на порядок, до  $N=160$  ГБ, или  $1,7 \cdot 10^{11}$  байт.

Передача таких массивов с частотой кадровой развёртки 25 Гц требует пропускной способности канала по Шеннону [1.36]  $C \approx 4 \cdot 10^{12}$  байт/сек.

$$W = \frac{C}{\log_2(256)} \quad (1.9)$$

Ширина полосы пропускания монохромного голографического изображения при этом составляет около 500 ГГц, что с лихвой перекрывает весь доступный человечеству сегодня радиодиапазон. Таким образом, проблема сжатия голографической информации является чрезвычайно актуальной.

### ***1.1.2. Проблемы сжатия голографической информации***

Пути сжатия голографической информации могут быть разными. Разделяя их на чисто математические и на физические можно к первым отнести математические методы устранения избыточности, например, методы блочного кодирования, повышающие энтропию передаваемых отсчётов информационного сигнала [1.43], или физические, когда сам исходный сигнал имеет максимально возможную энтропию [1.44, 1.45]. Любые физические эффекты, приводящие к ограничению диапазона изменения параметров, снижают энтропию сигнала, значит, уменьшают информационную пропускную способность канала, элементом которой, в нашем случае, является голограмма. К таким примерам

можно отнести ограничения гауссовых пучков по сравнению с большей свободой изменения интенсивности в пучках, ограниченных функцией  $\text{rect}$ , о чём подробнее пойдёт речь в главе 3, посвящённой анализу взаимовлияния нелинейных эффектов при записи голограмм. Они приводят к снижению дифракционной эффективности, снижению отношения сигнал/шум, и по (1.6), к снижению плотности записи голографической информации.

Прямой путь увеличения отношения сигнал/шум связан с увеличением интенсивности полезного сигнала за счёт увеличения площади голограммы, как это было доказано ранее [1.29]. Однако при этом быстро расходуется пространство голографического носителя, отведённое на регистрацию пространственных гармоник голограммы, что также снижает информационную ёмкость. Аналогичный эффект был замечен при исследовании импульсно-кодовой модуляции, когда ценой за её высокую помехоустойчивость оказалось значительное снижение скорости передачи информации. Так, в работе [1.46] сообщается, что реальное отношение сигнал/шум, в широкополосных системах передачи информации, необходимое для передачи информации без ошибок, увеличивается с ростом используемой ширины полосы, и формула Шеннона для скорости передачи информации, обычно получаемая взятием производной от (1.5), при использовании малошумящей импульсно-кодовой модуляции, принимает необычный вид (1.10).

$$\frac{\partial N}{\partial T} = C = \log_2(W); \quad n = \frac{\partial N}{\partial x_1 \cdot \partial y_1} = \log(W_x \cdot W_y). \quad (1.10)$$

Видно, что предельно допустимые скорости передачи информации, которые ранее были пропорциональны  $W$ , в последнем случае приобретают существенно более слабую, логарифмическую, зависимость от полосы пропускания канала (для голограмм – от максимальной пространственной частоты сигнала). То есть это соответствует замене пространственных частот в (1.5, 1.6) на их логарифм, что эквивалентно уменьшению эффективности использования площади голограммы. Конечно, это крайне нежелательный эффект и его следует избегать. Для этого

необходимо максимально устранять ограничения полезного сигнала, а значит и отношение  $I_c/I_{ш} = \eta_c/\eta_{ш}$ .

Методам уменьшения шумов в голографии посвящена почти каждая работа, связанная с созданием ГЗУ. Здесь и шумы рассеяния голографического материала [1.38, 1.39], и перекрёстные шумы частично или полностью совмещённых голограмм [1.40, 1.47–1.51], и многие другие. В работе (глава 3) мы остановимся на главном – на достижимой величине полезного сигнала, поскольку будем рассматривать не столько голографическую запись и восстановление матриц двоичных сигналов, как в ГЗУ, но, главным образом, 3D изображения реальных объектов.

Также следует учитывать, что при сжатии голографической информации может быть использован чисто математический подход, на основе энтропийного кодирования, однако в массиве 3D изображений очевидно взаимовлияние ближайших точек 3D матрицы, поскольку реальные изображения не могут иметь разрывов первого рода. Это ограничивает энтропию сигнала, и это сложно учитывать для произвольных изображений, да ещё в трёхмерном пространстве. Поэтому следует обратить внимание на альтернативные – физические методы выделения полезной информации из больших 3D голографических массивов, например, как это делается в методе кодирования одномерного радиосигнала на одной боковой полосе (метод SSB).

### ***1.1.3. Влияние величины динамического диапазона***

В силу вышеперечисленных причин нельзя сказать, что на плотность записи голографической информации влияет только полоса зарегистрированных частот. Для правильного определения максимально достижимой плотности записи информации на голограммах, также, как и в радиотехнике, следует учитывать и отношение сигнал/шум, поскольку его низкий уровень влияет на качественное восприятие восстановленного голограммой изображения и даже на его

распознавание. Тем более, что малошумящие широкополосные линии связи [1.46] «оплачивают» высокое качество передачи, «съедая» более широкую полосу частот. Изучению шумов в голографии посвящено так много работ, что их обзор занял бы слишком много места. Только для одного голографического материала из дихромированного желатина, как показано в [1.39], существует более десятка каналов протекания химических реакций, определяющих и сигнал, и шум в восстановленном голограммой изображении. Однако все шумы после проявления представляют собой зафиксированные шумовые дифракционные решётки и при восстановлении изображений их можно считать константой для того или иного голографического материала в конкретных условиях записи. Мы в настоящей работе обратим внимание только на самые значительные физические эффекты, ограничивающие величину восстановленного голограммой сигнала, имманентно присущие голограммам разных типов, что также накладывает ограничения на величину достижимого отношения сигнал/шум, а, значит, и энтропии.

Первое из таких ограничений сигнала было обнаружено сразу после появления отечественного объёмного голографического материала Реоксан [1.52]. На рисунке 1.1 схематично изображено прохождение лучей  $A_1 - A$  и  $A_2 - A$  через голографический материал. Перетяжка условно показана на задней плоскости  $z = L$ . Видно, что оптический путь указанных лучей различается и в них происходит разный набег фаз, который изменяется, увеличиваясь с экспозицией. Это приводит к смещению максимумов интерференционных полос (точка  $A$ ) в процессе записи голограммы и их искривлению, преимущественно в сторону центра голограммы [1.53].

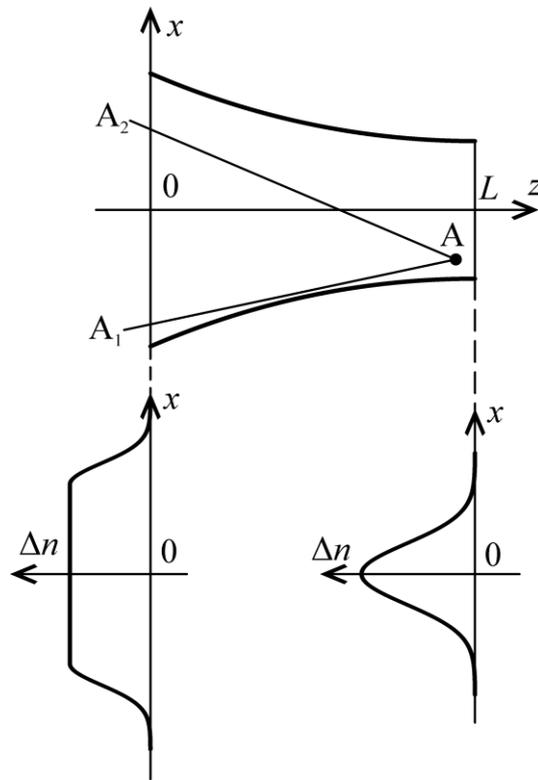


Рисунок 1.1 – Схема прохождения гауссового пучка в объёме голографического материала глубиной  $L$ .  $A_1 - A$  и  $A_2 - A$  пути двух асимметричных лучей.  $\Delta n(x)$  – сечение среднего значения фотоотклика на входе ( $z = 0$ ) и выходе ( $z = L$ ) объёмного голографического материала

Такое искривление интерференционных полос приводит к снижению ДЭ голограммы, ускоренному исчерпанию динамического диапазона фотоотклика голографического материала, к снижению отношения сигнал/шум в восстановленном голограммой сигнале, а также ограничивает информационную ёмкость голограмм. К таким же ограничениям приводят и другие шумы.

На рисунке 1.2 качественно показаны два случая увеличения пространства  $l_1$ , занимаемого голограммой  $l$  при наличии двух видов искажений (шумов). А именно: при нелинейности фотоотклика голографического материала (рисунок 1.2а), влияние которой можно трактовать как появление шумов, проявляющихся в виде новых гармоник в сигнале или при искажении оптического сигнала в матрице фурье-голограмм (рисунок 1.2б), записываемых в оптической системе с лучевыми aberrациями  $\Delta$  [1.29].

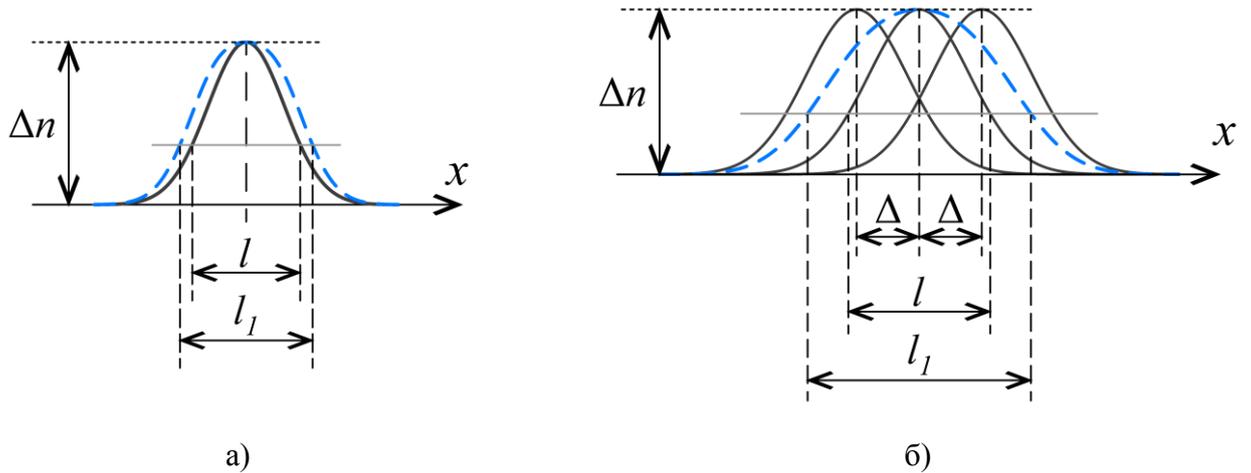


Рисунок 1.2 – Увеличение голограммой пространственного охвата голографической среды  $l_1 > l$  при а) нелинейности фотоотклика материала  $\Delta n(E)$  от экспозиции; б) абберационных искажениях в матрице фурье-голограмм. Пунктиром показаны средние значения величины фотоотклика при каждом из указанных искажений сигнала

Поскольку предельно достижимая плотность записи голографической информации у плоских голограмм ограничена (1.6), дальнейшее уплотнение возможно только при подключении третьей пространственной частоты –  $W_z$  или наложением нескольких голограмм на один участок голографического носителя. Последний случай проще организовать схемотехнически, поэтому он получил наибольшее распространение. В обоих случаях увеличение плотности записи информации осуществляется за счёт использования большего, чем это необходимо для однократной записи голограмм, динамического диапазона фотоотклика голографического материала. Для фазовых пропускающих голограмм это не фотоиндуцированное изменение показателя преломления, а вызванный его изменением локальный рост величины эйконала. Далее, для простоты именно его будем называть фотооткликом, поскольку фазовые голограммы занимают особое место среди голографических материалов, как наименее поглощающие, а объёмные фазовые являются в голографии наиболее ценными, как имеющие наибольшие значения упомянутого выше фотоотклика. Простейшей реализацией наложения голограмм является их прямая запись на одном участке голографического материала [1.50]. Разделять восстановленные изображения можно, выводя соседние голограммы из условий синхронизма при

их записи. Делать это можно двумя способами. Первый – изменять наклон опорного пучка от записи одной голограммы к другой, выводя все ненужные голограммы из условий Брэгга или записывать голограммы сложным опорным пучком с узкой функцией автокорреляции, так, что спекл-структура каждого восстанавливающего пучка будет сильно отличаться от остальных и в то же время повторять спекл-структуру опорного при записи той или иной голограммы, входя в резонанс с записанной спекл-структурой. Требования большого динамического диапазона фотоиндуцированного фотоотклика стимулировали большой интерес к трёхмерным голографическим средам [1.51, 1.54–1.57], теоретически имеющим возможность достигать 100 % дифракционной эффективности. С появлением нового объёмного голографического материала Реоксан [1.52] появились новые теоретические и экспериментальные [1.58–1.62] работы по записи информации в трёхмерных средах. Ввиду поиска простых и надёжных схем голографической записи информации рассматривались не только схемы с наложением за счёт изменения брэгговского условия записи – восстановления, но и за счёт использования кодированного опорного пучка [1.54, 1.60], который может создаваться таким же пространственным модулятором, как и объектный пучок. В этих работах особое внимание уделяется исследованию отношения сигнала к перекрёстному шуму при восстановлении одной голограммы из серии записанных с наложением на одном и том же участке голографического материала. Такой сигнал от посторонних голограмм тоже аддитивно входит в  $\eta_{ш}$  и может проявляться за счёт эффекта многоволнового взаимодействия (эффект Ренингера) [1.63–1.65].

Изучению максимально достижимой дифракционной эффективности объёмных голограмм традиционно уделялось большое внимание. Прежде всего, это пионерные работы, в которых была замечена возможность полной перекачки восстанавливающей волны [1.66, 1.67] в восстановленную, а в [1.62] – использование этого эффекта. Это было подтверждено экспериментально на Бихромированной желатине (БХЖ) [1.68] и было использовано авторами [1.48–1.50, 1.69–1.71] в своих разработках по наложению серии голограмм в одном

участке голографического материала. При этом независимо от способа наложения голограмм, с помощью изменения наклона опорного пучка, выводящего голограмму из условий Брэгга [1.48–1.50, 1.69–1.71] или с помощью кодированного опорного пучка, коррелирующего только со «своей» голограммой [1.54, 1.56, 1.57, 1.60], было замечено [1.50], что достижимая дифракционная эффективность за счёт быстрого исчерпания динамического диапазона фотоотклика падает пропорционально квадрату числа наложений  $v$ :

$$\eta_v = \eta_0 / v^2, \quad (1.11)$$

где  $\eta_0$  – максимально возможная дифракционная эффективность, а  $v$  – число наложенных голограмм.

Это связано с резонансным сложением [1.53] фотооткликов разных голограмм, быстрее исчерпывающих динамический диапазон фотоотклика, чем при их усреднённом сложении.

В [1.72] объясняется этот эффект и проводятся расчёты дифракционной эффективности голограмм со сложной структурой объектного пучка – голограмм спекл-полей, записанных в объёмной голографической среде.

В [1.66], в модели связанных волн, показано, что дифракционная эффективность плоской голографической решётки в объёмном голографическом материале имеет периодический характер, когда восстанавливающая и восстановленная волны взаимно гармонически перетекают друг в друга с ростом экспозиции, а дифракционная эффективность восстановленной объектной волны равна (1.12).

$$\eta_v = \sin^2 \left\{ \frac{\pi}{\lambda \cos \theta} (\Delta n_v \cdot l) \right\}, \quad (1.12)$$

где  $\lambda$  – длина волны записи, а  $\theta$  – угол схождения объектного и опорного пучков,  $l$  – толщина объёмного голографического слоя, а  $\Delta n_v$  – среднее значение вклада фотоиндуцированного показателя преломления  $v$ -ой голограммы. Следует

отметить, что в [1.66] рассмотрен случай плоских равномерных записывающей, опорной и восстанавливающей волн. Ниже, в главе 3, будет показано, что при записи голограммы реальными пучками света, будь то гауссовы пучки, или пучки сложной формы, как например, при записи голографических портретов, максимально достижимая дифракционная эффективность существенно ограничена фактором их формы, что конечно влияет на достижимую плотность записи голографической информации (1.6).

В выражении (1.12) при аргументе под синусом, стремящемся к  $\pi/2$  и далее,  $\eta_v$  с ростом аргумента сначала достигает максимума, а затем снижается и так периодически с ростом эйконала  $\Delta n_v \cdot l$ . Поэтому особое внимание исследователей привлекали разработки голографических материалов как с большой толщиной  $l$ , так и с большим диапазоном фотоотклика [1.73, 1.74]. Однако большие изменения фотоотклика  $\Delta n$  внутри голографического материала, в его объёме, трудно создавать с привлечением дополнительных источников локальной энергии, помогающей фототрансформации голографической среды, т. е. трудно организовать процессы проявления в глубоких средах. Поэтому первые реализации объёмных голографических сред были получены непроявляющимися, а формирующими фотоотклик непосредственно под действием записывающего излучения. Разработчики также стремились создавать среды без поглощения, а только с фотоиндуцированным изменением локальных значений показателя преломления  $\Delta n$ , (фазовые голографические материалы). В таких материалах при записи простых брэгговских [1.66] голографических решёток  $\Delta n$  может превышать необходимые для стопроцентной эффективности ( $\eta_v$ ) одной голограммы. Она будет «переваливать» через горб первого максимума  $\eta_v$ , но при записи нескольких голограмм в одно место голографического материала эффективные значения фотоотклика (аргумент в (1.12)) уменьшаются и записываются решётки с  $\eta_v$ , только ещё достигающие первого горба.

К таким материалам, с большим  $\Delta n \sim 10^{-3}$  и большим  $l \sim 3$  мм относится вышеупомянутый «Реоксан» [1.52]. На него возлагались большие надежды в качестве голографического носителя сверхбольших объёмов голографической

информации. Даже были разработаны под его параметры легко реализуемые простые и устойчивые схемы ГЗУ (рисунок 1.3), в которых кодированный опорный пучок формируется аналогично объектному информационному и осуществляется возможность записывать серию гауссовых голограмм, смещённых по поверхности голографического материала не на величину фурье-голограммы, а на много меньшую величину, равную функции корреляции одного опорного кодированного пучка с другим, соседним [1.60].

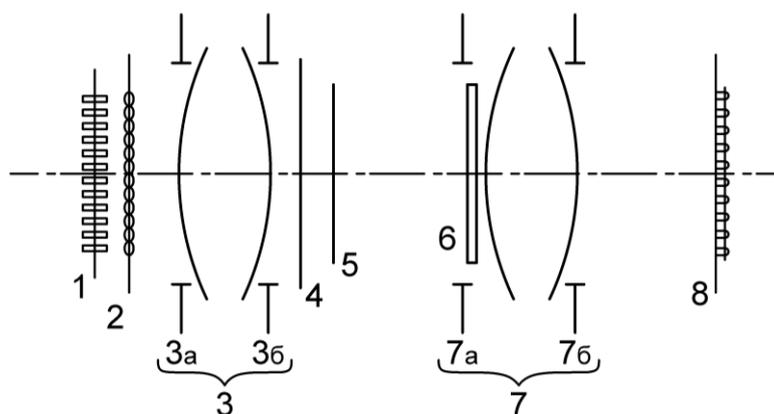


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема ГЗУ без опорного пучка: 1 – матрица полупроводниковых лазеров, 2 – линзовый растр, 3 и 7 – объективы, переносящие изображения из фокальной плоскости матрицы объективов 2 в плоскость голограмм 6 и изображения транспаранта 4 на матрицу фотоприёмников 8, 5 – случайная фазовая маска. Скважность расположения микроголограмм Фурье 2 задаётся шириной пика автокорреляции кодированного опорного пучка, состоящего из части ячеек транспаранта 4 и определяется размерами его ячеек, с учётом лучевых aberrаций объектива 3, и шагом матрицы полупроводниковых лазеров 1 и микролинз 2

Эта схема была реализована как опытный макет ГЗУ. На рисунке 1.4 показан результат восстановления двоичного транспаранта с тестовой строкой пропущенных ячеек, записанного на материале Реоксан с кодированным опорным пучком.

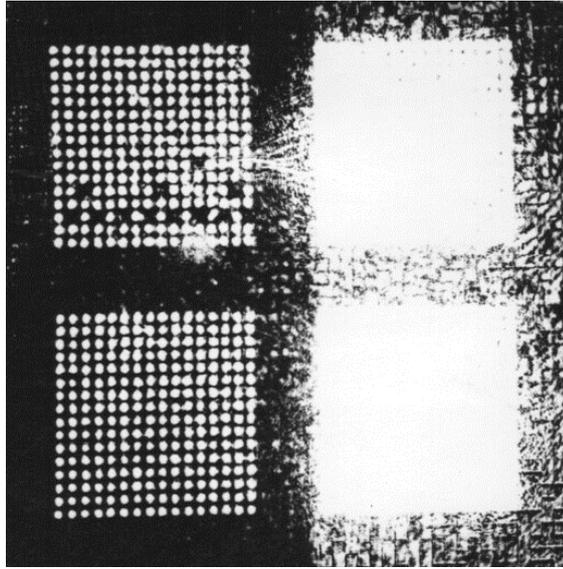


Рисунок 1.4 – Восстановленное кодированным опорным пучком изображение транспаранта.

Две левые субматрицы представляют восстановленное изображение объектного, информационного пучка, две правые – восстанавливающего, повторяющего опорный

При отсутствии ограничивающих факторов фотоиндуцированное изменение эйконала  $\Delta n \cdot l$  в Реоксане может достигать  $3 \cdot 10^{-3}$  мм, что соответствует (1.13), при  $\lambda = 0,6$  мкм и  $\theta = 60^\circ$ , числу перекачек  $\nu = 20$ .

$$\frac{\pi}{\lambda \cos \theta} \cdot \Delta n \cdot l = \nu \cdot \pi / 2 \quad (1.13)$$

Это соответствует  $\nu = 20$  диапазонам фотоотклика, каждый из которых в отдельности достаточен для достижения  $\eta_\nu = 100\%$ . Даже с учётом (1.11) этого хватит на запись более четырёх ( $\nu=4$ ) наложенных голограмм с  $\eta_\nu = 100\%$ , или пяти ( $\nu=5$ ) голограмм с эффективностью около 80%. Это время, время появления первых доступных объёмных голографических материалов и до обнаружения некоторых принципиально неустраняемых эффектов, породило необоснованную эйфорию. Например, в работе [1.58] авторы даже провозгласили гимн объёмным голограммам. Однако вскоре, при попытках реализовать преимущества таких материалов для ГЗУ, были обнаружены две группы эффектов, существенным образом ограничивающие их достоинства. Это динамическое искривление интерференционных полос в объёме голографического материала при записи голограмм в динамической безрелаксационной среде, вместе с наличием

резонансного влияния спекл-поля на быстрое исчерпание фотоотклика [1.53, 1.72]. Другой, замеченный в [1.59], эффект ограничения максимально достижимой дифракционной эффективности, но не объяснённый до последнего времени, обоснован в главе 3 настоящей работы.

Ввиду того, что спекл-поле возникает в объектном пучке в силу ЦПТ, при формировании излучения, рассеянного сложными объектами, как это происходит, например, в портретных голограммах, таким эффектом нельзя пренебречь. При этом формирование фотоотклика идёт в голографической среде не равномерно по объёму, а в областях расположения этих спеклов, оставляя пустые места между ними. Поэтому практически вдвое быстрее в этих областях происходит исчерпание фотоотклика голографического материала [1.53]. И в случае гауссовых пучков и в случае сложных, при записи голограмм в динамической безрелаксационной среде интерференционные полосы смещаются в процессе записи, снижая при этом максимально достижимую дифракционную эффективность голограмм

в радиоэлектронике тоже существуют разные физические эффекты, приводящие к снижению уровня полезного сигнала по сравнению с максимально возможным, а, значит, и к снижению отношения сигнал/шум. Как отмечается в [1.46], в большинстве широкополосных систем, улучшающих отношение сигнал/шум за счёт расширения полосы, скорость передачи информации уменьшается от пропорциональных полосе частот значений (1.6, 1.8) до логарифма от этой полосы частот (1.10). В случае замены временных частот (1.10) на пространственные, выражение для плотности записи информации в голограмме принимает вид (1.14), где  $W_x$ ,  $W_y$  – пространственные частоты вдоль  $x$  и  $y$  соответственно, и  $W_{x,y}$  – их значение в случае равенства  $W_{x,y}=W_x=W_y$ .

$$n \sim \log_2(W_x \cdot W_y) \sim \log_2(W_{x,y}^2) = 2 \cdot \log_2(W_{x,y}) \quad (1.14)$$

Логарифмическая зависимость  $n(\log W)$  сама существенно слабее линейной  $n(W)$ , да ещё из свойства логарифмов видно, что под логарифмом исчезает

квадратичная зависимость от  $W_{x,y}$ . Очевидно, что таких информационных потерь, необходимых для устранения ошибок, следует избегать. Поэтому здесь и в дальнейшем мы не будем останавливаться на методах компенсации возникших голографических шумов, как, в основном, бесперспективных. Также и в компьютерных голограммах в главе 2 мы не будем рассматривать методы компенсации шумов, а только укажем на их источники, полагая, что там, где их можно устранить, их следует устранять, не тратя на сегодняшнем первом этапе значительных усилий на исправление возникающих из-за них ошибок.

#### ***1.1.4. Исправление ошибок***

Тема исправления ошибок при голографическом кодировании в последнее время снова приобретает актуальность. В [1.44] рассмотрен метод помехоустойчивого кодирования, основанный на голографическом представлении цифрового сигнала. Процесс кодирования сообщения был представлен как математическое моделирование голограммы, создаваемой в виртуальном пространстве волной от источника входного сигнала. Кодовым словом была – голограмма точки, она же одномерная зонная линейка, несущая информацию о входном блоке данных в виде  $n$ -разрядного кода координаты центра зон Френеля. В [1.44] было показано, что голографическое представление сигнала обладает существенно большей помехоустойчивостью и позволяет восстановить исходную цифровую комбинацию при потере большей части кодового сообщения и при искажении кодированного сигнала шумом, в несколько раз превосходящим уровень сигнала. Для оценки помехоустойчивости проведено сравнение надёжности передачи информации по каналу с аддитивным белым гауссовским шумом при использовании кода Рида – Соломона, кода Рида – Маллера, мажоритарного кода и голографического кода. В работе было показано, что такое голографическое кодирование обеспечивает исправление пакетных ошибок независимо от длины пакета и его позиции в кодовом слове. Также в [1.44] была

рассмотрена сравнительная эффективность кодов при наличии пакетных ошибок, вызванных эффектом замирания вследствие многолучевого распространения в радиоканалах. При этом было показано, что высокая эффективность достигается также при поступлении на вход декодера смеси случайных и пакетных ошибок.

На основании проведённых исследований авторы [1.44] делают вывод, что предложенный голографический код представляет интерес для передачи информации по каналам с низким отношением сигнал/шум, в том числе в каналах космической связи, в оптических системах связи, использующих свободное пространство в качестве канала передачи, наземной связи, в том числе в мобильной радиосвязи, а также для хранения информации в системах, подверженных воздействию ионизирующего излучения.

Соглашаясь с авторами [1.44], что кодирование информации может иметь не только математическую основу, но и физическую, как это не раз было доказано ранее, например в амплитудном и фазовом кодировании радиосигнала, используем далее этот подход в голографии. Предложенный в [1.44] метод решает задачу кодирования информации с использованием запутывания массива данных интегральными преобразованиями, используемыми в голографии, но не решает задачу её эффективного сжатия ни в десятки, ни в сотни и тем более ни в требуемые тысячи и десятки тысяч раз. Таким образом, понятно, что передача 3D голографической информации в динамическом режиме, при наличии требований высокого пространственного разрешения и одновременно наличия непрерывного параллакса, требует принципиально другого подхода.

### ***Выводы параграфа 1.1***

Голограммы несут в себе огромное количество информации, так, что прямая передача по радиоканалу связи одного голографического 3D видео с пространственным разрешением, аналогичным *TrueColor* и пространственной глубиной 3D изображения в 256 градаций займёт весь доступный человечеству

радиодиапазон, что требует выделения проблемы передачи 3D голографической информации в отдельную задачу. При анализе классического представления голографического сигнала по формуле Шеннона нельзя оставлять в стороне его, казалось бы слабую логарифмическую составляющую, поскольку её влияние в ряде задач кодирования может привести к существенным ограничениям в скорости передачи информации и плотности её расположения на голограмме.

В силу вышеперечисленных причин нельзя сказать, что на плотность записи голографической информации влияет только полоса зарегистрированных частот [1.12, 1.13]. Для правильного определения максимально достижимой плотности записи голограмм, также, как и в радиотехнике, следует учитывать и отношение сигнал/шум, поскольку его низкий уровень влияет на качественное восприятие восстановленного голограммой изображения и даже на его распознавание, а попытки увеличения отношения сигнал/шум за счёт задействования более широкого спектра пространственных частот, неминуемо приведут к снижению плотности записи информации. Тем более, что известно [1.46], что малощумящие широкополосные линии связи обычно «оплачивают» высокое качество передачи, съедая более широкую полосу частот. Также и в голографии, попытки увеличить полезный сигнал, поднимая отношение сигнал/шум, могут приводить к увеличению эффективной площади голограммы, что эквивалентно увеличению используемого диапазона пространственных частот.

Следует внимательно относиться ко всем эффектам, снижающим дифракционную эффективность голограмм и постараться выделить наиболее значимые, принципиально неустраняемые эффекты снижения достижимых значений дифракционной эффективности как у тонких, так и у объёмных голограмм. Именно потому, что они влияют и на отношение сигнал/шум и на достижимую информационную ёмкость. Информационные ограничения для объёмных голограмм тоже представляют интерес, поскольку попытки создания динамических голографических мониторов на основе объёмных голограмм в полимерах, на первых порах выглядящие как экзотические, всё же продолжаются, как это будет показано в четвёртом параграфе этой главы.

Энтропийное кодирование, как и методы разрежающих преобразований, выходят за рамки настоящей работы, однако следует отметить, что альтернативные физические методы кодирования, по аналогии с известными в радиотехнике физическими методами – амплитудным и фазовым кодированием сигнала – в голографии тоже имеют большие перспективы.

Полученные в главе 2 настоящей работы результаты по передаче 3D голографической информации методом, подобным по своей сути, но всё же существенно отличающимся от известного в радиотехнике метода SSB, тоже обеспечивают сжатие голографической информации. Такое сжатие тоже можно считать физическим методом устранения избыточности. При этом в главе 2 настоящей работы будет доказано, что такой метод даёт более высокое разрешение восстановленного на приёмном конце канала связи 3D изображения, чем при передаче голограмм, сжатых прямым спектральным разложением. Поскольку спектральное разложение, как известно, является частью широко распространённого JPEG кодирования 2D изображений, его сравнение с методом SSB является актуальным. В следующей главе будет показано, что предложенный в настоящей работе метод передачи 3D голографической информации позволяет восстанавливать на приёмном конце канала связи 3D изображения с более высоким разрешением, чем метод, использующий спектральное разложение. А в четвёртом параграфе настоящей главы будет видно, что на сегодняшний день многочисленные попытки сжать голографическую информацию чисто математическими методами энтропийного кодирования не смотря на двадцатилетнюю историю развития всё ещё очень далеки от необходимого результата.

Также в настоящей работе мы не рассматриваем методы регистрации волнового фронта методами мультиэкспозиции, известным примером которых является цифровая голография со сдвигом фазы [1.75], где даже чисто теоретически требуется не менее трёх экспозиций, чтобы однозначно восстановить комплексные амплитуды поскольку они уступают предложенному в главе 2 методу как по количеству требуемых кадров, так и потому, что они

обнаруживают значительные трудности при регистрации динамических изменений объектного поля, рассеянного интересующими нас 3D объектами. Реально же, для повышения устойчивости к шуму, вызванному динамическими изменениями объектного поля в рамках голографии со сдвигом фазы, нужно сделать намного больше экспозиций. В [1.76] отмечается, что такие методы не могут легко уловить динамические явления, что ограничивает область их применения и несмотря на значительные успехи таких методов сегодня [1.77, 1.78, 1.79], они пока ещё достаточно сложны для решения телекоммуникационных задач в реальном времени.

### **Параграф 1.2. Информационные особенности голографического формирования динамических изображений**

Первые работы по формированию динамических голографических изображений были проведены в Научно-исследовательском кинофотоинституте (НИКФИ) в 70-е годы XX века [1.80]. Они убедительно доказали возможность создания голографического кино и одновременно высветили ряд проблем на пути к голографическому TV. Гениальная реализация голографического кино для четырёх зрителей была на пределе технических возможностей того времени. Она создала уверенность в принципиальной достижимости поставленной задачи и в то же время – необоснованные надежды на скорую промышленную реализацию как голографического кино, так и голографического TV. Как говорилось выше, основная проблема голографического TV – сверхбольшие объёмы информации, которые создают большие трудности, не позволяющие сегодня реализовать динамические голографические 3D изображения для широкого круга пользователей. Рассмотрим причины этих трудностей и возможные пути развития техники в направлении их преодоления. Другими словами, какие задачи надо решить на пути к голографическому TV и 3D дополненной реальности?

Забегаая вперёд, сформулируем, что основными проблемами, требующими решения при создании 3D голографического TV и систем 3D дополненной реальности на сегодняшний день, являются следующие. Первая – формирование 3D голографического сигнала о реальной сцене окружающего пространства событий в динамике, т. е. с частотой кадровой развёртки не менее, чем сегодняшние телевизионные стандарты. Вторая – сжатие 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 – создание голографических динамических мониторов, способных с TV частотой отображать 3D голографические изображения в пространство наблюдения. Наиболее интересными из них являются мониторы, способные отображать 3D динамические изображения в пространство наблюдателя, т. е. в пространство, где безопасно может находиться наблюдатель и быть участником сюжета, разворачивающегося в этом реальном пространстве. В настоящей диссертации предложен ряд решений, влияющих на развитие первых двух проблем, что подготавливает почву для продвижения в третьей.

### ***1.2.1. Регистрация 3D информации для синтеза голограмм***

Первая проблема, успешно решённая в традиционной, аналоговой голографии и позволившая создать первое голографическое кино, связана с большими успехами в области разработки фотоэмульсий [1.81]. Их разрешающая способность уже в то время достигала десятков тысяч линий на мм. Именно эти огромные информационные возможности голограмм позволили на первом этапе достичь исключительного, практически взрывного, развития голографии, дойдя до первых сеансов голографического кино. Действительно плотность записи в  $10^8$  бит/мм<sup>2</sup> настолько опережает возможности цифровой голографии, в частности, современных фотоматриц и дисплеев разных марок, что в первый

момент пугает сама мысль о возможности создания голографического TV. Однако цель настолько заманчива, что исследования в этой области не прекращаются десятилетия [1.7, 1.80].

Кроме того, синтез голограмм может быть осуществлён только при зондировании объекта голографирования приемлемым для этого излучением. Это должно быть безопасное излучение и в то же время энергетически достаточное для регистрации всех необходимых деталей. Естественное освещение объекта природным солнечным и неспециализированным искусственным для этих целей практически непригодно. В голографии облучение объекта голографирования производится когерентным излучением, позволяющим создавать интерференционную картину со служебным опорным пучком, регистрируя в такой интерференционной картине не только амплитуду, но и фазу рассеянного объектом излучения. Последняя содержит информацию о направлении распространения излучения, рассеянного объектом, по которой и воспроизводится форма объекта и его объёмные характеристики. Кроме прямой голографической технологии регистрации информации об объёме известны ещё три – это ToF технология [1.82–1.84], технология структурированного света [1.85–1.88] и технология облака точек [1.89]. ToF (Time of Flight) технология возникла как развитие лазерных 3D сканеров [1.90, 1.91] и основана на измерении времени задержки отражённого зондируемым объектом излучения. Часто она сочетается с построением виртуальной компьютерной модели 3D облака точек. Очевидны принципиальные границы применимости этого метода. В отличие от голографического [1.8–1.11], он требует сверхвысоких частот работы электронной системы обработки принимаемого, отражённого объектом излучения. И если сам принимаемый сигнал можно фиксировать с высокой точностью, например, лавинными диодами, то его обработка, как правило, связанная с накоплением слабого сдвинутого по фазе излучения, требует серьёзных усилий разработчиков СВЧ радиоаппаратуры. Действительно, если мы хотим измерять глубину с точностью хотя бы до миллиметра (портретные изображения), то при однократном измерении необходимая частота системы обработки отражённого

объектом электромагнитного излучения должна превышать 300 ГГц. Это уже затруднительно, поскольку в инженерной реализации, с учётом сложностей обработки сигнала, эти требования могут возрасти до терагерц, что просто закрывает перспективы развития этого проекта. Длительное накопление сдвига фазы отражённого сигнала немного ослабляет указанные предельные требования, но не решает проблемы окончательно. Кроме того, в ToF технологии необходимо обеспечить поточечное сканирование записываемого 3D объекта по всей его поверхности. Это означает, что либо надо осуществлять параллельное зондирование по всем точкам объекта голографирования с нужным разрешением, либо ещё увеличивать частоту работы электроники, обеспечивая последовательное сканирование пространства с пространственным разрешением хотя бы не хуже, чем в современных телевизионных системах. Очевидно, что для коммерческого успеха разрешающая способность в новых 3D изображениях должна быть не меньше, чем у существующих сегодня 2D системах TV. Для распространённых сегодня Full HD или 4K UHD это несколько миллионов точек (пикселей) на каждый кадр, которые идут с частотой не менее 25 Гц. Всё это указывает на серьёзные ограничения в перспективе развития такого подхода. Применения ToF технологии возможны только для крупных объектов, где точность глубины представления 3D объекта ограничена метрами, а в лучшем случае сантиметрами и дециметрами. Также представленные сегодня образцы карты высот, полученные с помощью ToF технологии, в силу перечисленных причин, обладают и низким пространственным разрешением [1.84].



Рисунок 1.5 – Кадр 3D изображения, полученный ToF камерой с разрешением  $290 \times 257$  пикселей на кадр

На рисунке 1.5 приведено типичное изображение 3D объекта. Видны артефакты, вызванные движением руки при недостаточной скорости формирования кадра. Пространственное разрешение в кадре не превышает  $150 \times 133$  пикселей.

Альтернативной является технология формирования карты поверхности 3D объекта с помощью структурированного света, уже сравнительно давно применяемая в медицине для картографирования структурированным светом поверхности тела больного при выявлении мышечно-функционального (постурального) дисбаланса [1.92, 1.93], рисунок 1.6.

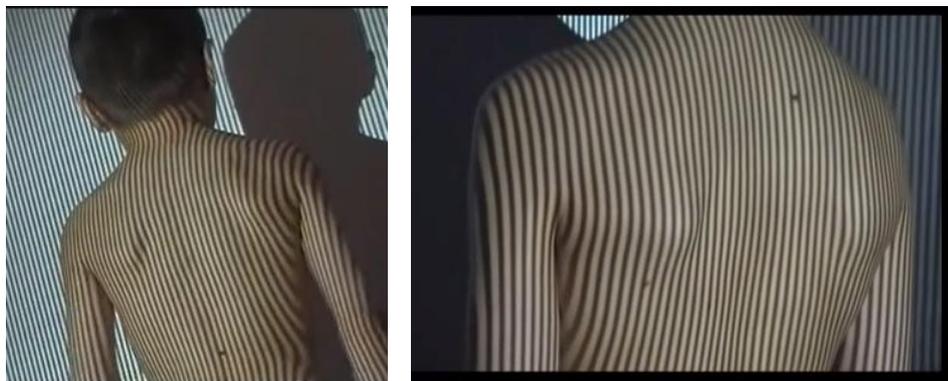


Рисунок 1.6 – Выявление объёмных деформаций тела методом структурированного света

### ***1.2.2. Вторая проблема – передача голографической информации***

При довольно обширной библиографии по проблемам голографического и вообще оптического 3D TV, вопросам передачи 3D голографической информации в обозреваемой литературе уделяется существенно меньше внимания. При этом часто авторы ограничиваются только кратким упоминанием о трудностях передачи больших объёмов голографической информации. Ниже, в главе 2 настоящей работы, описан наш метод передачи 3D голографической информации по обычным каналам связи, защищённый патентом РФ № 2707582 [1.94].

Как было отмечено во многих работах и показано выше (параграф 1.1.1), 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 сигнал займёт весь 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 от кадра к кадру. 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 разрабатываемых проектов [1.95–1.99].

В [1.100, 1.101] прямо говорится о необходимости поиска удобных способов сжатия голографической информации до приемлемых размеров, но не позволяющих воспринимать 3D изображение, как искусственное: «Необходимость регистрации сцены при естественном свете – далеко не единственная трудность, возникающая при создании объёмного кино и телевидения, не менее важно найти способы сокращения избыточности голографической записи» [1.101]. При этом глаз не должен замечать виртуальное происхождение сцены. Образно говоря, имеющаяся в голографическом изображении визуальная информация о строении пор на коже человека, как для

задач голографического кино, так и для задач виртуальной (дополненной) реальности, зачастую избыточна. Необходимо обратить серьёзное внимание на поиск методов сжатия такой голографической информации и устранения ненужной избыточности.

### *1.2.3. Третья из упоминаемых выше проблем – создание динамических голографических дисплеев*

Задача создания голографических 3D мониторов настолько обширно представлена, что её анализу будет посвящён следующий параграф 1.3. Здесь мы только должны упомянуть про основные известные способы представления 3D изображений в виртуальном и реальном пространстве.

Известные способы удалённого формирования 3D изображений стремительно развиваются, но основываются, в основном, на вычислении и захвате узлов и рёбер 3D картины, снимаемой множеством камер [1.102]. Узлы и рёбра передаются на расстояние, например, по радиоканалу, а текстуру между рёбрами передают отдельно, наполняя её соответствующим цветом. Именно этот способ развивают сегодня во множестве компьютерных игр, и он исчерпал себя, т. к. легко видеть, что движущиеся фигурки всё же имеют искусственное происхождение.

Как показано в параграфе 1.1, ширина полосы пропускания радиоканала, при передаче даже монохромной голографической информации в классическом виде составляет около 500 ГГц, и полностью перекрывает весь доступный человечеству эфирный радиодиапазон. Не случайно, как указывалось во введении к настоящей работе, одни из первых разработчиков голографического TV [1.6] пишут: «...в связи с высокой удельной плотностью голографической информации необходимо регистрировать и передавать по каналам связи большое число дискретных элементов голограмм, что превышает по разрешению и скорости обработки реальные возможности существующих TV устройств и стандартных

каналов связи...». Повторим отмеченное одним из основателей голографии, Ю. Н. Денисюком, сложившееся положение в науке [1.5]: «Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта?».

Сложность передачи настолько больших массивов голографической информации отодвинула реализацию полноценного 3D голографического TV и ряда задач 3D дополненной реальности. Исторически на первом месте стояли не требующие большого объёма передаваемой информации системы стереоизображения, которые занимают всего в 2 раза большую полосу частот канала связи, но они были отклонены. Сравнительно недавно, в 2016 году, именитые TV компании Samsung и LG [1.103] отказались от продвижения стерео TV. Одна из причин – неудобство использования очков зрителем. Иногда нашлемные TV стереонасадки также ошибочно называют голографическими мониторами [1.104], они тоже не удобны в использовании. И хотя технология стереоизображений нашла в недавнем прошлом существенный отклик как у потребителей, так и у разработчиков, её реализацию ограничивает необходимость использования дополнительного оборудования, носимого оператором и жёстко совмещённого с его природной зрительной системой.

Изучению такого восприятия объёма человеком был посвящён фундаментальный труд Н. А. Валуся [1.105]. В его основе было рассмотрение хода лучей, воспринимающееся человеком, в рамках геометрической оптики. Такое рассмотрение неминуемо приводило к мысли о необходимости формирования разных световых потоков, воспринимаемых бинокулярным зрением. Анализ изображений получаемой стереопары происходит в человеческом мозге и ограничен параллаксом, который был заложен при съёмке. Разделение каналов для правого и левого глаза формировало разные проекции 3D объекта и производилось разными методами.

Анаглифический метод, в котором разделение левого и правого каналов происходит с помощью цветных светофильтров, сравнительно прост в реализации, однако в цветных телевизионных системах сопровождается

искажением цветопередачи. Развитие этого метода с передачей не двух цветов в каждом канале, а набора из нескольких цветовых диапазонов спектра в правом и нескольких левом канале (технология Infitec) помогает компенсировать цветовые искажения и в большей степени приблизить его к реальности. Своё максимальное развитие эта технология получила в разработках фирмы Dolby 3D Digital Cinema, так называемой «технологии интерферентной фильтрации». Однако сложности, возникающие при создании указанных светофильтров и их синхронизации с ограниченным числом источников и приёмников цвета, как, например в RGB технологии, не позволили этому методу найти широкое распространение.

Технологическое решение затворного разделения правого и левого каналов позволяет сравнительно легче решать проблему цветопередачи, однако требует кратного увеличения, не меньше, чем в 2 раза, частоты передаваемых кадров. Сегодня такие мониторы и проекторы уже реализуются фирмами Samsung, ViewSonic, Acer и др. Слабые места этой технологии заключаются не только в необходимости повышения частоты кадров, но и в ослаблении, не менее чем в два раза, приходящего в глаза оператора светового потока. Также в этом методе появляется специфичный эффект раздвоения изображения быстро движущихся объектов, своего рода «алиасинг», рассмотрению которого мы уделим внимание в главе 4.

Особое место в формировании стереоизображений заняли технологии поляризационного разделения каналов, в которых наиболее успешными оказались технологии IMAX 3D и RealD. В этой технологии за счёт использования огромных экранов (до 22×16 м) и реализации сложной круговой поляризации, правой в одном канале и левой – в другом, сегодня удалось достичь наиболее значимых коммерческих результатов в кинематографе.

Большой интерес всегда вызывали попытки создания 3D отображающих систем, не требующих использования дополнительного оборудования в виде очков и шлемов, поскольку есть области деятельности, в которых такие дополнительные устройства как минимум неудобны, затрудняют функционирование оператора (медицина, военное дело, искусство). А в ряде

специфических ситуаций дополнительное оборудование, механически связанное с оператором и просто недопустимо, как например, в условиях быстрого перехода от работы в одном аппарате (наземном) к работе в другом (подводном).

Среди таких экранов наиболее известны т. н. аутостереоскопические, волнометрические и голографические.

Аутостереоскопические воспроизводят два ракурса объёмной сцены, один из которых предназначен для левого, а другой – для правого глаза. Технически это может выглядеть как фиксация положения оператора так, чтобы в один глаз направлялось одно изображение, а в другой – другое. Для этого могут использоваться матрицы отверстий, расположенные перед матрицей ЖК, т. н. метод параллаксного барьера. Другой, более совершенный метод – это размещение перед матрицей ЖК линзового раstra одномерного, с цилиндрическими линзами, вытянутыми перпендикулярно направлению создаваемого параллакса или двумерного, пригодного для создания параллакса в горизонтальном и в вертикальном направлениях. Работы по созданию таких дисплеев ведутся уже много лет ведущими международными корпорациями, как например, по созданию в 2011 г. безочкового 3D телевизора фирмой Toshiba (модель 55ZL2), телевизионного монитора Samsung серии 9000, некоторых моделей Sony, LG и др.

Другой метод создания 3D экранов получил название «Волнометрический». Волнометрические экраны воспроизводят изображение в виде набора точек (вокселей) или векторов, физически разнесённых в ограниченном рабочем пространстве дисплея (объёме воспроизведения).

Чаще всего это вращающиеся или колеблющиеся поверхности (пластины), на которых находятся точечные элементы, синхронно с вращением излучающие или рассеивающие направляемый на них свет.

Так, компания Actuality Systems использует в модели Perspecta плоский экран, вращающийся вместе с системой зеркал для проецирования изображения размером 768×768 пикселей одновременно. DLP проектор успевает сформировать за время одного оборота (при частоте вращения 24 Гц) 198 плоских изображений

(1 бит на цвет), составляющих «нарезку» (slices) 3D сцены. Таким образом, общее количество формируемых вокселей превышает 100 миллионов, что является пока абсолютным рекордом. Проблемой подготовки информации является необходимость поворота формируемого на экране проектора изображения синхронно с вращением экрана и расчёт «нарезки». Для этого используется DSP процессор производительностью 1600 миллионов инструкций в секунду (MIPS) и 6 ГБ оперативной памяти (DDRAM) (рисунок 1.7).



Рисунок 1.7 – Волюметрический 3D экран компании Actuality Systems в модели Perspecta

Есть методы создания волюметрических экранов ещё экзотичнее, как например, пакет жидкокристаллических прозрачных экранов, или флюоресцирующее стекло, светящееся под действием излучения невидимой области спектра в точках фокусировки возбуждающего свечение излучения, сформированного сложной электрооптической, акустооптической или электромеханической системой.

Все типы волюметрических экранов не допускают погружения в объём сцены, т. к. нарушается материал её рабочего объёма или этот объём наполнен несовместимой с человеком средой, как например, это реализовано у японской компании Aerial Burton [1.106] в системе поточечного лазерного пробоя воздуха (рисунок 1.8).

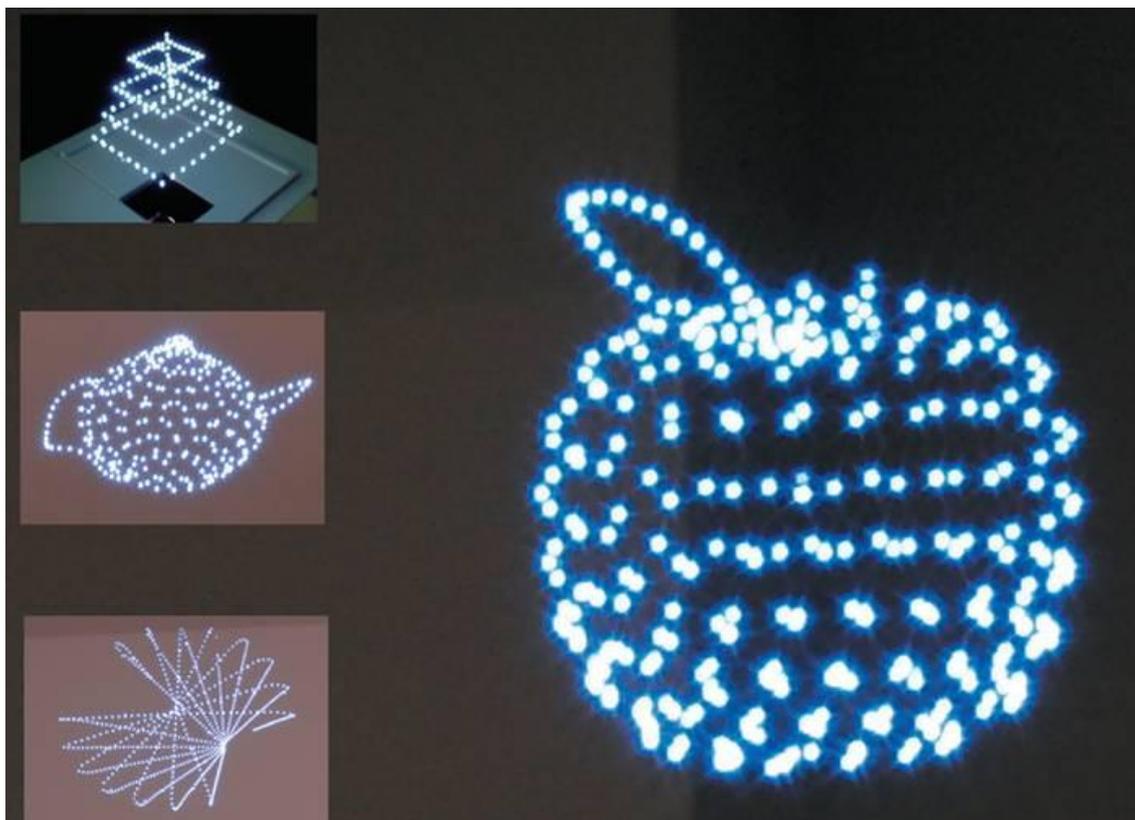


Рисунок 1.8 – Система управляемого по трём пространственным координатам лазерного пробоя воздуха Aerial Burton

К сожалению, кроме крайне низкого разрешения, позволяющего формировать только пунктирные линии, эта система тоже не допускает погружения в объём сцены. Безусловно, наилучшими экранами, воссоздающим 3D объёмные изображения, являются голографические, поскольку воспроизводят непрерывное световое поле, соответствующее световому полю реальной 3D сцены. Только голографическая технология обеспечивает одновременно, без противоречий между ними, все эффекты, которыми пользуется человек при наблюдении и восприятии объёма, в т. ч. аккомодация, вергенция, окклюзия, неламбертовское затенение и непрерывный параллакс, что достигается без использования дополнительного, носимого наблюдателем, например, нащлемного оборудования.

Голографические экраны имеют самые большие перспективы, основывающиеся на эффекте, впервые сформулированном в работах Ю. Н. Денисюка [1.8, 1.9] о том, что дифрагировавшая на голограмме волна полностью повторяет волновой фронт, рассеянный объектом голографирования.

Это подтверждено в большом количестве работ, увенчавшихся успехом в создании уникальных аппаратов голографического кино разработки НИКФИ, под руководством В. Г. Комара [1.107–1.109]. Однако это достижение, отмеченное в 2003 г. престижной кинопремией «Ника» в номинации «За вклад в кинематографические науки», удалось реализовать только в кинематографе, поскольку киноплёнка может иметь разрешение до несколько десятков тысяч линий на миллиметр. Ввиду ограничений пропускной способности радиоканалов, указанных в параграфе 1.1, использованная В. Г. Комаром технология не может быть применена в голографическом TV.

Задача приёма (фиксации) 3D изображений также является актуальной. Известен сравнительно экономный метод регистрации объёма на TV, представленный в технологии Pleno (рисунок 1.9).

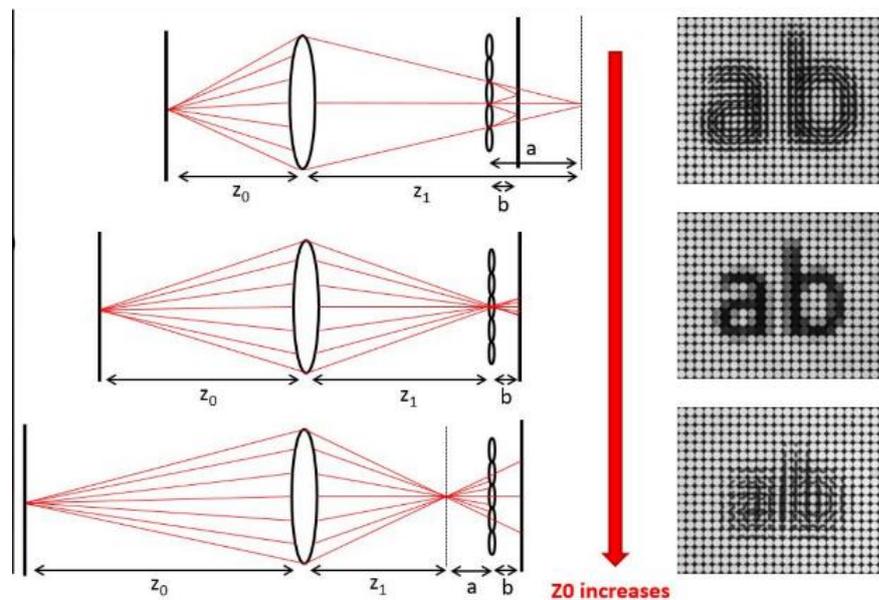


Рисунок 1.9 – Матрица микролинз, объединённых разными способами в подгруппы с разными фокусными расстояниями, создаёт в приёмной плоскости серию изображений на разной глубине

Он развивается группой исследователей Joint Photographic Experts Group (JPEG) [1.104, 1.110], в традиционной форме использования пластин микролинз.

В современных работах этому методу уделяется большое внимание. Технология передачи 3D изображений Pleno основана на идее, близкой к

вольюметрической, только запись фотографической проекции объекта идёт на неподвижную плоскость фотоприёмной матрицы через сеть микролинз, каждая из которых входит в одну из групп себе подобных с одинаковым фокусом [1.111, 1.112]. При этом, каждая группа микролинз имеет свой фокус, что позволяет фиксировать разные глубины изображения объекта. Чаще всего эта технология используется для восстановления резкости, если вдруг во время съёмки не удалось точно выставить фокус объектива, а глубина резкости недостаточна. Попытки реализовать этот метод как метод отображения 3D пространства наталкивается на значительные трудности, поскольку требует либо большого увеличения разрешающей способности приёмной фотоматрицы, либо мультипликации таких матриц. Практически такое увеличение кратно числу планов, регистрируемых по глубине объекта. Современные ограничения на разрешающую способность фотоматриц, порядка десятков тысяч пикселей, позволили фирме Apple реализовать в современных iPhone 13 Pro Max только три плана в изображении. Основным недостатком этой технологии является небольшое поле наблюдения параллакса, при увеличении которого компьютерная система сшивки изображений этих трёх планов даёт сбой, показывая довольно большой чёрный контур вокруг изображения ближних планов при попытке показать параллакс.

Хотя группа JPEG [1.113] уделяет большое внимание этому методу, метод Pano плохо пригоден для представления классического 3D TV сигнала, поскольку не обеспечивает воспроизведения большого объёма изображения. Он хорошо зарекомендовал себя только как метод подстройки фокуса при не резкой фото и видеосъёмке [1.114, 1.115].

Известны ещё две технологии регистрации 3D изображений, которые активно используются в компьютерной графике. Они, в основном, регистрируют не реальные 3D сцены, а виртуальные, заранее синтезированные программным путём. Это полигональная и воксельная графика, родившиеся из идеи облака точек [1.89, 1.116, 1.117]. В первом случае элементарный объект из точек модифицирован в треугольники, сетью которых покрывается неделимая

поверхность 3D объекта [1.89, 1.118, 1.119], (рисунок 1.10а), а во втором – в кубики, массив которых создаёт 3D картину объёмного, динамически меняющегося объекта (рисунок 1.10б) с возможностью его развития, как например, рождение брызг из движущейся и развивающейся волны [1.120–1.123].

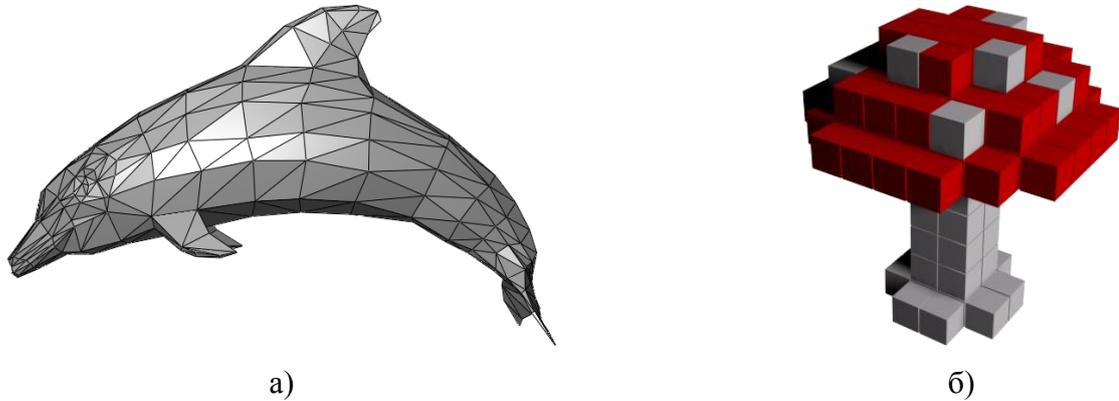


Рисунок 1.10 – Представление поверхности 3D объекта: а) полигональное; б) воксельное

На рисунке 1.11 приведены кадры известных компьютерных игр «Detroit: Become Human» и «Metro Exodus», выполненные в наиболее распространённой сегодня полигональной технологии.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 1.11 – кадры из видеоигры:

а), б), в) «Detroit: Become Human» (2018 года); г) Metro Exodus (2019 года)

Видно, что получающиеся изображения похожи на кукол и не могут быть по-настоящему приняты за живых людей, особенно из известного вам окружения. Не смотря на стремительный рост в последние годы мощностей вычислительных средств, как многоядерные процессоры, и специальных устройств, как современные видеоплаты, эта технология сегодня достигла своего потолка и может развиваться только при лавинообразном росте мощностей компьютеров.

Воксельная технология ещё более ресурсоёмка и не находит такого широкого применения, она используется в ограниченном кругу игр, заменяющих такие механические аналоги, как например, Куборо [1.124].

Обращает на себя внимание то, что сегодня основные усилия разработчиков направлены на математические методы обработки полученного голографического сигнала, часто оторванные от физических процессов. И полигональная, и воксельная графика, родившиеся как математическое развитие идеи облака точек, требуют значительных вычислительных ресурсов. Так например, сложность технологии облака точек растёт пропорционально кубу линейного размера голографируемого объекта; полигональная, где каждая точка изображения представляется треугольником с тремя вершинами, – девятой степени линейного размера голографируемого объекта; а воксельная, с её разными модификациями набора объёмных «кирпичиков» – ещё больше, что является серьёзным препятствием в их практической реализации. Они представляют собой чисто математическую модель реального пространства, далёкую от физической сущности передаваемого сигнала. Попытки реализовать традиционные методы кодирования для 4D файлов данных (3 пространственные и одна временная координата), связанные с традиционным энтропийным блочным кодированием с устранением избыточности, так успешно зарекомендовавшие себя в JPEG кодировании 2D сигналов, в настоящее время пока не приводят к аналогичным успехам в 4D кодировании полигонального и воксельного контента.

Как показано в параграфе 1.1, методы голографического представления сигнала тоже упираются в большие объёмы перерабатываемой информации. Эти проблемы связаны с необходимостью быстрого вычисления преобразования

Френеля, которым описывается распространение света в пространстве. Кроме традиционного интегрирования, где каждой точке исходного пространства объекта соответствуют все точки голограммы и каждой точке голограммы соответствуют все точки 3D объекта, разные авторы предлагают свои методы ускорения такого интегрального преобразования. Одним из интересных методов является метод, предложенный в [1.125]. В этой работе предлагается расчёт преобразования Френеля для синтеза голограммы с помощью вычисления спектра в промежуточной между голограммой и изображением виртуальной плоскости. При этом авторы обрезают дополнительной маской часть пространственных частот, сокращая время вычислений примерно в два раза, при сохранении требуемого для зрительного восприятия качества восстановленного изображения. Авторы не анализируют величину пространственного разрешения, восстановленного голограммой изображения и разрешающую способность по глубине, что указывает на начальную стадию работ в этом направлении ускорения вычислений.

Как отмечено выше, для виртуального представления объёмных сюжетов сегодня в основном используются три метода. Это облако точек, полигональное представление поверхности 3D объекта и воксельное представление объёма в виде микроскопических многоугольников. Все они концентрируются вокруг идеи создания виртуального 3D объекта, желательно максимально приближенного визуально к реальному. Однако наиболее интересным, наиболее полно представляющим 3D изображение и все эффекты восприятия человеком объёма является голографическое представление сигнала, хотя оно в классическом варианте также требует больших вычислительных ресурсов. Как считает ряд исследователей, например [1.76], «Аспект, которому уделяется гораздо меньше внимания по сравнению с конструкцией оборудования, – это то, как следует обрабатывать потенциально огромные объёмы данных для эффективного создания, хранения и передачи. Статистика сигнала голограммы значительно отличается от обычного естественного изображения и видео. Следовательно, традиционные алгоритмы представления и кодирования, такие как стандартные

семейства кодеков JPEG и MPEG, являются неоптимальными. При создании синтетического голографического контента с использованием методов компьютерной голографии (CGH) требуются алгоритмы, которые значительно отличаются от алгоритмов, необходимых для классического синтетического изображения, требуется рендеринг, основанный на физике пространства лучей и модели частиц для переноса света».

Следовательно, снижение передаваемой по каналам связи информации является одной из наиболее актуальных задач на пути к реализации голографического 3D TV и дополненной реальности. Также следует отметить, что все перечисленные выше методы являются методами виртуального представления объёма и существуют только в виртуальном компьютерном пространстве. Их материализация происходит только с помощью монитора. В подавляющем большинстве случаев это проекция 3D изображения на плоский экран монитора. Наблюдатель видит такие изображения по ту сторону экрана. Однако есть методы представления 3D сюжетов в реальное пространство перед монитором. Их обзору посвящён следующий параграф 1.3.

В заключение настоящего параграфа следует отметить, что не смотря на недостаточное количество фотоприёмных элементов в современных фотоматрицах, обеспечивающих работу цифровой голографии, у них есть существенные преимущества по чувствительности, отмеченные в [1.126], что позволяет надеяться на их более широкое применение в ближайшем будущем.

#### ***1.2.4. Обсуждение***

Подводя итоги этого параграфа, можно сделать вывод, что общими недостатками развивающихся сегодня методов кодирования, сжатия и передачи голографической 3D информации можно считать следующие:

1. Запись цифровых голограмм с высоким разрешением затруднена. Для таких работ необходимы не только специализированные оптические установки,

но и новые идеи для их создания и эксплуатации, поскольку, размер записываемых голограмм технологически ограничен.

2. Компьютерная голография (CGH) требует гораздо больше вычислений, чем классический рендеринг изображения: каждая точка сцены потенциально может повлиять на каждый пиксель голограммы. Это отношение «многие ко многим» в сочетании с большим разрешением голограммы слишком дорого для вычисления методом перебора.

3. Для цифровых голограмм необходимы новые технологии преобразования и кодирования. Обычные преобразования и представления работают неоптимально, потому что они не соответствуют статистическим свойствам голографических сигналов. Стандартные кодеки, такие как JPEG и MPEG, предназначены исключительно для естественной фотографии и видео, но плохо работают с голографическим контентом; необходимо интегрировать новые преобразования и методы оценки и компенсации движения.

4. Моделирование воспринимаемого визуального качества для голографического контента требует точных моделей для субъективной оценки качества. Эти показатели потребуются для управления другими компонентами голографического конвейера (CGH, кодировщики / декодеры, дисплеи) с целью оптимизации их взаимодействия.

5. Отмечая справедливость ряда высказываний [1.76], в то же время следует возразить автору в том, что он не учитывает одного существенного момента. Имеется ввиду отсутствие в его выводах (как и в выводах других аналитических обзоров на эту тему) стадии передачи голографической 3D информации от голографируемого объекта к голографическому монитору. Можно считать ошибкой, происходящей от сложившегося классического понимания передачи фотографического изображения, как его передачи после того, как оно уже создано. Это традиционно осуществляется в следующей последовательности – фотография, кодировщик, передача сжатого контента, его декодирование до обычного изображения и передача для визуализации на дисплей. Ввиду того, что эффективные методы кодирования, подобные сделанным *Joint Photographic*

*Experts Group* плохо работают с 3D контентом, требуется искать новые пути и методы сжатого представления 3D сигналов, которые будут обсуждены в главе 2 и главе 4 настоящей работы.

### ***Выводы параграфа 1.2***

Существующие методы представления 3D изображений объектов требуют разное количество информационных затрат.

Наиболее распространённый метод – облака точек – нашёл применение в 3D лазерном сканировании. Он очень ресурсоёмок и требует минимум 3 байта на точку. Поэтому реальные живые объекты этим методом не обрабатываются.

Метод полигонов, нашедший применение в компьютерных играх также не способен сегодня обеспечить адекватное представление живых 3D объектов во-первых по причине практически втрое большей информационной ёмкости, чем облако точек, а во-вторых по причине необходимости в традиционной технологии полигонов делать множество двумерных снимков объекта для формирования узлов и рёбер каждого полигона. Сшивка соседних узлов и рёбер – отдельная сложная и ресурсоёмкая задача. Всё сказанное выше не позволяет на сегодняшнем уровне техники формировать узнаваемые 3D изображения живых объектов, хотя и годится для имитации движения кукол в 3D графике компьютерных игр.

Воксельное представление динамически меняющихся объектов обладает несомненным преимуществом возможности представления эффектов перетекания одного 3D объекта в несколько и обратно, как это, например, бывает в развивающейся приливной волне, когда она сначала изгибается, а затем рассыпается на множество брызг. Однако цена вопроса по параметру ресурсоёмкости непомерно велика, т. к. каждый воксель характеризуется даже не тремя точками, как полигон, а уже восемью. Это ещё больше сдерживает развитие метода и, вероятно поэтому, попыток изображать набором вокселей живые объекты нами даже не обнаружено.

Большинство исследователей склоняется к мысли о необходимости поиска альтернативных представлений 3D объектов, обладающих более приемлемыми затратами информационных ресурсов при представлении динамически меняющихся 3D объектов, особенно при формировании 3D изображений движущихся живых объектов.

### **Параграф 1.3. Голографические дисплеи**

Значительная часть исследований в области голографических систем отображения сосредоточена на аппаратных задачах, а именно на проектировании и разработке соответствующих оптических и электронных технологий. Они включают разработку широкополосных пространственных модуляторов света (SLM) и разработку специализированной оптики. В [1.127] приводятся результаты работы в области пространственных модуляторов света на основе жидких кристаллов на кремниевой подложке от компании Holoeye. Максимально достигнутая размерность которых  $4094 \times 2400$  пикселей реализована в фазовом модуляторе серии 4K SRK-JDN124W. В [1.128] был сделан хороший обзор по жидкокристаллическим пространственным модуляторам, а в [1.129] сделан обзор приложений для использования пиксельных пространственных модуляторов света в динамической голографии.

Большинство других коммерчески реализованных пространственных модуляторов света сегодня ограничены стандартами TV проекционных систем, и чаще всего имеют  $1920 \times 1080$  пикселей, что не даёт возможности широко применять их как голографические дисплеи.

### *1.3.1. Обзор существующих подходов к реализации голографических 3D дисплеев*

Подробный обзор последних разработок 3D-дисплеев можно найти в недавних статьях [1.7, 1.115, 1.130–1.132]. Их объединяет усиленный поиск и большое расстояние, которое надо пройти разработчикам, чтобы создать реальные голографические дисплеи, размерностью до  $10^{12}$  пикселей в кадре.

Мало кто исследует как передавать голографическую информацию есть только общие рекомендации – т. к. объёмы передаваемой информации очень велики, нужно использовать оптоволоконный канал или прямой атмосферный со всеми проблемами открытого канала, подвергнутого атмосферным воздействиям. Часто исследователи ограничиваются просто упоминанием, что эта проблема существует и тут же уходят к другой (родственной, но другой) – к обработке голографической информации, что, в основном сводится к поиску оптимального вычисления быстрого преобразования Френеля (с помощью быстрого преобразования Фурье (FFT) или без).

Анализу возможностей создания действующего в реальном времени интерактивного голографического цифрового дисплея посвящён ряд обзоров, один из них [1.133]. В нём говорится, что формирование оптических информационных массивов осуществляется с помощью электрически управляемых пространственных модуляторов света (ПМС), способных модулировать амплитуду, фазу или поляризацию световых волн в пространстве и передавать на оптической несущей (в данном случае лазерной) сформированное изображение в оптические системы хранения, обработки и отображения информации.

Здесь считаем важным согласиться с автором и отметить, что приёмной системой оптически сформированных изображений не всегда является живой наблюдатель (оператор), но и различные системы хранения, или дальнейшей обработки изображений [1.51, 1.134].

Поправка автора, что передача такой информации возможна только с помощью оптической несущей, связана с распространённой схемой передачи полной голографической информации, о чём говорится в обзорной части параграфа 1.1.1 и схематически представлено в другом обзоре [1.76]. Далее мы покажем свои возражения на эту тему.

На рисунке 1.12 показано, что традиционным является поиск способов передачи полной информации о голограмме.

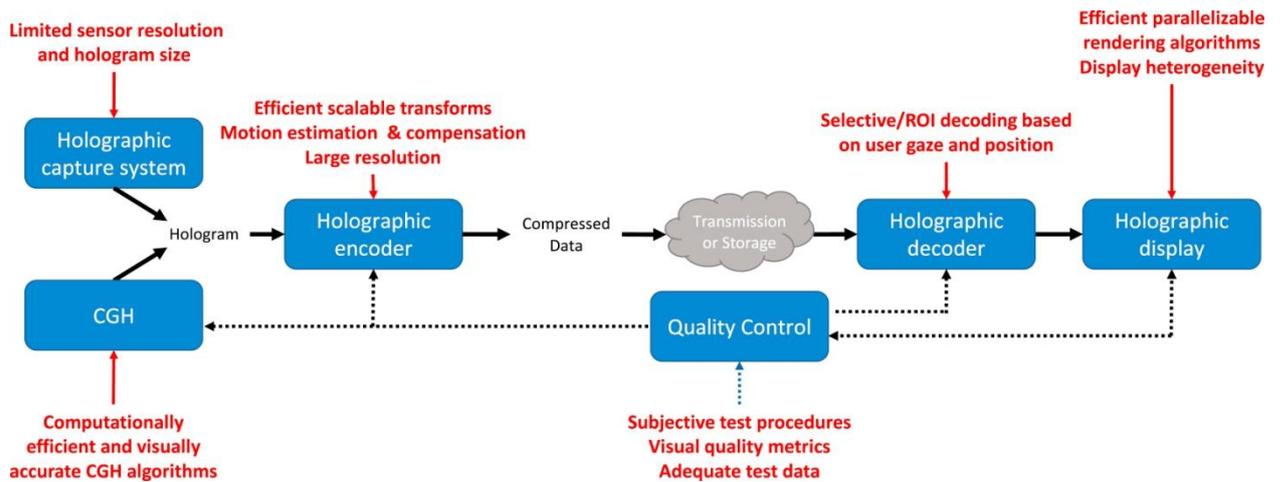


Рисунок 1.12 – Классическое представление голографического TV

Голографическая система регистрации или синтеза голограмм создаёт 4D контент, который затем сжимается за счёт специального (энтропийного) кодирования и передаётся на приёмный конец канала связи, где декодируется и снова превращается в поток голографических 3D изображений с требуемой частотой смены TV кадров, которые воспроизводит голографический дисплей.

Такое представление о возможностях передачи 3D голографической информации по каналу связи повторяется из обзора в обзор [1.130], копируя логику радио и телевизионных передач.

Голографическая система захвата (записи голограммы) или компьютерно-сгенерированная голограмма поступает на голографический кодировщик. Затем кодировщик уже созданной голограммы производит её энтропийное сжатие, например, методом Хаффмана, формируя голографический контент блоками с близкой (в идеале одинаковой) энтропией и передаёт его по каналу связи. На

приёмном конце канала связи голографический контент декодируется и преобразуется в голограмму, поступающую на голографический дисплей. Затем голографический дисплей в динамическом режиме производит восстановление 3D изображения.

Среди проблем, встречающихся на этом пути при создании голографических дисплеев, первое, на что необходимо обратить внимание, это отсутствие эффективных методов компьютерного сжатия голографической информации.

В главах 2, 4, настоящей работы мы предлагаем другой вариант передачи голографической информации, свободный от этого недостатка. В них будет показано как можно передавать голографическую информацию по обычному радиоканалу.

### *1.3.2. Хогель-кодирование и дисплеи светового поля*

Хотя, практически в каждом обзоре говорится о надеждах в скором времени получить эффективные кодировщики с устранением избыточности и сжатия голографической информации до параметров, удовлетворяющих условиям передачи голографического сигнала по обычным каналам связи, но уже более 20 лет такого кодировщика найдено не было. Одна из причин встречающихся на этом пути трудностей связана с большим объёмом голографической информации, другая с сильно неравномерным характером структуры голограмм.

В частности, ограничение степеней свободы состояния точек изображения, о которых говорится в ряде наших работ по формфактору [1.135–1.140] ограничивает энтропию сигнала. Например, голограмма гауссовых пучков никогда не даст ярких точек на краях гаусса. В то же время, статистика сложных изображений, в силу ЦПТ [1.72] тоже имеет гауссов вид. Следовательно, практически любые голограммы реальных объектов, как сложное, образованное под воздействием многих факторов изображение, имеют статистическое

распределение по яркости и по фазе близкое к гауссову виду. Поэтому энтропия голограмм реальных объектов в значительной мере ограничена эффектами, описанными в главе 3.

Эти и ряд других проблем ограничивают возможности сжатия голографической информации.

В замечательной работе по кодированию голографической информации [1.141] Марк Люсенте вводит специальный голографический объект Hugel-vector, который представляет собой пиксель с индикатрисой излучения, заданной дискретным количеством векторов разной величины и направления. С помощью такого объекта автору, по его утверждению, удаётся сжать голографическую информацию в 16 раз. Время обработки, как пишет автор, для типичных трёхмерных изображений сокращается более чем с 70 до 4,0 секунд на голографическую решётку размером 36 МБ и менее 1,0 секунды для полноцветного изображения размером 6 МБ. Это один из лучших результатов по энтропийному сжатию голограмм, однако сравнение с объёмами информации типичных голограмм (параграф 1.1) показывает, что требуемое сжатие, необходимое для передачи полноценной голографической информации по обычным радиоканалам с частотой TV кадровой развёртки, должно быть даже не на один порядок больше, а, как минимум, на 5–6 порядков. Именно поэтому, так обнадёживший в начале, впервые прозвучавший в докторской диссертации М. Люсенте 1994 года в Массачусетском технологическом институте [1.142], метод хогелей в течение более чем четверти века так и не достиг совершенства в практическом применении для динамической голографии. Однако, он близок к решению задач создания дисплеев пленоптического поля или светового поля, родившихся в развитии стереодисплеев. В [1.131] приводится история их развития, где показано, как от идеи стереокино с разными типами специальных очков был совершён переход к многовидовым экранам, содержащим матрицу микролинз (VZFO), которые проецируют в зону наблюдения изображения, снятые многими камерами так, что в каждой точке зоны наблюдения видны только изображения, снятые одной из камер.

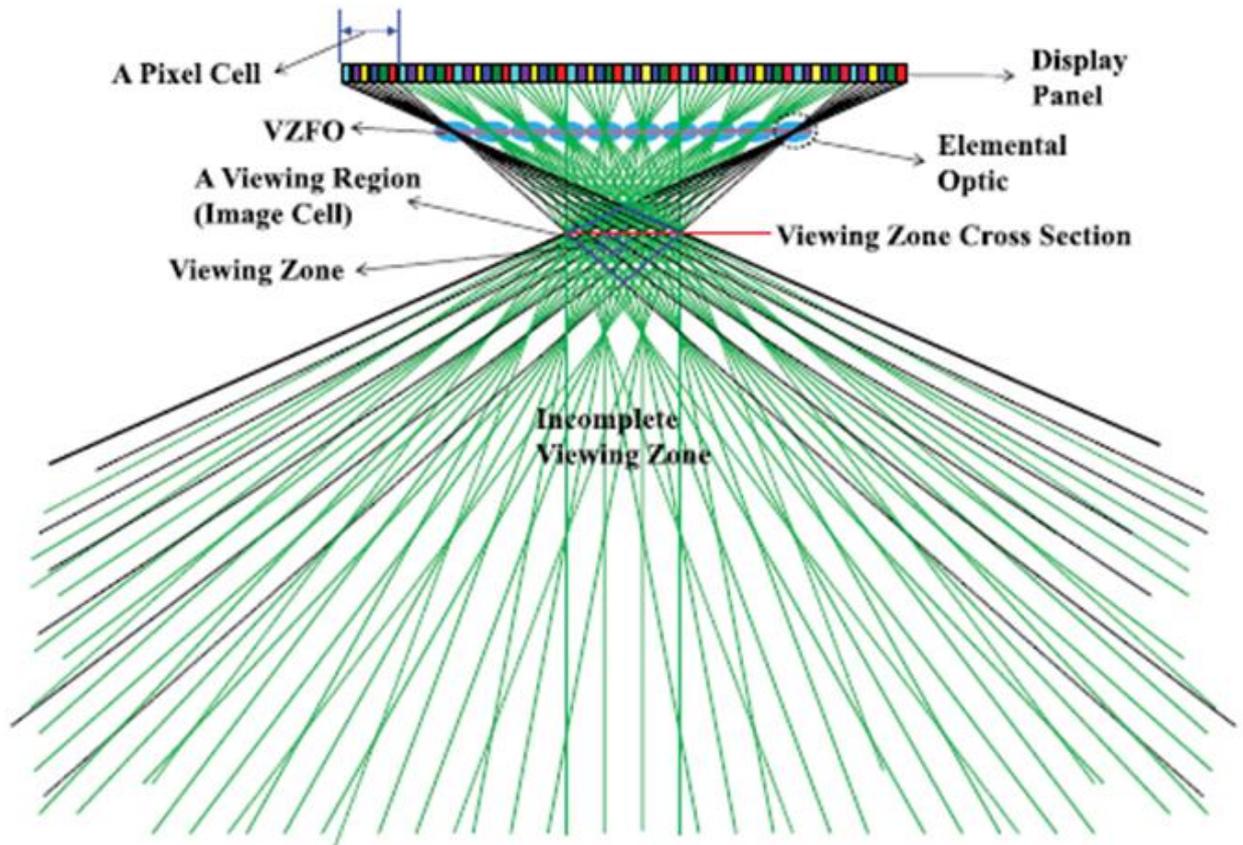


Рисунок 1.13 – Панель дисплея светового поля состоит из набора микродисплеев (Pixel Cell), содержащих кусочно-распределённые части 3D изображения так, что в зоне наблюдения (Image Sell) содержатся все изображения, снятые многими камерами так, что при смещении наблюдателя (оператора) ему попадают в зону видимости изображения объекта, снятые одновременно разными камерами

Как сообщается в [1.143], «Начиная с 2005 г., при частичном финансировании за счёт щедрой поддержки перспективных исследовательских проектов в области обороны Агентства (DARPA) [1.144], фирма Zebra Imaging разработала гибкую платформу для «голографических» дисплеев со всеми преимуществами электронной голографии, в т. ч.:

- Естественный 3D (без очков), непрерывный просмотр;
- Полноцветные, яркие, трёхмерные изображения;
- Фотография крупным планом и полноцветный, трёхмерный голографический объем изображения (был приведён пример 3D отображения – небольшая **искусственная модель** участка молекулы ДНК);
- Полностью интерактивный контент, а также видео в реальном времени;

- Точная пространственная регистрация, независимо от местоположения нескольких одновременных зрителей;
- Качество текста: разрешение больше 10 миллионов точек, для изображения с диагональю 60 см.

В кавычки слово «голографический» поставлено нами, поскольку мы придерживаемся классического определения голографии, как интерференционного метода полной регистрации о рассеянном объектом световом поле [1.8–1.11]. Целью 5-летней программы DARPA было «разработать большой голографический дисплей, чтобы облегчить быструю и чёткую передачу разведанных для командного планирования миссий и репетиций, визуализация и интерпретация данных в реальном времени и обучение».

Аналогичные работы проводились ранее в НИКФИ [1.80, 1.107–1.109].

Однако Компания Zebra Imaging, Inc., взявшаяся активно продвигать такой дисплей, сейчас закрыла доступ к ранее открытым своим сайтам [1.143–1.146].

Приведённые в [1.7] данные говорят о том, что созданный в Zebra Imaging дисплей имел размер 30×45 см с количеством пикселей около  $3 \cdot 10^6$ . Это означает, что один из лучших созданных дисплеев светового поля мог иметь только 3000×3000 точек, что вполне пригодно для качественного плоского изображения, но совсем недостаточно для непрерывного по глубине объёмного. Так, если каждая группа передающих изображение пикселей (A Pixel Cell), которые можно назвать «голопиксели», на рисунке 1.13 содержали участки 3D изображения с 9 проекциями, снятых разными камерами, то формат каждой плоской проекции 3D изображения содержал только 1000×1000 пикселей и уже не соответствовал современным TV стандартам. Например, Full HD содержит 1920×1080 пикселей, что в два раза больше. Следует отметить, что при таком небольшом количестве проекций (до 10) глубина 3D объекта отображается дискретно, скачками, что не способствует её адекватному восприятию. Идеально, если глубина имеет ту же дискретизацию, что и по координатам на плоскости. Это означат, что качественное по современным меркам изображение вообще не может быть представлено с помощью достигнутых технологий дисплеев светового поля,

поскольку  $(3 \cdot 10^6)^{1/3} = 144$  пикселя по каждой оси сегодня никак не может считаться изображением в хорошем качестве.

Попытки довести технологию до коммерчески приемлемого результата были, но проблема достижения непрерывного параллакса в технологии дисплеев светового поля всё время ускользала.

Была сформулирована идея, что необходимо моделировать естественные условия просмотра, достигающие непрерывного параллакса. Непрерывный параллакс индуцируется практически бесконечным (мультиракурсным) количеством различных изображений обзора, и он также может вызвать монокулярное ощущение глубины [1.147]. Концепция супер-мультиракурса была представлена в середине 1990-х годов с дисплеем, названным сфокусированным световым массивом (FLA – Focus Light Array) [1.148]. Эквивалентная оптическая конфигурация и композиция изображения FLA, в принципе, такие же, как и у дисплея Zebra Imaging. FLA представил 45 различных изображений обзора в горизонтальном направлении, но, как сообщается в [1.149], не было обнаружено доказательств того, что FLA обеспечивает непрерывный параллакс в пределах своей области обзора. Вслед за FLA был представлен дисплей под названием Holovizio [1.150]. Этот дисплей содержал массив микродисплеев, как массив голопикселей у Zebra Imaging. Авторами утверждалось, что дисплей может обеспечивать непрерывный параллакс. Однако основной принцип этого дисплея такой же, как и у IP (Integral Photography). Композиции воспринимаемого изображения из Holovizio очень похожи на таковые из FLA. За этим дисплеем последовал дисплей, называемый дисплеем нескольких изображений (MID) (Multi Image Display), который отображает объёмные изображения, состоящие из 256 слоёв [1.151]. Эквивалентная оптическая конфигурация и состав изображения MID не отличаются от таких же у FLA.

Как отмечается в [1.131], «Методы трёхмерной визуализации, разработанные с конца 1980-х годов, были в основном предназначены для домашнего использования, а с середины 1990-х годов они в основном реализовывались на плоских дисплеях. Преимущество использования дисплея с

плоской панелью состоит в том, что трёхмерное изображение может отображаться вместе с изображением плоскости, которое является изображением эталонной плоскости трёхмерного изображения. Следовательно, 2D / 3D-совместимые дисплеи на основе плоских дисплеев и электроголография на основе микросхем цифрового дисплея, таких как SLM, DMD и LCD, в настоящее время являются основными объектами исследований в области трёхмерной визуализации. Некоторые методы почти достигли технической зрелости, но они все ещё медленно развиваются на рынке. Стереоскопическое телевидение на основе поляризационных и затворных очков и мобильные телефоны на основе параллакс-барьера (разные варианты микролинз или призм, делящие чересстрочно экран монитора, чтобы каждая строка была видна со своего направления) уже есть на рынке, и телевидение уже начиналось. Но снижение интереса к такому 3D телевидению приводит к тому, что оно становится дополнительной функцией отображения плоского дисплея для плоских изображений, а многопроекционные 3D дисплеи даже не имели возможности выпускаться на линиях массового производства. Для этого существует множество причин, но основными причинами являются неестественные условия просмотра, такие как ограничения при изменении положения просмотра, неудобство ношения очков, неестественное ощущение глубины и искажённое изображение, сопровождающееся изменением положения зрителя, а для стереоскопического TV ещё и худшее качество изображения по сравнению с плоским изображением для многоэкранных дисплеев. Фактически, постоянно увеличивающийся размер панели, более высокое разрешение и более яркое и равномерное распределение яркости в плоских дисплеях постоянно улучшают качество плоских изображений и усиливают психологически индуцированное чувство глубины в изображениях. Качество трёхмерных изображений также улучшилось с помощью плоских дисплеев, но скорость улучшения намного ниже, чем у плоских изображений. Эта разница в скорости делает относительное качество трёхмерных изображений намного хуже, чем у плоских изображений. Но это не единственная причина, по которой трёхмерная визуализация все ещё пытается найти способ обособиться на

рынке, даже несмотря на большое количество методов трёхмерной визуализации в рамках зрелых технологий. Более правдоподобная причина заключается в том, что трёхмерное изображение не использовало в полной мере своё единственное достоинство по сравнению с плоским изображением: ощущение глубины. Современная трёхмерная визуализация может обеспечить только виртуальное ощущение глубины, которое может вызвать дискомфорт и утомление глаз, вызванное конфликтом вергенции и аккомодации, за исключением голографических изображений и 3D изображений светового поля. Трёхмерное изображение должно обеспечивать ощущение глубины в соответствии с естественными условиями просмотра».

Соглашаясь, в основном, с автором этих строк, следует отметить, что дисплеи светового поля, как ясно из рисунка 1.13, также могут иметь конфликт между вергенцией и аккомодацией. В дисплее светового поля наблюдатель, ощущая в разных кадрах разную глубину пространства за счёт вергенции будет резко видеть все слои глубины с одной аккомодацией, наводясь на экран дисплейной панели. Таким образом, идеальными системами 3D TV, были и остаются только голографические системы. Попытки их создать опираются на SLM, DMD и LCD устройства. Сравнительно недавно появились ещё LED и OLED устройства.

Работа SLM модуляторов (Space Lite Modulation) и DMD (Digital Micromirror Device) основана на технологии микрозеркал. Они, в принципе, пригодны для голографических целей, но достигнутое количество микрозеркал и их бинарное состояние (on-off) не позволяет рассчитывать на формирование сколько-нибудь приемлемого качества при синтезе голограмм [1.152, 1.153].

Жидкокристаллические дисплеи, работающие чаще всего с нематическими жидкими кристаллами (Liquid Crystal Display, LCD), представляют собой стопу плоских матриц общего электрода, слоя жидких кристаллов (ЖК) матрицы управляющих транзисторов с прозрачными электродами субпикселей, цветных и поляризационных фильтров, закрытых защитными покрытиями так, чтобы электрически управляемые транзисторы формировали на ЖК потенциал,

приводящий к повороту поляризации так, чтобы на выходе каждого пикселя управляемо изменялась толщина или поляризация [1.133, 1.154] что при прохождении поляризационного фильтра изменяет интенсивность прошедшего света [1.155, 1.156]. Такая технология в принципе пригодна к формированию динамических голограмм, но достигнутые размеры таких дисплеев, в несколько сантиметров по диагонали при подходящих размерах пикселя в несколько микрон далеки от желаемых.

В [1.157] анонсируется цветная электронная голографическая система с расширенным углом обзора, использующая жидкокристаллические дисплеи (ЖКД) сверхвысокой чёткости с подавлением шумов рассеяния, хроматических aberrаций, и астигматизма, полученные ими практические результаты пока очень скромны. Авторы исследуют методы пространственно-временного мультиплексирования для уменьшения сложности системы. Эти исследования позволяют создать систему электронной голографии с использованием ЖК-дисплеев с разрешением 33 мегапикселя. Приведены экспериментальные результаты, показывающие качественные полноцветные 3D-изображения с размером диагонали 4 см, углом зоны обзора 15 градусов и частотой кадров 20 кадров в секунду, т. е. на порядки меньше указанных в [1.158] как требуемые параметры.

Множество известных жидкокристаллических дисплеев, включая дисплеи, изменяющие амплитуду светового поля или его фазу, или одновременно и амплитуду, и фазу, также достигают сегодня стандарта 4K UHD ( $3840 \times 2160 = 8\,294\,400$ ) и даже 8K UHD ( $7680 \times 4320 = 33\,177\,600$ ). Известно описание работы с уникальным 33-мегапиксельным ЖК-дисплеем [1.157].

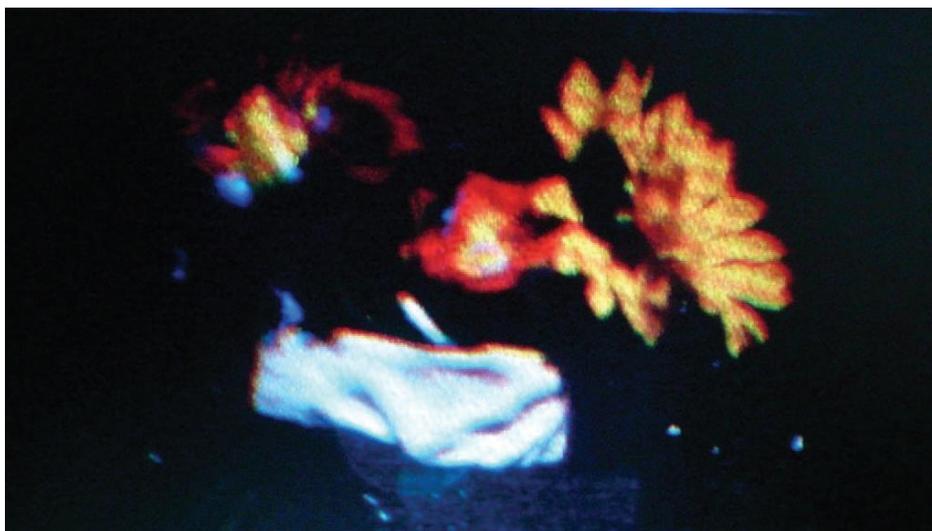


Рисунок 1.14 – Кадр из фильма, восстанавливающего 3D изображение на жидкокристаллическом 33 мегапиксельном дисплее

На рисунке 1.14 показан кадр голографического фильма, приведённого в работе [1.157], размером  $7680 \times 4320$  пикселя, синтезированный с помощью 33-мегапиксельного голографического ЖК-дисплея. Размер диагонали восстановленного изображения, как сообщают авторы, был 4 см, угол зоны обзора 15 градусов и частота восстановленных голограммой полноцветных кадров была 20 кадров в секунду, хотя видеозахват объекта осуществлялся с частотой 60 кадров в секунду.

Это уже пригодно для синтеза простейших голограмм, но ещё недостаточно для синтеза голограмм, способных формировать 3D изображения с непрерывным параллаксом более чем для одного наблюдателя. Кроме того, видно, что при таком размере дисплея и таком его разрешении трудно ожидать приближения к качеству близкому к HD или Full HD, к которому привык сегодняшний телезритель.

Для реализации полноценного видеопотока в стандарте TrueColor требуется организовать формирование цветных RGB кадров с размером Full HD ( $1920 \times 1080$  точек) и глубиной серого в 256 слоёв с частотой свыше 25 Гц. Для этого достаточно полосы пропускания канала связи около 50 МГц. Реализация такого видеопотока сегодня возможна, например, в сетях 5G, а её голографический аналог с глубиной в 256 слоёв по глубине изображения превосходит более, чем на

2 порядка. Это не позволяет создавать непрерывную развёртку параллакса для реальных изображений человека и известные разработки в основном ограничиваются поиском путей устранения окклюзии и влияния дискретизации представления пикселей на отношение сигнал/шум в восстановленном изображении [1.159].

### *1.3.3. Многоканальные голографические системы*

Вероятно, на этапе разработки одного большого голографического дисплея вперёд выйдут синтезированные голографические панели, составленные из множества элементарных голографических дисплеев как это представлено на рисунке 1.15 В работе [1.160] показана принципиальная схема, повторяющаяся во всех подобных устройствах.

Авторы работы пишут: VW с размером  $w_y$  находится в пределах первого порядка дифракции в плоскости наблюдения. Размер дифракционного порядка определяется в линейном приближении выражением  $\lambda d/\delta_y$ , где  $\lambda$  – длина волны. Например, размер VW составляет 13 мм для  $\lambda = 465$  нм,  $d = 1$  м, а также  $\delta_y = 35$  мкм. Этот размер больше, чем зрачок глаза, на котором расположен VW. Таким образом, трёхмерная сцена видна с VW. VW отслеживается до нового положения глаз, когда наблюдатель движется.

Каждая точка объекта трёхмерной сцены кодируется в SH на SLM. Размер и положение SH задаются путём проецирования VW через точку объекта на SLM, как показано зелёными линиями на рисунке 1.15 SH можно рассматривать как дифракционную линзу, которая создаёт точку фокусировки в положении точки объекта. Возможны положительные и отрицательные силы линз для создания точек реальных и виртуальных объектов. В нашей концепции наивысшим приоритетом является реконструкция волнового фронта в VW, который будет генерироваться реальной 3D-сценой.

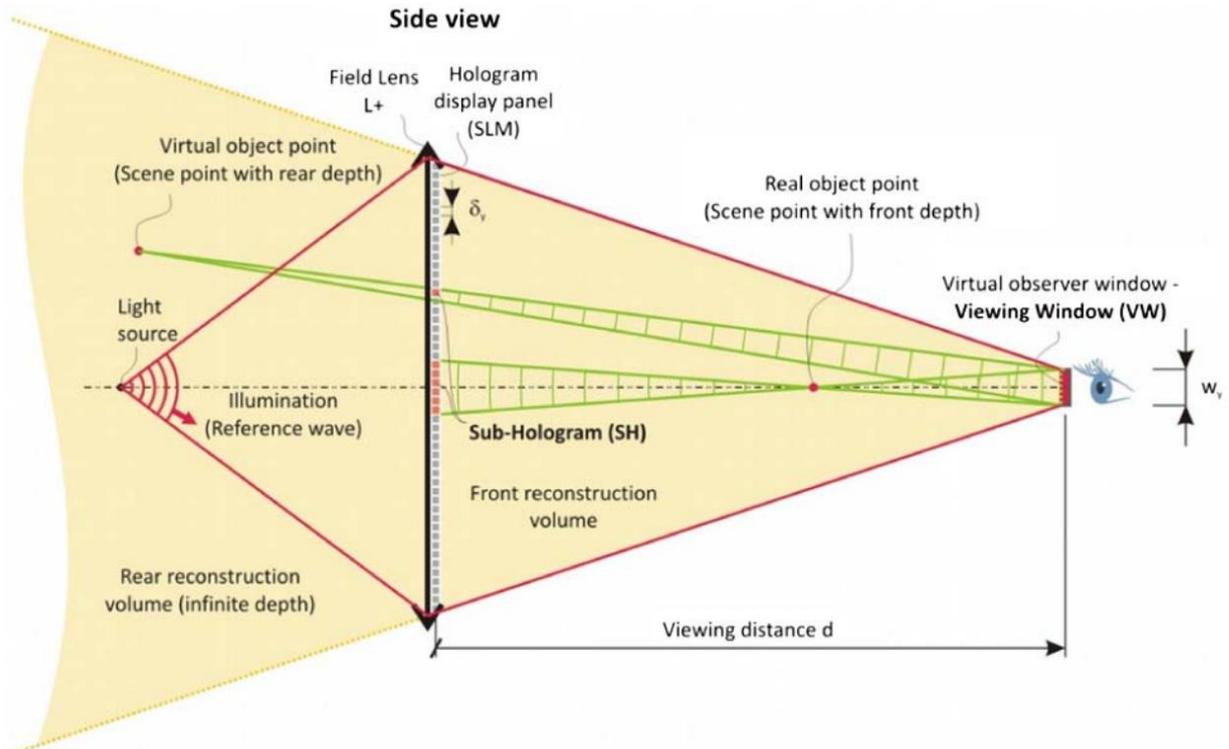


Рисунок 1.15 – Источник света освещает SLM и фокусируется в VW полевой линзой FL. Свет коллимируется первой линзой перед SLM и фокусируется в VW второй линзой после SLM. VW расположен в плоскости наблюдателя. Расстояние обзора  $d$ . SLM имеет структуру пикселей с шагом  $\delta_y$

Размер 3D-сцены ограничен только размером SLM, а не шагом пикселя. Трёхмерная сцена может быть реконструирована в любом месте пирамиды, определяемой VW и SLM, то есть в жёлтой области на рисунке 1.15. Следовательно, наша концепция кодирования SH и отслеживаемых VW позволяет создавать большие 3D-сцены с допустимым шагом и количеством пикселей SLM.

В [1.161] представлена одна из разновидностей такой системы, которую авторы назвали «мозаичной системой». Она схематически представлена на рисунке 1.16.

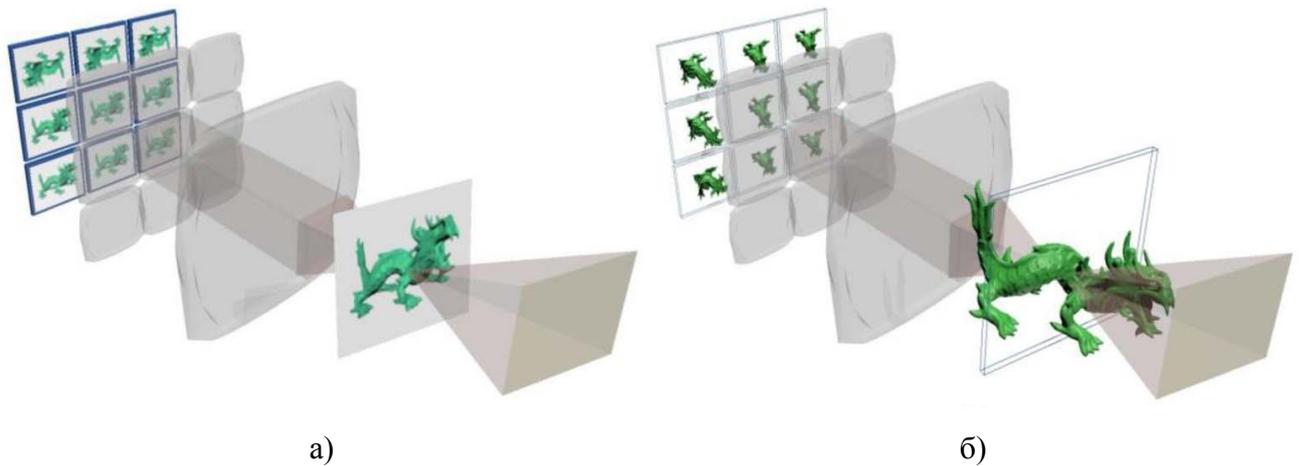


Рисунок 1.16 – а) иллюстрация стандартной системы, в которой используются мозаичные источники 2D-изображений; б) схема с использованием источников с 3D изображениями

Каждое 2D-изображение проецируется под определенным углом обзора через соответствующую систему  $4f$  формирования изображения. В системе (б) источники изображений заменяются голограммами, каждая из которых может поддерживать естественные сигналы глубины сама по себе. Линза и полевая линза также могут быть включены в качестве формирования угловых наклонов мозаичной информации на субголограммах.

Приведённый выше авторский текст показывает, насколько далеко от голографической разрешающей способности находятся изображения в представленных схемах. Действительно, для непрерывного параллакса требуется примерно столько же позиций по глубине, сколько их в пространственном разрешении восстановленного изображения. Даже в TV стандарте, сильно уступающем Full HD, в стандарте SD с разрешением 720 на 576 пикселей такое требование глубины изображения приводит к необходимости формирования сотен элементов мозаики только для формирования горизонтального параллакса. Во столько же раз в финальном увеличенном изображении должно упасть разрешение. Возможно, за счёт замены плоских TV экранов мозаики (рисунок 1.16а) на голографические это количество может несколько снизиться, что указывает на возможную перспективу такого рода 3D мозаичных дисплеев.

Теми же авторами рассматривается и другой подход – представление глубины объекта в виде слайсинга, рисунок 1.17, варианты реализации которого

столь обширны, что мы не будем в нашей обзорной работе подробно на них останавливаться.

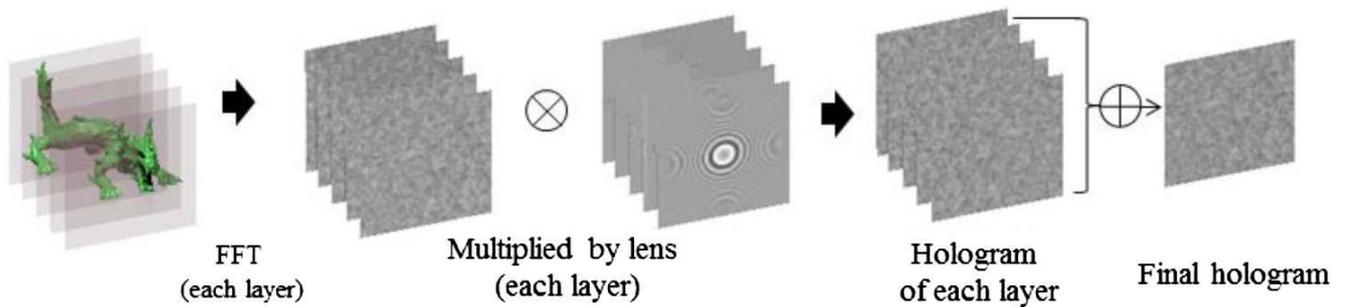


Рисунок 1.17 – Нарезка изображения слоями, преобразование Фурье от каждого слоя, запись голограммы от каждого фурье-образа и на их основе синтез голограммы 3D изображения

Следует лишь отметить, что практическая реализация всех вышеперечисленных идей пока оставляет желать лучшего, см., например, рисунок 1.18, где с трудом видна перестройка по глубине путём фокусировки на переднем и заднем крае восстановленного изображения, качество которого тоже пока недостаточно.

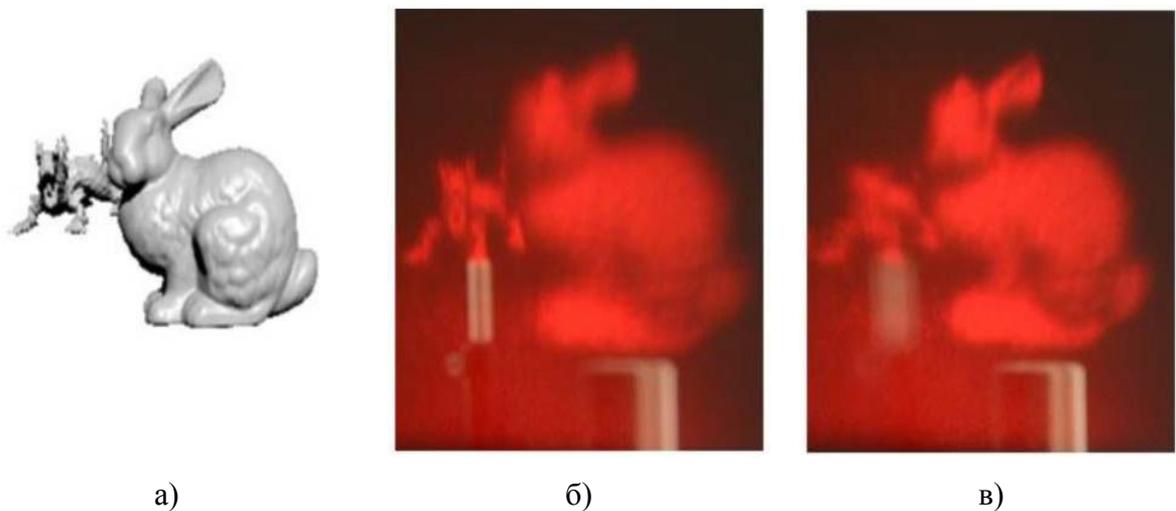


Рисунок 1.18 – Объект голографирования и его восстановленные изображения: а) две керамические фигурки; б) фотография их восстановленного голограммой 3D изображения, сфокусированная на второй план; с) фотография восстановленного 3D изображения, сфокусированная на первый план

### *1.3.4. Новые направления исследований*

Заслуживают особое внимание некоторые новые направления исследований, в которых разрешающая способность голографического дисплея увеличивается в тысячи раз, вполне соответствуя по этому параметру настоящим голограммам. Это и упомянутые выше материалы на основе метаповерхностей и прежде всего новые динамические фотополимеры.

Из последних следует отметить работу Blanche и др. [1.162] из Университета Аризоны, где они разработали экзотический материал, названный сенсibilизированным фоторефрактивным полимером (PRP), с замечательными голографическими свойствами, включая способность обновлять изображения каждые 2 секунды.

Как показано на рисунке 1.19 ([1.69] и [1.130]), источником света системы является когерентный лазерный луч ( $\lambda = 532$  нм). Он разделяется на объектный луч и опорный луч с помощью светоделителя. Объектный луч модулируется компьютерной голографической информацией трёхмерной сцены с помощью SLM. После выполнения преобразования Фурье объектный луч интерферирует с опорным лучом в объёме фоторефрактивного полимера. Фоторефрактивный полимер в основном прозрачен в видимой области спектра. Голографическая информация записывается на полимер с помощью импульсной лазерной системы. Трёхмерное изображение просматривается с помощью некогерентного цветного светодиода, падающего под углом Брэгга, и изображение чётко видно при окружающем освещении в помещении. Голограмма в естественных условиях исчезает через пару минут, или её можно стереть при записи нового 3D-изображения.

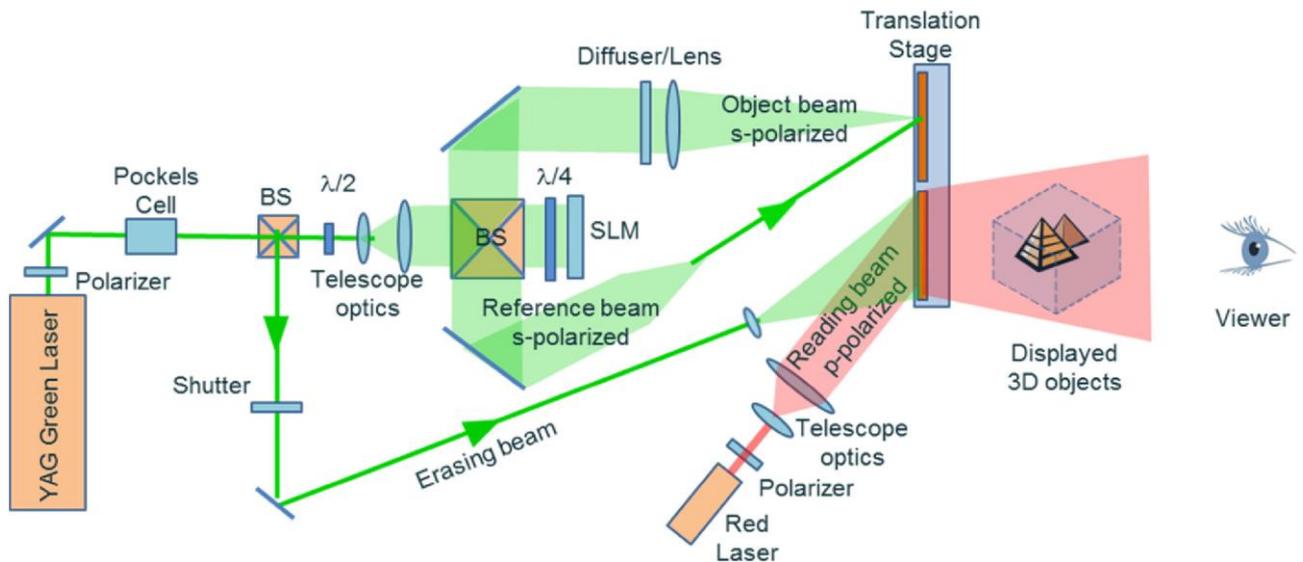


Рисунок 1.19 – Оптическая конфигурация голографической системы визуализации на основе стираемого фотополимера

Понятно, что такая система даже не предполагает передачу голографической информации по каналу связи от объекта голографирования к системе 3D визуализации, а скорее может быть представлена как голографический усилитель 3D голографических изображений. Однако, как и в радиоэлектронике, от усилителя до генератора и передатчика может быть не так уж и далеко. Следует отметить, что работы по голографическим фотополимерам в последнее время набирают темпы, поскольку такие голограммы могут достигать особенно высоких значений дифракционной эффективности, хотя и не лишены некоторых имманентных ограничений [1.163]. Анализу ограничений информационной ёмкости таких голограмм посвящена глава 3 настоящей работы.

В целом, опираясь на множество обзорных работ [1.115, 1.133, 1.158, 1.164, 1.165] можно считать, что в целом голографические дисплеи за последние десятилетия претерпели серьёзные технологические изменения, но опираются, в основном, на 5 типов физических эффектов:

1. Микромеханические матрицы зеркал [1.166];
2. Жидкокристаллические модуляторы [1.167];
3. Матрицы светодиодов [1.168];
4. Электрооптические модуляторы [1.169];
5. Акустооптические модуляторы [1.170].

В 2020 году выпуск ноутбуков с OLED-дисплеями начала компания ASUS [1.168]. OLED, заменившие LED, состоят из матриц светодиодов и хорошо себя зарекомендовали для плоских TV панелей, но пока невозможно организовать их когерентное излучение, что не позволяет надеяться на синтез классических голограмм с их помощью, однако они могут быть использованы в дисплеях светового поля.

Можно ожидать также, что будут появляться и новые технологии, как технология метаповерхностей [1.171], и даже динамических полимеров [1.162, 1.163, 1.172], или других голографических динамически меняющихся сред.

### ***Выводы параграфа 1.3***

На базе указанных первых пяти физических принципов сегодня построено множество оптических схем голографических дисплеев. Хорошие обзоры таких систем представлены в большом количестве работ, например [1.7, 1.131, 1.133, 1.158, 1.159], а также во множестве других.

Большинство из них основывается не на анализе классических голографических дисплеев, а на их приближённом аналоге, именуемом «дисплей светового поля», в которых микроскопические участки голограммы выполняются как искусственные имитаторы параллакса, называемые Hogel (аббревиатура от словосочетания Hologram Pixel) в русскоязычных статьях встречается как холопиксель, которые могут успешно создавать иллюзию 3D изображения. Поскольку сегмент голограммы заменяется на искусственную вкладку (hogel) с дискретным количеством векторов индикатрисы излучения, дискретность представления векторов излучения порождает проблему дискретного параллакса. Искусственная конструкция хогеля с размерами на порядки превышающими периоды классической голографической решётки неминуемо приводит к снижению на столько же порядков пространственного разрешения в восстановленном изображении. Кроме того, дисплеи светового поля в

восстановленном изображении содержат конфликт конвергенции и аккомодации (А–С противоречие).

Наибольшее распространение в настоящее время получили различные варианты дисплеев «светового поля», которые управляются меньшими информационными потоками, чем классические голографические.

Среди всех методов сжатия 3D информации недостаточно внимания уделяется естественным, физическим методам, основанным на всех видах зрительного восприятия объёма. Важно, чтобы все эти виды восприятия объёма не противоречили друг другу, например конвергенция давала то же расстояние до точки изображения, что и аккомодация (А–С противоречие). В противном случае в системах обработки (мозг человека или электронный блок обработки) будут происходить сбои. Дисплеи светового поля обеспечить непротиворечивое по этим признакам 3D изображение не могут.

Многообразие их технических реализаций не закрывает того факта, что у всех голографических дисплеев сегодня существенно ограничено количество активных пикселей. Для полного голографического TV кадра, конкурирующего по качеству изображения с сегодняшним плоским экраном количество пикселей должно быть увеличено примерно в  $10^3$ – $10^4$  раз, если считать за основу качество стандарта 8K UHD при формировании 256 слоёв глубины.

Изучая обзорные работы, можно видеть, что дискретное пиксельное представление исходно гладкого, непрерывного оптического сигнала порождает много специфических проблем. Это и ограничение максимально достижимой дифракционной эффективности, и особенно специфические шумы. В том числе это и ограничения, связанные с формфактором голограмм сложных изображений [1.138].

Критерии, отделяющие голографическое изображение и формирование изображений в световом поле от мультиракурсных изображений, – это наличие непрерывного параллакса на большом поле экрана и большая глубина изображения. Эти три параметра качества необходимы для создания естественных условий просмотра, что и является конечной целью дисплеев при отображении.

Ориентировочно такие параметры можно достигать при количестве пикселей на дисплее свыше  $10^{11}$ . К этим параметрам необходимо добавить быстродействие системы.

Первым требованием для удовлетворения этих параметров будет панель дисплея с размером пикселя, близким к 1 мкм. Причём пиксель неправильной формы будет лучше передавать изображение за счёт устранения ложной дифракционной картины [1.131], поскольку регулярное попиксельное представление непрерывного сигнала при определённых параметрах может порождать в области восстановленного изображения артефакты, отсутствовавшие на момент синтеза цифровой голограммы (см. главу 2).

Все эти требования входят в противоречие с предельными технологическими возможностями производства голографических дисплеев известных типов. Поэтому выходом из сложившегося положения может быть как появление принципиально новых технологий производства дисплеев сверхбольшого разрешения и размеров, либо многократная мультипликация уже известных типов дисплеев. Последняя сегодня требует объединения более 100 дисплеев, что в принципе возможно, но требует значительной работы по их синхронизации и оригинальных оптических решений, чтобы такое устройство не занимало неприемлемо большого объёма в помещении.

Из новых путей поиска технологий обращают на себя внимание появляющиеся технологии метаповерхностей, в которых можно получать свечение отдельных точек микронных размеров [1.171], увеличивая плотность записи информации. В [1.173] показано, что метаповерхность, как появляющееся многофункциональное устройство, может управлять фазой, амплитудой, поляризацией и резонансными свойствами электромагнитных полей, открывая альтернативу компактной голографической структуре и высокому качеству изображения. Эти функциональные возможности включают разработку на основе модуляции фазы и амплитуды действующих динамических голографических дисплеев, однако они сегодня ещё в большей степени страдают недостаточностью размеров экрана и слабой разработанностью систем управления,

мультиплексирования по поляризации, мультиплексирования по длине волны, Возможно, именно за ними, в этой быстро развивающейся области исследований, серьёзные перспективы на ближайшее будущее.

Также есть работы, проливающие надежду на использование в динамических голограммах фотополимеров, управляемо динамически изменяющих свой показатель преломления [1.162, 1.163, 1.174]. Однако в этих и, возможно, других направлениях ещё слишком мало сделано для уверенного прогноза.

Как справедливо отмечается в [1.158], проецирование голографических 3D изображений большого размера с широким углом обзора, непрерывным параллаксом, с необходимой скоростью видеопотока, а также с полным набором цветов требует огромного количества данных. Приводящиеся оценки авторов, о том, что для длин волн зелёного (532 нм) и синего (450 нм) света необходимое количество пикселей составляет  $10^{10}$  и  $1.4 \times 10^{10}$  соответственно, близки по порядку величины к нашим. Таким образом, чтобы получить скорость передачи насыщенных цветов (объединённых RGB-каналов) хотя бы 30 кадров/с, производительность нужно увеличить примерно до  $4 \times 10^{11}$  пикселей в секунду. Понятно, что если размер голограммы, угол обзора и частота кадров увеличатся, то требуемая скорость передачи данных существенно превысит эти значения.

Следует обратить внимание на технологию, использующую для синтеза голограмм карту глубин голографируемой картины совместно с текстурой этой поверхности. Действительно, она позволяет значительно сжать объёмы информации для представления 3D голографической информации [1.175]. Исследования в этой области зачастую опираются на другую технологию – на готовые времяпролётные камеры (ToF), которые не позволяют создавать достаточно точные карты малых перепадов глубины. Сколь-нибудь существенные преимущества ToF технологии при передаче 3D голографической информации в доступной литературе не раскрыты, а по разрешающей способности они существенно уступают технологии структурированного света.

В главе 2 настоящей работы метод структурированного света в одной из простейших своих реализаций, как метод прямых, латеральных полос развивается как альтернативный метод передачи голографической информации, позволяющий существенно сжать передаваемое голографическое изображение. В [1.94] объясняются преимущества такого подхода. Одновременно обсуждаются принципиальные ограничения метода и пути ослабления их влияния. Приводятся экспериментальные результаты что уже само доказывает реальную возможность передачи 3D динамических голографических изображений по обычному радиоканалу [1.176].

Нельзя забывать, что при создании компьютерно-синтезированных цифровых голограмм существуют проблемы, преодолеть которые можно только увеличением числа дискрет на поле голографического монитора. К ним относится, например, появление артефактов в восстановленном голограммой изображении. Кроме того, артефакты возникают и при синтезе самой голограммы, что реже обсуждается в работах по синтезу голограмм. Эти вопросы будут обсуждаться более подробно в главе 2 настоящей работы. Также как уже упоминалось выше, значительные ограничения на энтропию создаваемых голографическим дисплеем 3D изображений накладывают ограничения, связанные с формфактором. Такие ограничения проявляются во всех типах фазовых голограмм как в классических голограммах, так и в компьютерно-синтезированных. Их анализ проводится в четвёртой главе настоящей работы.

Метод построения глубин на основе времяпролётных камер (ToF) достаточно груб в силу ограниченности частот работы системы обработки отражённого объектом излучения и не может давать карту глубин с точностью до сантиметров, хотя в портретной голографии мы ожидаем представления пространства, отличающего вариации глубины человеческого лица и это миллиметры и доли миллиметров.

Также следует отметить, что в настоящей работе не рассматриваются методы регистрации волнового фронта методами мультиэкспозиции, известным примером которых является цифровая голография со сдвигом фазы [1.75], где

даже чисто теоретически требуется не менее трёх экспозиций, чтобы однозначно восстановить комплексные амплитуды поскольку они уступают предложенному в главе 2 методу как по количеству требуемых кадров, так и потому, что они обнаруживают значительные трудности при регистрации динамических изменений объектного поля. Реально же, для повышения устойчивости к шуму, вызванному динамическими изменениями объектного поля в рамках голографии со сдвигом фазы, нужно сделать намного больше экспозиций. В [1.76] отмечается, что такие методы не могут легко уловить динамические явления, что пока ограничивает область их применения, хотя успешное развитие такой технологии уже демонстрируется в исследовательских задачах [1.126].

### **Обсуждение основных результатов главы 1**

Технология 3D голографических мониторов ещё недостаточно развита для применения, но интенсивность проводимых в этой области разработок очень велика, что позволяет рассчитывать на успехи в не очень отдалённом будущем.

Большая часть предыдущих исследований в области голографических систем отображения была сосредоточена на аппаратных задачах, а именно на проектировании и разработке соответствующих оптических и электронных технологий. Примеры включают широкополосные пространственные модуляторы света (SLM) и специализированную оптику [1.20, 1.21]. Однако основанные на них современные голографические дисплеи ещё не предлагают разрешение и угловое поле обзора (FoV – Field of View), достаточное для приемлемого визуального качества. Это может скоро измениться, хотя для этого ещё предстоит преодолеть значительные технологические препятствия.

Один из ключевых вопросов разработки 3D голографических мониторов – это обеспечение загрузки таких 3D мониторов высокоскоростным голографическим потоком данных, до 300÷500 Гб/сек. и выше. С этой целью необходимо решить задачу передачи 3D голографической информации с

необходимым пространственным разрешением не хуже, чем в TV высокой чёткости, с непрерывным параллаксом и большой глубиной изображения и с принятой в TV стандартах частотой кадровой развёртки.

Формирование потока 3D голографической информации лучше осуществлять на приёмном конце канала связи, обеспечивая её исходными данными в формате двух 2D потоков основных модальностей 3D сцены – карты глубин и текстуры поверхности.

Это определяется тем, что большая информационная ёмкость голограмм не позволяет надеяться на передачу голографической информации без существенного её сжатия. Информационный поток для передачи 2D цветного RGB фильма с пространственным разрешением Full HD и глубиной яркости в 256 градаций серого, при частоте 25 Гц, в случае отсутствия сжатия, составляет около 155 ГБ/сек. Для передачи такого контента в двоичном коде потребуется канал с шириной спектральной полосы свыше 1,2 ГГц, что сегодня может быть обеспечено 5G сетями связи. В случае передачи голографической 3D информации с тем же качеством изображения, как Full HD и глубиной 3D изображения в 256 слоёв, потребуется канал с шириной полосы пропускания на два с половиной порядка больше, т. е. свыше  $3 \cdot 10^{11}$  Гц и каналы 5G в принципе с таким потоком данных справиться не смогут. Более того, это технически невозможно, поскольку перекроет весь доступный человечеству радиодиапазон. Один кадр в таком контенте содержит 6,2 МБ, что эквивалентно одной голограмме, имеющей разрешение 3 мкм, с размером всего 450 мм<sup>2</sup>, или 21×21 мм<sup>2</sup>. Голограммы такого размера без дополнительных преобразований оптического сигнала не пригодны для прямого наблюдения 3D объектов. Необходимое разрешение 3D изображения нужного размера в сочетании с частотой видеокадров, необходимой для динамической видеоголографии, может потребовать скорости передачи данных в терабайтах в секунду в случае отсутствия эффективных методов сжатия. Поэтому особенно актуальным остаётся [1.21] и по сегодняшний день поиск эффективных методов представления 3D контента.

Анализ достоинств и недостатков цифрового представления голограмм показывает их очевидные достоинства и недостатки. Цифровые методы расширяют возможности голографии, в частности позволяют отделять информационное пространство 3D восстановленного голограммой сигнала и условия его дифракции в нужном направлении, т. е. сепарации пучков  $+1$ ;  $0$ ;  $-1$  порядков дифракции. Также, что очень важно, цифровые методы дают возможность выделять некоторый ненужный контент из сообщения, как, например, несущую пространственную частоту, возвращая её на место в конце обработки сигнала, что будет показано в главе 2. Однако, цифровые методы приносят свои специфические проблемы, решение которых «в лоб» на сегодня не представляется возможным. Это, прежде всего, большие объёмы данных, малые размеры существующих цифровых голограмм и их специфические шумы [1.177].

Также представляет проблему преобразование виртуальной голограммы в реальную, способную динамически преобразовывать восстанавливающий пучок в 3D изображение объекта. Тема создания динамических голографических мониторов напрямую не входит в задачи, поставленные в настоящем исследовании, однако представляет интерес, как ближайшая смежная область исследований. Полученные в настоящем исследовании ограничения на методы записи – восстановления могут положительно повлиять на развитие отдельных технологий разработки голографических мониторов.

Наличие компенсируемых потерь, таких как как аберрации и некомпенсируемых, таких как резонанс спекл-поля, алиасинг и формфактор, снижает отношение сигнал/шум в восстановленном голограммой изображении и эффективно передаваемую информацию. Последнее может быть учтено как коэффициенты в формуле Шеннона, однако из неё следует, что требование сохранения отношения сигнал/шум увеличивает область пространственных частот, что хорошо видно на примере фурье-голограмм, и проявляется аналогично приведённому К. Шенноном примеру с импульсно-кодовой модуляцией.

В случае развития голографических дисплеев с применением управляемых объёмных полимерных матриц, как было показано на примере работы Blanche и

др. [1.162] из Университета Аризоны, следует учитывать экспериментально обнаруженный эффект резонанса спекл-полей, описаны далее в главе 3. возникающий при записи голограмм сложных изображений как в объёмных по критерию Клейна голографических материалах, так и в тонких голограммах с дифракцией Рамана – Ната, с безынерционным фотооткликом, формируемым прямым образом в процессе записи голограмм за счёт энергии экспозиции и без последующего проявления. В этих условиях возникает резонансное взаимодействие между записанной спекл-структурой фотоотклика голографического материала и спекл-структурой записываемой голограмму волны.

## Выводы главы 1

1. Существует широкий круг научных публикаций, посвящённый разработке аналоговых голограмм, иногда называемых голографическими дисплеями, но в подавляющем большинстве, статических, не передающих динамику развития голографируемого объекта или сюжета. Появляющиеся в последнее время публикации по разработке компьютерных голограмм являются первым шагом к созданию динамической голографии и её использованию в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений.

2. В литературе отражены основные применяемые сегодня технологии представления объёмных изображений, прежде всего, *волюметрической*, технологии *микроробоев*, *Pleno* и *дисплеев светового поля*. Все они не обладают возможностью воспроизводить динамический 3D объект в соответствии со всеми типами восприятия человеком объёма. Наиболее совершенными из них являются дисплеи светового поля. Но и они имеют так называемое А–С противоречие между двумя основными методами восприятия человеком объёма – аккомодацией (А) и конвергенцией (С), что в значительной мере ограничивает их применение. Только голографическое представление 3D сигнала обеспечивает

непротиворечивое восприятие всех необходимых визуальных сигналов, включая аккомодацию, конвергенцию, окклюзию, неламбертовское затенение и параллакс.

3. Проблемы в разработке и создании голографических дисплеев, формирующих динамически изменяющийся 3D видеоряд, в значительной мере объясняются огромным количеством информации, содержащейся в голограмме. Судя по публикациям, они многим авторам кажутся непреодолимыми в силу необходимости использовать канал передачи информации с полосой пропускания радиодиапазона, сравнимого со всем доступным человечеству сегодня или даже ещё большего. Необходим поиск новых методов преодоления этих проблем.

4. В последние годы стали появляться работы по сжатию голографической информации. Зачастую, они основаны на математическом, энтропийном подходе, без учёта специфики физической природы голограмм. Достигнутое разными авторами максимальное энтропийное сжатие, о котором упоминается, как о реализованном, не превышает двух порядков, хотя требуется четыре – пять. Слабое продвижение в этом направлении в последние два десятка лет показывает, что необходим новый подход к проблеме сжатия голографической информации, основанный на физической природе представления 3D информации в голограммах.

5. Наиболее естественные изображения динамически меняющегося живого 3D объекта представлены в рамках технологии ToF и технологии структурированного света. Однако первая, в силу своей физической природы, не обладает достаточным пространственным разрешением в представлении малоразмерных объектов, сравнимых с элементами человеческого лица, что указывает на необходимость поиска других путей регистрации, включая методы структурированного света, удобных для передачи голографической информации по обычным радиоканалам, например 4G или 5G.

6. Известно, что качество принимаемого сигнала определяется типами применяемой модуляции. При этом Шеннон показал, что излишние требования на допустимое отношение сигнал/шум могут привести к существенному уменьшению пропускной способности канала. Это указывает на необходимость

изучения и слабой логарифмической составляющей в формуле Шеннона, отвечающей за параметр сигнал/шум в голографическом изображении. В связи с этим необходимо определить наиболее важные, имманентно присущие голограммам, причины ограничений величины достижимой дифракционной эффективности и при отработке технологических вопросов принять меры по недопущению высокого уровня шумов.

Таким образом, на основании анализа открытых публикаций и выводов, сделанных в этой главе диссертации, были обоснованы цели и задачи настоящей работы (см. введение).

## **ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ПЕРЕДАЧИ 3D ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ ПО КАНАЛАМ СВЯЗИ БЕЗ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕСУЩЕЙ**

Как было видно из обзора работ в первой главе диссертации для достижения поставленной цели необходимо решение ряда задач, отвечающих на актуальные вопросы передачи 3D голографической информации по каналам связи.

Большие объёмы голографической информации, безусловно являющиеся значительным преимуществом в других областях, в области голографического TV и задач 3D дополненной реальности сыграли с разработчиками злую шутку, являясь одним из существенных препятствий передачи голографической информации по каналам связи. Выходом из сложившегося противоречия является либо существенное уменьшение размера голографического изображения, что плохо соответствует задачам дополненной реальности, либо сжатие голографической информации таким образом, чтобы её объём не превышал разумных пределов, т. е. возможностей современных каналов связи 3G и 4G.

В главе проведено исследование информационной структуры голограмм с выделением в ней наиболее информативных участков, путей реализации передачи по традиционным каналам связи потока голографической информации о динамических 3D объектах с TV частотой кадровой развёртки применительно к существующим сегодня высоким стандартам пространственного разрешения в кадре. Также выявлены сравнительные преимущества предложенного метода регистрации 3D голографической информации, использующего основные модальности 3D изображения – текстуру 3D поверхности и карту её высот.

## Параграф 2.1. Способ дистанционного формирования голографической записи

Как было отмечено в выводах параграфа 1.4, критерии, отделяющие голографическое изображение и формирование изображений в световом поле от мультиракурсных изображений, – это наличие *непрерывного параллакса* на *большом поле* экрана и *большая глубина* изображения. Эти три параметра качества необходимы для создания естественных условий просмотра, что и является конечной целью 3D дисплеев. Поэтому в настоящей работе рассмотрена традиционная голографическая технология, отвечающая этим критериям, и добавлением к ним возможности динамической смены 3D изображений с частотой не менее существующих TV стандартов.

Как было видно из обзора работ о дисплеях светового поля и голографических технологий разработки 3D дисплеев, можно схемными решениями высокую частоту смены кадров разминать на результирующую площадь 3D монитора, состоящего из отдельных 3D голографических субэкранов [1.161] путём их объединения в один общий экран, или обратно, уменьшая диапазон пространственных частот в кадре ( $W_x$  и  $W_y$ ) поднимать до необходимого уровня частоту кадровой развёртки  $\nu$  [1/с]. Поэтому критерием удачного решения технологического процесса передачи и воспроизведения 3D информации является производительность, определяемая выражением (1.8), умноженным на частоту смены кадров (2.1).

$$C[\text{бит/с}] = S \cdot W_x \cdot W_y \cdot \left(\frac{\theta}{10}\right) \cdot \nu [1/\text{с}] \quad (2.1)$$

Здесь  $W_x$  и  $W_y$  играют роль не только пространственных частот объекта, но и пространственных частот всей голограммы. Как упоминалось выше, разница между пространственными частотами в голограмме и изображении объекта может быть значительной. Кроме того, она будет сильно зависеть от формы

представления 3D голографического сигнала. Для передачи голограммы это большие значения, перекрывающие весь радиодиапазон, а по предложенному нами в патенте РФ № 2707582 решению [1.94] (см. ниже), опирающемся на представление 3D объёмной картины в виде двух основных характеристик – текстуры поверхности 3D объекта голографирования и формы его поверхности, которую часто называют картой высот, или маской, передаваемый видеопоток данных может быть существенно меньшим.

### 2.1.1. Способы создания карты глубин

Из двух основных способов создания такой карты глубин, методом ToF [1.82–1.84] и методом структурированного света [1.85–1.88], ввиду ряда преимуществ выбран последний. При латеральном освещении 3D объекта паттерном параллельных полос, он образует структуру, напоминающую голограмму, записанную в схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса, рисунок 2.1.

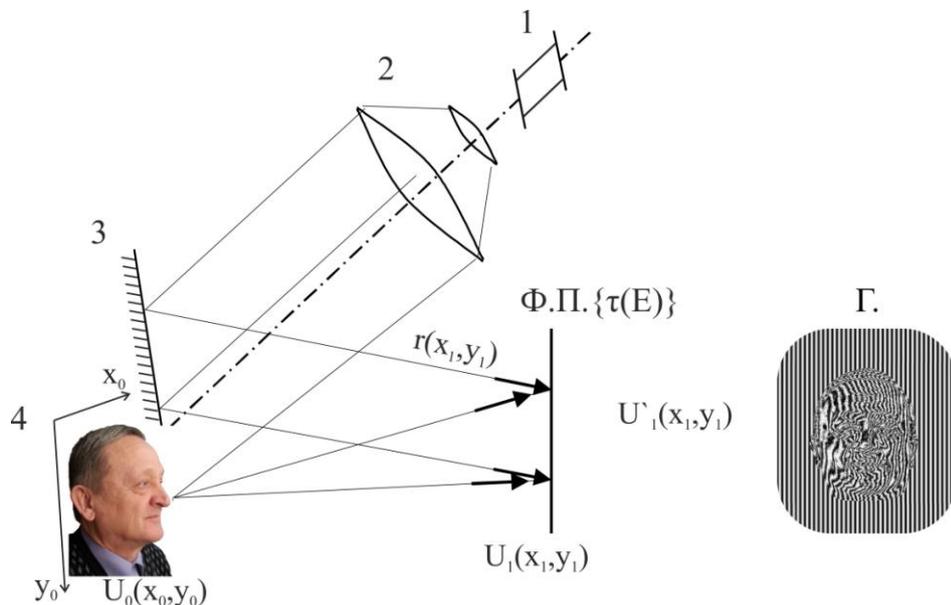


Рисунок 2.1 – а) схема записи пропускающих голограмм Э. Лейта и Ю. Упатниекса, 1 – источник когерентного излучения, 2 – коллимирующая оптика, 3 – зеркальный элемент оптической схемы, 4 – объект голографирования, Ф.П. – фотографический материал или фотоприёмная матрица, Г – голограмма, формируемая интерференционной картиной опорного  $r(x_1, y_1)$  и объектного  $U_1(x_1, y_1)$  пучков света

Метод структурированного света использован нами как более простой и достаточно точно формирующий карту поверхности 3D голографируемого объекта. В отличие от ToF технологии он более точно формирует карту поверхности, регистрируя сантиметровые и миллиметровые вариации глубины, реальных 3D портретных изображений живого, движущегося, человека. Также, как и современная фотография, он обладает достаточным быстродействием, разрешающей способностью и возможностью сразу получать сигнал в цифровом виде. Он опирается на широко распространённую технику и технологию фотографической фиксации искривлённых 3D поверхностью проекций прямых, или любой другой заданной формы, полос и использован нами для макетирования процесса регистрации 3D портрета живого человека в реальном времени. Далее будет показано, что спроектированные на 3D поверхность прямые полосы несут информацию не только о горизонтальном параллаксе, но и о вертикальном. Да и в целом, они являются дифракционными структурами, имеющими существенно сходство с голограммами, работающими в другом, существенно более длинноволновом диапазоне электромагнитного излучения (параграф 4.1).

### ***2.1.2. Способ записи и передачи по каналу связи***

Предложенный способ записи и передачи 3D голографической информации заключается в следующем. Согласно [1.94], голографирование удалённого объекта, передача информации о нём и восстановление голографического изображения выполняется семью блоками (рисунок 2.2).

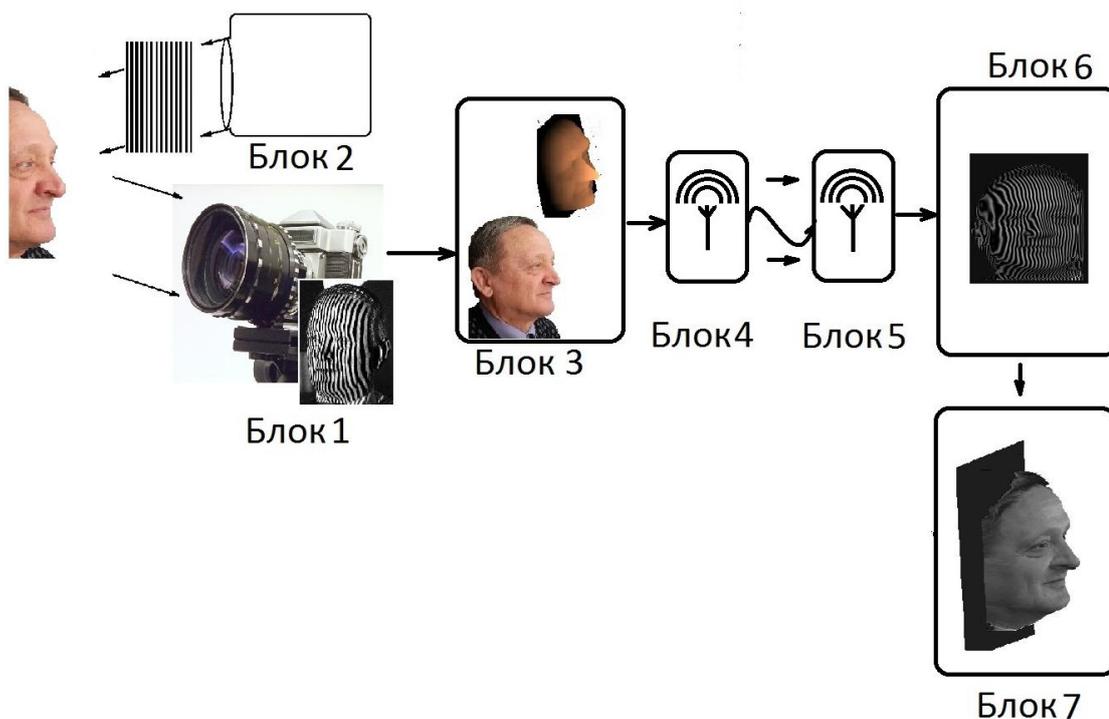


Рисунок 2.2 – Схема формирования двух 2D изображений с информацией о текстуре объекта голографирования и его карте поверхности (маске)

**Первый блок** (рисунок 2.2) представляет собой одну фотокамеру, снимающую в белом свете объект, или две фотокамеры для лучшего исправления окклюзии. В первом блоке создаётся три 2D кадра на каждый создаваемый в дальнейшем 3D кадр. Первый 2D кадр представляет собой обыкновенную фотографию с любым необходимым фотографическим разрешением, (рисунок 2.3) или два кадра, подобных стереопаре. Второй и третий кадры делаются после проекции на объект голографирования картины латерально падающего структурированного света из параллельных полос.



Рисунок 2.3 – Исходное фотографическое изображение объекта

**Второй блок** представляет собой устройство, которое создаёт и проецирует на объект голографирования эту картину латерально падающего структурированного света из параллельных полосных полос, которая подобна интерференционной решётке с заданным периодом (рисунок 2.4) или структуру с более сложным рисунком.

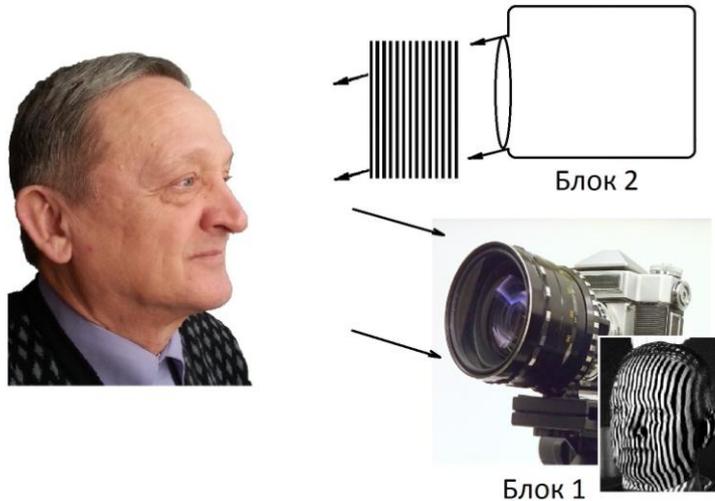


Рисунок 2.4 – Система проектирования картины латерально падающего структурированного света из параллельных полос

При этом обе фотокамеры, или одна стереокамера регистрируют ещё два 2D кадра – изображения объекта со спроецированными на него интерференционными полосами (рисунок 2.4).

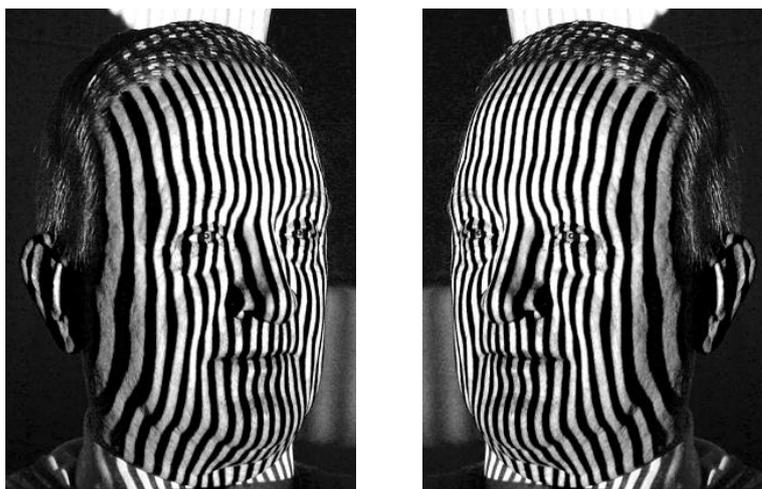


Рисунок 2.5 – Два кадра изображения объекта с наложенной на него проекцией латерально падающего структурированного света из параллельных полос

**Третий блок** представляет собой накопительно-вычислительную систему, при каждом акте съёмки объекта обрабатывающую три кадра. Первый кадр или пара кадров в изопроекции представляют собой фотографию текстуры объекта с необходимым разрешением (рисунок 2.3). Второй – фотографию объекта вместе с латерально спроецированными на него интерференционными полосами под углом слева, а третий – под углом справа (рисунок 2.5). Указанная система полос не обязательно должна иметь частоту, сравнимую с голографической в видимом диапазоне длин волн, поскольку поверхностный рельеф (глубина деталей изображения) определяется стереоскопической системой зрения с точностью на порядки меньшей, чем длина волны видимого излучения. О мелких деталях поверхности мы судим по мелким деталям текстуры. Например, мы не видим глубину морщинок на лице, но видим их форму на поверхности лица. В нашем случае достаточно проецировать на объект полосы с частотой, соответствующей терагерцовому диапазону длин волн, или даже СВЧ радиодиапазону с периодом, определяемым структурой поверхности объекта. Практически, для передачи топографической поверхности лица человека достаточно создавать картину структурированного света из вертикальных полос с периодом от долей миллиметров (что соответствует терагерцовому диапазону) до сантиметров (СВЧ).

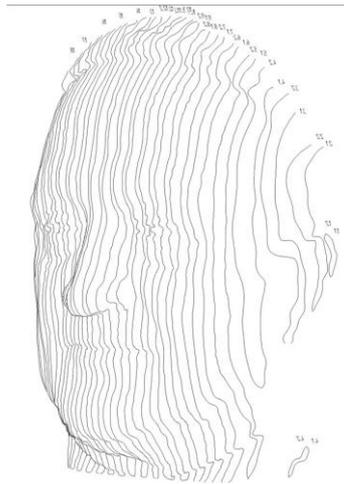


Рисунок 2.6 – Выделенная система искривлённых полос, характеризующая форму 3D поверхности объекта голографирования с необходимой точностью

Из полученных фотографий с наложенными на изображение полосами выделяется система искривлённых в соответствии с топографией объекта (рисунок 2.6). По величине смещения полос вычисляется двумерный массив данных о глубинах поверхностного профиля в каждой точке поверхности объекта (рисунок 2.7).



Рисунок 2.7 – Карта высот объекта представлена в градациях серого

Размер регистрируемой точки в таком изображении существенно больше, определяемого по выражению (1.1) и определяется не дифракционным пределом, как в голограмме, а разрешающей способностью объектива и фотоприёмной матрицы фотоаппарата. Количество же информации в регистрируемом массиве точек изображения существенно меньше, чем содержится в голограмме

оптического диапазона и, согласно (1.2), сравнимо с информацией терагерцовой и даже СВЧ голограммы. Однако зрительное разрешение деталей, определяемое разрешением фотографии с текстурой объекта, вполне удовлетворяет требованиям высококачественного зрительного восприятия. Таким образом, осуществляется сжатие голографируемой информации, необходимое для её передачи по каналу связи без наличия зрительно воспринимаемых ограничений качества 3D изображения. В **третьем блоке** вычислительная система формирует двумерный массив фотографического изображения объекта (рисунок 2.3) и отдельно двумерный массив поверхностного профиля объекта (маски) (рисунок 2.8) для **блока 4** (рисунок 2.2).

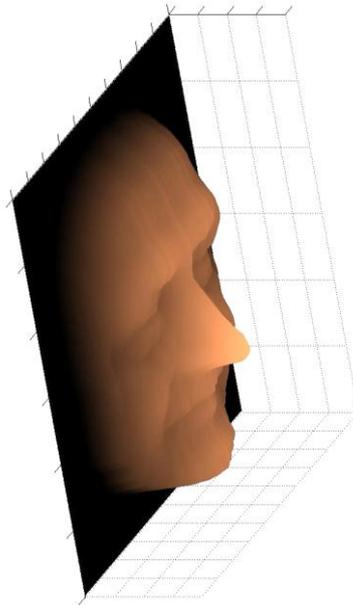


Рисунок 2.8 – Поверхностный профиль объекта или его карта высот (маска)

Оба этих массива передаются по каналу связи (например, по радиоканалу) с передающего конца (**блок 4**) на приёмный (**блок 5**). На приёмном конце канала связи находятся **блок 6** и **блок 7**. Шестой представляет собой блок синтеза виртуальной голограммы (рисунок 2.9) по фотографическому изображению и маске.



Рисунок 2.9 – Синтезированная на приёмном конце канала связи голограмма 3D объекта

Такая синтезированная голограмма эквивалентна обычной голограмме. У неё высокое качество фотографического изображения (текстуры) объекта и допустимо меньшее или такое же фотографическое качество поверхности маски (топографической карты объекта). Суммарное количество информации, передаваемой по каналу связи, при этом, не превышает количество информации, содержащееся в трёх фотографиях, что на много порядков меньше объёма информации, содержащегося в одной классической голограмме. Следует отметить, что такой паттерн структурированного света из латерально освещающих 3D объект параллельных полос (рисунок 2.6), как будет доказано в параграфе 4.1, сам является дифракционной структурой, обладающей свойством голограммы. При его освещении восстанавливающей волной возникают три порядка дифракции, один из которых формирует восстановленной 3D изображение объекта, как и сама голограмма, хотя и работающая в другом диапазоне электромагнитного излучения. **Седьмой блок** представляет собой голографический дисплей (рисунок 2.10), который по полученной из **блока 6** виртуальной голограмме электронным образом формирует виртуально ту же структуру интерференционных полос (компьютерную голограмму), что и аналоговая голограмма объекта. Такая структура голографических интерференционных полос может быть сформирована для любой схемы голографирования, например для схемы Лейта – Упатниекса (рисунок 2.10).

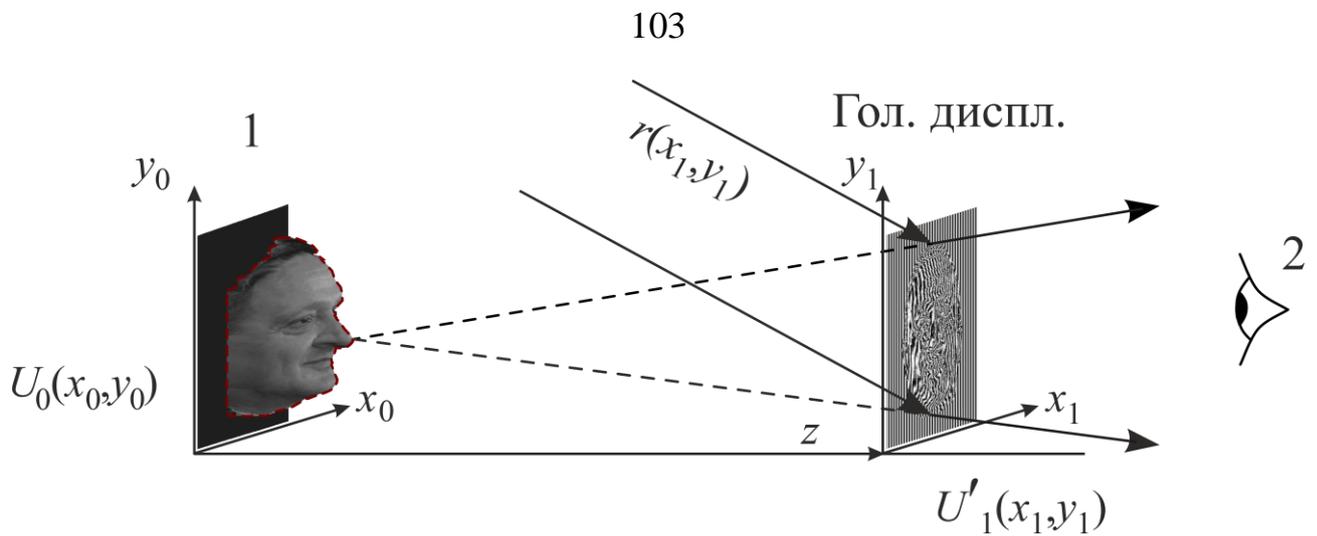


Рисунок 2.10 – Принципиальная схема голографического дисплея

При освещении этой структуры когерентным излучением видимого диапазона формируется традиционное 3D голографическое изображение. Для передачи цвета используем любой из видов цветного кодирования. Например, в RGB кодировании фотографическое изображение передаём в трёх цветах, как бы тремя слоями, а маску передаём четвёртым кадром (четвёртым слоем).

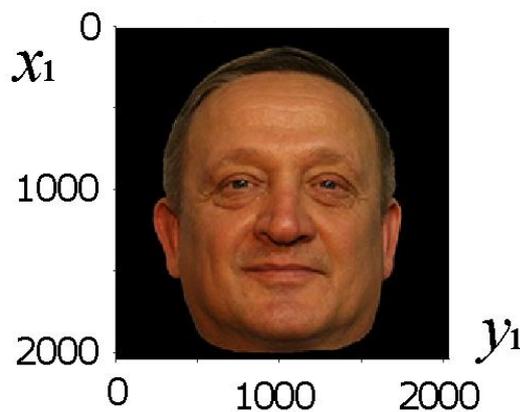


Рисунок 2.11 – Возможность восстановления 3D RGB изображения

Варианты соответствующих оптических схем восстановления представлены в различных обзорах по разработке голографических 3D мониторов, некоторые из них приведены в [1.130, 1.133] и других работах. Мы, за неимением голографического монитора, будем пользоваться представлением полученных 3D кадров в виде виртуальных 3D массивов и в виде их проекций на плоскость обычных 2D компьютерных мониторов.

Это может происходить и в режиме «online», создавая эффект присутствия как в устройствах дополненной реальности, так и в устройствах 3D телевидения (рисунок 2.12)

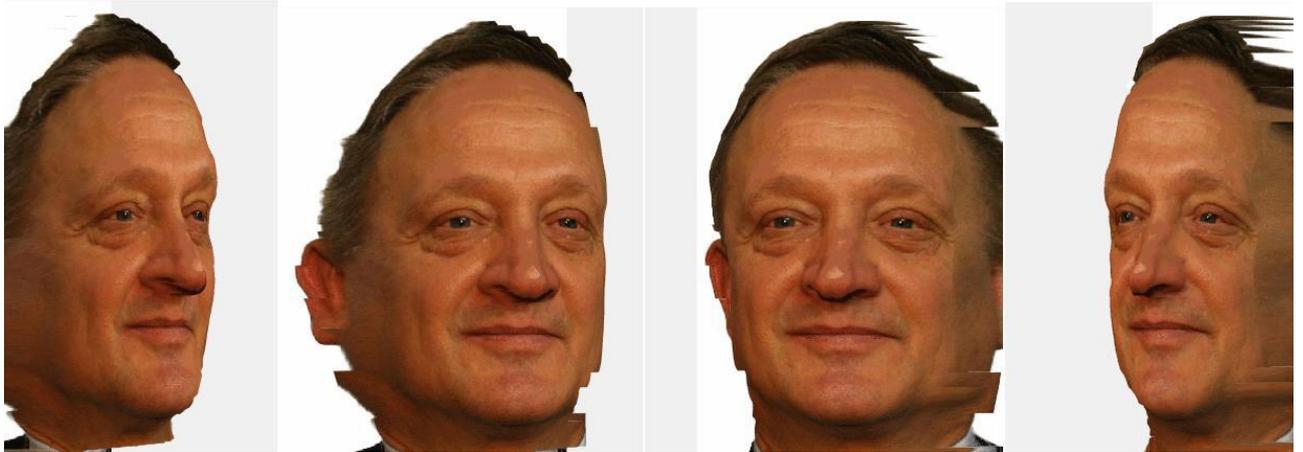


Рисунок 2.12 – Четыре проекции 3D изображения, синтезированного по двум двумерным картинам – картине текстуры и картине топографии поверхности

Особенный интерес представляет использование предложенного метода для построения поверхностей, невидимых в световом диапазоне видимого спектра,

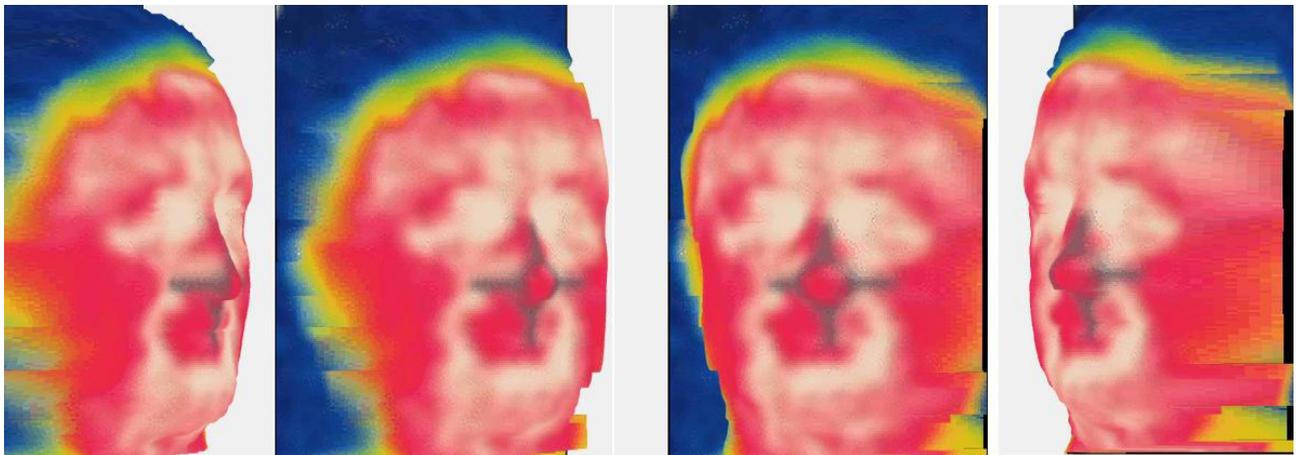


Рисунок 2.13 – Четыре проекции 3D ИК изображения, синтезированного по двум двумерным картинам – картине ИК текстуры и ИК картине топографии поверхности

наблюдаемых в ИК, или даже радиодиапазоне. Примером являются задачи радиовидения, тепловизионного видения и даже видения в терагерцовом диапазоне электромагнитного излучения.

На рисунке 2.13 приведены первые голографические изображения, восстановленные компьютерными голограммами, синтезированными по файлам текстуры и топографической карты глубин (маски) в ИК диапазоне электромагнитного спектра. Причём возможны различные комбинации области спектра, в которых регистрируется текстура поверхности и топография поверхности объекта. Например, комбинация, когда текстура регистрируется в видимом диапазоне, а топография поверхности в радиодиапазоне, что удобно в задачах навигации при посадке воздушного судна. А текстура в ИК диапазоне при топографии в видимом диапазоне удобна в медицине. Также подобные комбинации возможны для создания систем синтеза ИК-изображений и различных устройств тестирования и распознавания [2.1].

### *Обсуждение*

Предложенный в патенте РФ № 2707582 [1.94] способ содержит следующие возможности реализации 3D голографического вещания: замена передаваемого контента из 3D потока данных на два потока 2D данных из двух модальностей (текстура + маска) 3D динамического изображения для синтеза компьютерных голограмм на приёмном конце канала связи.

Такой способ синтеза компьютерных голограмм заключается в моделировании освещения 3D объекта, виртуальном синтезе интерференционной картины по рассеянному им излучению вместе с излучением опорного пучка. С целью формирования голограммой 3D изображения на удалении от места расположения объекта голографирования, на приёмный конец канала связи передаётся вся необходимая для восприятия 3D объекта информация о нём. Предложено использовать для передачи информации о карте высот 3D объекта известный метод структурированного света. Для этого объект голографирования латерально освещают светом со сформированными заранее интерференционными или сформированными другим способом полосами, чей период соответствует

инфракрасному диапазону или более длинноволновому диапазону электромагнитного излучения, в зависимости от требований точности передачи топографической карты объекта. По искривлениям этих полос получают карту высот, на которую накладывают текстуру, полученную фотографированием объекта. Затем передают эти два изображения (фотографию и топографическую карту) на расстояние по любому каналу связи, в том числе и по радиоканалу, с последующим соединением этих двух изображений в объёмное 3D изображение объекта на приёмном конце линии связи. Оно используется в качестве виртуального объекта при синтезе компьютерной голограммы, состоящей из полос интерференции между компьютерно-синтезированным объектным пучком, содержащим 3D виртуальное изображение объекта и компьютерно-синтезированный опорный пучок. После отображения (записи) полученной таким образом голограммы на материальный носитель, последняя при освещении материальным эквивалентом опорного пучка восстанавливает голографическое изображение, воспринимаемое зрительно как обычное голографическое 3D изображение.

Этот же способ характерен тем, что фотофиксированное изображение спроецированных на поверхность голографируемого объекта как интерференционных, так и сформированных другими способами полос, само представляет дифракционную структуру, на которой может дифрагировать свет, аналогично дифракции на голограмме, хотя и записанной на большей длине волны, сравнимой с периодом спроецированных на объект голографирования полос и поэтому такая структура похожа на голограмму. Число полос можно менять, например, медианной интерполяцией нескольких полос между каждыми двумя уже существующими, тем самым изменяя расстояния между ними и создавая дифракционную структуру, создающую картину дифракции в видимом свете, аналогично голограмме.

Очевидно, что при условии, когда фотографирование и создание топографической карты объекта происходит регулярно с необходимой частотой смены кадров (достаточной частотой кадровой развёртки), создавая

последовательность 3D изображений, так же регулярно передаваемых на приёмный конец линии связи, где создаётся последовательность дифракционных структур, аналогично голограммам, воспроизводящим последовательность 3D изображений. В этом случае реализуется голографическое кино, или голографическое телевидение.

Передача двух кадров по радиоканалу успешно конкурирует с методами мультiekспозиции [1.75], которые плохо работают в случае динамических изображений [1.76].

### **Выводы параграфа 2.1**

Предложенный способ дистанционного формирования голографической записи является принципиально голографическим, а, значит, в его рамках могут быть достигнуты три параметра требуемого качества 3D изображения – непрерывный параллакс, большая глубина и площадь отображаемого пространства. Это и является конечной целью проектов по созданию 3D TV и 3D дополненной реальности.

### **Параграф 2.2. Спектральный состав голограммы и голографического изображения**

В настоящем параграфе в приближении скалярной теории дифракции для случаев записи амплитудных и фазовых (объёмных и тонких) голограмм приводится методология описания голографических процессов на языке пространственных частот, результаты численного анализа спектральных свойств текстуры и маски на примере реального 3D портретного изображения человека и основные выводы о реализуемости способа и проблемах, встречающихся на этом пути.

При передаче любых изображений встаёт вопрос об эффективности использования канала связи. Для двумерных сигналов наиболее популярностью сегодня пользуется сжатие изображений в формате JPEG, введённое в массовый оборот экспертной группой «объединённые фотографии» [1.104]. В нём используется косинусное преобразование Фурье и некоторые специальные блоки для сжатого представления слабо меняющихся по полю сигналов. Для представления 3D сигнала будем использовать описанную в предыдущем параграфе 2.1 модель, состоящую из текстуры и карты глубин (маски) 3D объекта. Как утверждалось выше, спектры объекта и голограммы могут существенно отличаться, что требует более детального анализа, поскольку необходимо определить нужный для передачи голографического сигнала диапазон пространственных частот.

Однако стоит подробнее выяснить какой спектр пространственных частот объектов является избыточным, а какой нет. Эта тема «достаточности детализации объекта» является очень важной и слабо раскрыта в обзорах [1.104].

Чтобы определить какой спектр частот содержит голограмма и какое место в нём занимают спектры объекта голографирования в виде текстуры и карты глубин, обратимся к истокам – к основным формулам голографии [1.8–1.11].

Ввиду отсутствия на сегодняшнем уровне техники возможности материальной реализации синтезированных цифровых объёмных отражательных голограмм по схеме Ю. Н. Денисюка [1.8, 1.9], рассмотрим классическую схему записи пропускающих аналоговых голограмм в схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса [1.10, 1.11], представленную на рисунке 2.14.

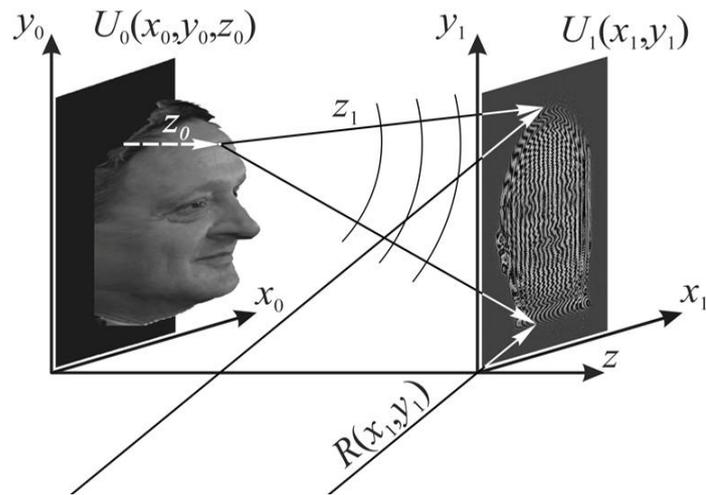


Рисунок 2.14 – Схема записи пропускающей амплитудной голограммы Лейта и Упатниекса.  $U_0(x_0, y_0, z_0)$  – амплитуда рассеянного когерентного излучения объекта,  $U_1(x_1, y_1)$  – его значения в плоскости голограммы,  $R(x_1, y_1)$  – амплитуда опорного пучка в плоскости голограммы,  $z_0$  – глубина объекта в точке  $(x_0, y_0)$ ,  $z_1$  – расстояние от произвольной точки  $(x_0, y_0, z_0)$  на поверхности объекта до произвольной точки  $(x_1, y_1)$  на голограмме

Одной из ранних работ, по изучению особенностей дифракции света на 3D объектах, известны работы [2.2], в которых исследованы в аналитическом виде особенности формирования в дифракционно-ограниченной проекционной системе изображения объёмного асимметричного абсолютно поглощающего края – основного фрагмента толстых пластин постоянной толщины, что авторами предлагается использовать применительно к размерному контролю 3D-объектов. Представленный в работе анализ дифракции на передней и задней грани такого объекта может быть интересен в задачах размерного контроля, однако не даёт ответа на вопросы дифракции на 3D телах более сложной формы.

### **2.2.1. Фотоотклик голограммы**

В скалярном приближении теории дифракции интерференционная картина в плоскости голограммы описывается сложением амплитуд опорного и объектного пучков:

$$I(x_1, y_1) = |U_1(x_1, y_1) + R(x_1, y_1)|^2. \quad (2.2)$$

При записи такой интерференционной картины на фоточувствительный материал высокого разрешения возникает переменный по полю голограммы фотоотклик  $\Delta\psi(x_1, y_1)$ . Для случая амплитудного отклика это изменение пропускания материала  $\tau(x_1, y_1)$ , а для фазового отклика это изменение эйконала  $\Delta\varphi(x_1, y_1)$ , возникающего либо за счёт изменения локальной толщины по полю голограммы  $\Delta l(x_1, y_1)$ , либо переменного по полю голограммы показателя преломления  $\Delta n(x_1, y_1)$ , либо комбинацией всех трёх механизмов в пропорции, определяемой собственными физико-химическими свойствами голографического материала [2.3]. Следует отметить, что отклик фотоматериала практически всегда нелинеен из-за ограниченного числа молекул фоточувствительного материала в матрице голограммы и чаще всего имеет экспоненциальный вид [2.4].

$$\Delta\psi(G(x_1, y_1)) = \psi_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{G(x_1, y_1)}{G_0}\right) \right], \quad (2.3)$$

где

$$G(x_1, y_1) = \int_0^{\tau} I(x_1, y_1) dt. \quad (2.4)$$

При малых экспозициях (2.4) заменяется на произведение интенсивности засветки на время экспозиции, а фотоотклик становится практически линейно зависимым от интенсивности (2.5).

$$G(x_1, y_1) \sim I(x_1, y_1) \quad (2.5)$$

Существует два типа фотоотклика – амплитудный и фазовый. Амплитудный формируется за счёт изменения поглощения фотоматериала, фазовый – за счёт изменения его толщины, или показателя преломления. Известно три основных

вида голографических решёток [2.3], это поглощающие решётки, в которой фотоотклик  $\tau(x_1, y_1)$  формируется в виде изменения коэффициента пропускания и при малых экспозициях имеет вид (2.6):

$$\tau(x_1, y_1) = G(x_1, y_1) \sim I(x_1, y_1), \quad (2.6)$$

а также фазовые пропускающие и отражательные решётки, в которых фотоотклик формируется за счёт изменения оптического пути (эйконала) [1.15], определяемого в простейших случаях (в отличие от описываемых в параграфе 1.2 и в главе 3 настоящей работы) произведением локальных изменений показателя преломления на толщину или произведением показателя преломления на локальные изменения толщины. Дифракция в таких голограммах может быть сведена к двум предельным случаям: к режиму дифракции Рамана – Ната (для тонких решёток) и Брэгга (для объёмных решёток). Аналитическую зависимость дифракционной эффективности тонких решёток впервые показали С. V. Raman и N. S. N. Nath в работе [2.5], в честь которых и был назван данный режим дифракции. Для объёмных решёток данную зависимость получил Когельник в работе [1.66]. В данной работе Когельник применяя модель связанных волн разработал теорию дифракции света на трёхмерных голограммах с простой голограммной структурой, образованной двумя плоскими волнами, и не только качественно оценил, но и выразил количественно такие важные характеристики голограмм, как зависимость дифракционной эффективности от глубины модуляции коэффициентов преломления и поглощения света, толщины слоя голограммы, направления опорных и объектных пучков при получении голограммы. Для каждого режима дифракции можно ещё выделить режим дифракции на пропускание и отражение. Для всех этих режимов определены аналитические зависимости дифракционной эффективности  $\eta$  дифракционного порядка с номером  $m$  от параметров решётки ( $\Delta\varphi$  – модуляция фазового набега,  $\Delta n$  – модуляция фазы,  $\Delta d$  – модуляция толщины,  $L$  – локальные значения периода голографической решётки) и длины волны падающего света –  $\lambda$  [1.62, с. 343]:

Режим дифракции Рамана – Ната [1.62, с. 82]:

– на пропускание:

$$\eta_m = J_m^2(\Delta\varphi/2), \quad (2.7)$$

где  $J_m$  – функция Бесселя  $m$ -порядка,  $\Delta\varphi$  – глубина фазовой модуляции решётки (в радианах). В случае поверхностно-рельефной решётки она равна (2.8):

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)\Delta d(n-1), \quad (2.8)$$

а в случае фазовой решётки с модуляцией показателя преломления (2.9):

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(\Delta n \cdot d), \quad (2.9)$$

где  $\lambda$  – длина волны падающего на решётку света,  $\Delta d$  – глубина поверхностного рельефа,  $n$  – показатель преломления материала решётки,  $\Delta n$  – глубина модуляции показателя преломления решётки,  $d$  – толщина слоя отражающей решётки или её глубина поверхностного рельефа  $\Delta d$  (2.10).

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(n \cdot \Delta d) \quad (2.10)$$

– на отражение (2.7), где:

$$\Delta\varphi = (2\pi/\lambda)(2 \cdot \Delta d). \quad (2.11)$$

В режиме дифракции Брэгга  $\Delta\varphi$  – глубина фазовой модуляции решётки определяется глубиной вариации фотоиндуцированного показателя преломления (2.9):

– для пропускающих голограмм дифракционная эффективность минус первого порядка определяется зависимостью (2.12) [1.62, с. 340]:

$$\eta_{-1} = \sin^2(\Delta\varphi/2). \quad (2.12)$$

– для отражающих (2.13):

$$\eta_{-1} = \tanh^2 (\Delta\varphi / 2), \quad (2.13)$$

где  $\tanh$  – гиперболический тангенс.

Не смотря на то, что вывод аналитических выражений для дифракционной эффективности в указанных работах был проведён только для случая интерференции двух плоских равномерных пучков, создающих простые синусоидальные решётки фотоотклика, их результаты можно использовать для описания локальных и интегральных значений дифракционной эффективности в приближении медленно меняющихся по полю интенсивностей интерферирующих объектной и опорной волн.

Рассмотрение зависимости дифракционной эффективности минус первого порядка для нескольких режимов дифракции в зависимости от глубины фазовой модуляции  $\Delta\varphi$  будет использовано в 3-ей главе настоящей работы при определении влияния формфактора на основные характеристики голограмм. Далее, в настоящем параграфе, без ограничения общности получаемых результатов, рассмотрим случай линейного отклика, формируемого в поглощающем голографическом материале, или фотоприёмной матрице, где структура интерференционных полос пропорциональна локальным значениям интенсивности интерферирующих волн (2.6).

### ***2.2.2. Структура голограммы***

Согласно (2.2) можно получить выражение для локальных значений фотоотклика по полю голограммы в линейном приближении (2.14). Множитель перед косинусом представляет собой видность интерференционных полос  $V$ , а под косинусом находится локальная разница фаз объектного  $\varphi_a$  и опорного  $\varphi_r$  пучков.

$$\begin{aligned}
\tau(x_1, y_1) &\sim I(x_1, y_1) = |U_o(x_1, y_1) + R(x_1, y_1)|^2 = \\
&= \{I_o(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)\} \times \\
&\times \left\{ 1 + 2 \frac{\sqrt{I_o(x_1, y_1) I_r(x_1, y_1)}}{I_o(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)} \cos[\varphi_o(x_1, y_1) - \varphi_r(x_1, y_1)] \right\}
\end{aligned} \tag{2.14}$$

Без ограничения общности, для большей наглядности будем считать, что  $\tau(x_1, y_1)$  – коэффициент пропускания, зависящий по полю голограммы от координат, соответственно  $I_o(x_1, y_1)$ ,  $I_r(x_1, y_1)$ ,  $I(x_1, y_1)$  – интенсивности объектного, опорного пучков в плоскости голограммы и суммарная интенсивность в результате сложения амплитуд объектной  $U_o(x_1, y_1)$  и опорной  $R(x_1, y_1)$  волны. Разность фаз объектной волны  $\varphi_o(x_1, y_1)$  и опорной  $\varphi_r(x_1, y_1)$  образует интерференционную структуру на голограмме.

Реально обе фазы меняются в пространстве. В опорной волне часто просто по линейному закону, когда она плоская. А в объектной она формируется сигналом, формируемым излучением, рассеянным голографируемым объектом. В зависимости от расстояния от объекта до голограммы это голограммы сфокусированных изображений, голограммы Френеля или Фраунгофера, что определяется дистанцией Рэлея. Спектр такой голограммы формируется из основной гармоники, имеющей смысл несущей пространственной частоты  $\omega = k \cdot \sin \theta_r$ , равной средней скорости изменения разницы фаз в пространстве (2.14) с девиацией, вызванной формой голографируемого объекта. Глубина модуляции определяется видностью интерференционной картины, т. е. коэффициентом перед косинусом в (2.14). Несущая частота (2.15) определяет угол поворота восстанавливающего пучка при его падении на голограмму,

$$\omega_{x_1} = \frac{\partial \varphi_r(x_1, y_1)}{\partial x_1} = k \cdot \sin \theta_{x_1}; \quad \omega_{y_1} = \frac{\partial \varphi_r(x_1, y_1)}{\partial y_1} = k \cdot \sin \theta_{y_1}, \tag{2.15}$$

а её девиация  $\Omega$  – спектр дифракции волн, формирующих изображение записанного на голограмме объекта.

$$\Omega_{x_1} = \frac{\partial \varphi_o(x_1, y_1)}{\partial x_1} = k \cdot \sin \Delta \theta_{x_1}; \quad \Omega_{y_1} = \frac{\partial \varphi_o(x_1, y_1)}{\partial y_1} = k \cdot \sin \Delta \theta_{y_1}. \quad (2.16)$$

На голограмме формируются пространственные гармоники несущей частоты  $\omega$  с волновым вектором  $k$  и боковые гармоники  $\omega \pm \Omega$  с волновыми векторами  $k \pm \Delta k$ , аналогичные известному в радиотехнике [2.6] фазово-модулированному сигналу.

Они порождают дифракцию восстановленной волны в углы  $\pm \theta_{x_1}$ ,  $\pm \theta_{y_1}$  на структуре голограммы с периодами  $d_{x_1}$ ,  $d_{y_1}$  соответственно. Аналогично, девиация пространственных частот объектной волны порождает решётки с периодами от  $dx_1^{\min}$  до  $dx_1^{\max}$  и  $dy_1^{\min}$  до  $dy_1^{\max}$ .

$$\begin{aligned} d_{x_1} &= \lambda / \sin \theta_{x_1}; & d_{y_1} &= \lambda / \sin \theta_{y_1}; \\ d_{x_1}^{\max} &= \lambda / \sin(\theta_{x_1} - \Delta \theta_{x_1}); & d_{y_1}^{\max} &= \lambda / \sin(\theta_{y_1} - \Delta \theta_{y_1}); \\ d_{x_1}^{\min} &= \lambda / \sin(\theta_{x_1} + \Delta \theta_{x_1}); & d_{y_1}^{\min} &= \lambda / \sin(\theta_{y_1} + \Delta \theta_{y_1}). \end{aligned} \quad (2.17)$$

Таким образом, при освещении восстанавливающим пучком структуры  $\tau(x_1, y_1)$ , восстановленное голограммой излучение имеет основную пространственную гармонику, с периодом  $d_x$ , определяющую угол поворота восстанавливающего пучка, а также две боковых с периодами от  $d_x^{\min}$  до  $d_x^{\max}$ , спектр которых формирует изображение объекта в плюс первом и в минус первом порядках. Угол падения опорной волны  $\theta_{x_1}$  выбирают из соображений необходимости пространственного разделения пучков нулевого и минус первого порядка на заданном расстоянии  $z$  от голограммы (угол  $\theta_{y_1}$  часто выбирают нулевым из соображений удобства), а углы, ограниченные  $\Delta \theta_{x_1}$  и  $\Delta \theta_{y_1}$  определяются пространственным спектром объектной волны. В несколько упрощённом одномерном случае для плоских равномерных по площади их сечения волн спектр (2.14) похож на спектр однотонального сигнала (2.18).

$$U_1'(\omega) = \left[ \begin{array}{l} \delta(\omega) + \\ + (V/2) \cdot \delta(\omega - k \sin \theta_{x_1} \pm \Omega) + \\ + (V/2) \cdot \delta(\omega + k \sin \theta_{x_1} \pm \Omega) \end{array} \right] \quad (2.18)$$

Он представляет собой нулевую гармонику, восстанавливающий пучок  $R_V$  на которой порождает нулевой порядок дифракции с  $\omega = k \cdot \sin(\theta_V)$ , где  $\theta_V$  – угол наклона к оптической оси восстанавливающего пучка, и ещё два пучка – плюс и минус первый, ответственные за восстановление действительного изображения на пространственной несущей  $\omega = k[\sin(\theta_V) - \sin(\theta_{x_1})]$  и мнимого с несущей  $\omega = k[\sin(\theta_V) + \sin(\theta_{x_1})]$ .

Видно, что спектр (2.18) аналогичен спектру радиосигнала с частотной модуляцией, где полезный сигнал с пространственной частотой  $\Omega$  расширяет спектр несущей частоты  $\omega$  вправо и влево по оси пространственных частот. Также в (2.14), присутствует и амплитудная модуляция. Она проявляется в модулировании интерференционных полос коэффициентом видности  $V$ , пространственно расширяющим область нулевой и плюс-минус первой гармоник и зависящим от распределения интенсивностей объектного и опорного сигнала по полю голограммы (2.19).

$$V = \frac{2\sqrt{I_o(x_1, y_1)I_r(x_1, y_1)}}{I_o(x_1, y_1) + I_r(x_1, y_1)} \quad (2.19)$$

Таким образом, хотя есть и некоторые отличия, в целом выражение (2.14) показывает наличие одновременно и амплитудной и фазовой модуляции в спектре записываемой голограммы аналогично амплитудной и фазовой модуляции в радиотехнике. Аналогично можно записать пространственные частоты и для фазовых как отражающих, так и пропускающих голограмм. И хотя выражения для фотоотклика и дифракционной эффективности для случаев (2.7–2.13) будут различными, но спектральное представление, точнее наличие пространственных гармоник в таких голограммах будет практически одинаковым.

Реально, несущая пространственная частота  $\omega$  высока. Она сравнима с обратной длиной волны записи и её период 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 разницы с оценками по (1.2) позволяют рассчитывать на высокую степень сжатия голографической информации при кодировании на одной боковой полосе [2.7] (метод SSB). Традиционный метод строчной и кадровой развёртки с передачей информации о кадре поточечно включает передачу всех пространственных частот голограммы. Избыточность, которая присутствует при прямом кодировании голографического изображения, когда при передаче пространственных частот кодируются все частоты, в том числе и не несущие информацию об объекте голографирования, лежащие между  $\omega=\Omega$  и  $\omega=kx\sin(\theta_{x1})+\Omega$  не оправдана, хотя традиционно рассматривался именно такой метод передачи голографической информации [1.76, 1.100]. Сжатие информации будет тем эффективнее, чем в большей степени будет устранена разница между несущей частотой  $\omega=kx\sin(\theta_{x1})$  и её девиацией  $\Omega=kx\sin(\Delta\theta_{x1})$ , вызванной дифракционной расходимостью объектной волны.

Следовательно, аналогично [2.7] можно организовать передачу не всего фазово-модулированного сигнала со спектром (2.18), представляющего всю голограмму, а только ту её компоненту, которая соответствует боковой полосе (SSB) с пространственными частотами  $\Omega=kx\sin(\Delta\theta_{x1})$ , несущими информацию о текстуре голографируемого объекта и о его карте поверхности, в дальнейшем называемой нами маской. Для этого достаточно иметь фотографию текстуры и созданную любым методом карту поверхности (маску). Мы из соображений простоты не использовали развивающийся сегодня метод ToF, хотя, возможно его развитие и применение в будущем, а остановились на более простом методе структурированного света [2.8]. В параграфе 4.1 будет показано, что этот метод обладает уникальной особенностью, поскольку позволяет создавать голограмму

без использования интегральных преобразований. При значительном сокращении объёма передаваемой информации и сравнительной простоте метода структурированного света появилась возможность записи информации о 3D живом объекте в реальном времени, передаче таких пар кадров по обычному радиоканалу и восстановлении 3D изображения на приёмном конце канала связи путём синтеза голограммы по переданной информации и цифровому внесению в неё несущей пространственной частоты.

Представленный анализ спектров голограмм без ограничения общности можно считать близким спектрам других типов голограмм, чей отклик на экспозицию приведён в (2.7–2.13).

Реальное световое поле, записываемое на голограмме, может иметь разрешение, сравнимое с размером пятна Эйри (1.1), а разрешающая способность человеческого глаза существенно меньше. Следует определить какие ограничения пространственных частот при передаче 3D сигнала допустимы и не дают зрительного восприятия искусственности образа, а какие недопустимы. За основу можно взять готовые результаты из современных TV стандартов. Известно, что высокое качество TV изображений, начиная с Full HD и вплоть до 4K UHD и 8K UHD, обеспечивает практически полное погружение в демонстрируемый сюжет, не отвлекая зрителя на несоответствия изображения на экране и в жизни (см. Приложение Д). Взяв за основу изображения с разрешением  $2000 \times 2000$  пикселей, превосходящем разрешение стандарта 4K UHD, проанализируем спектры текстуры (рисунок 2.3) и маски (рисунок 2.7) из предыдущего параграфа 2.1.2.

Для восстановления изображения на приёмном конце канала передачи необходимо снова ввести несущую частоту. Для этого в патенте РФ № 2707582 [1.94] предлагается на приёмном конце канала связи синтезировать голограмму численными методами.

### 2.2.3. Численное моделирование, спектры объекта и голограммы

Принятая глубина цвета текстуры – 8 бит (256 градаций яркости) создаёт вполне адекватное фотографическое качество поверхности 3D объекта. Описанная в [2.9] технология создания маски методом структурированного света теоретически позволяет реализовывать число слоёв в глубину до размера половины числа дискрет кадра, т. е. в нашем случае до 1000 слоёв. Однако нам не понадобится такое высокое качество и в дальнейшем численном эксперименте оно будет ограничено 256 слоями, по числу слоёв, от которых будет браться преобразование Френеля при синтезе голограммы.

Как верно отмечено в [2.10], несущая частота  $\omega$  голограммной структуры определяется углом между объектным и опорным пучками (рисунок 2.14), а ширина пространственного спектра голограммной структуры ( $\Omega_{max} - \Omega_{min}$ ) определяется угловой апертурой объекта. Однако последнее можно отнести только к идеальным объектам при аналоговой записи на голографический материал высокого разрешения. Если взять реальный сигнал, например амплитудно-модулированный сигнал изображения высокого качества Full HD, то его максимальная пространственная частота ограничивается уже не угловым размером объекта голографирования, а количеством дискрет в изображении, которое равно  $1920 \times 1080$  точек (пикселей) и при восстановлении изображения на хороший экран с диагональю 40 дюймов составляет всего 2,17 лин/мм. У изображения стандарта 4K UHD –  $4096 \times 3072$  пикселей, что при восстановлении на такой же экран даёт ещё более высокое качество восприятия. Далее в настоящей работе мы будем в основном обрабатывать изображения размером  $2000 \times 2000$  пикселей, как изображения очень высокого качества. Зрительно наблюдателя такие изображения вполне устраивают. Заметим, что несущая частота в голограмме при реальных углах  $\theta \sim 30^\circ$  достигает  $\omega \sim 1/\lambda \sim 2 \cdot 10^3$  [1/мм]. Видно, что реально необходимая для хорошего восприятия плотность записи в даже в наших высокого качества изображениях на три порядка меньше, а с учётом

двумерности изображений, используемая плотность записи таких изображений на 5–6 порядков меньше, чем плотность записи на голограмме.

Чтобы аналогично оценить количество информации, необходимое для записи объема в 3D изображении, воспользуемся моделью, успешно использованной в [1.94], где объемное изображение представляется как произведение амплитудной составляющей, т. е. текстуры поверхности и фазовой, т. е. глубины рельефа поверхности, часто называемой маской, или топографической картой объекта.

На рисунке 2.15 приведены изображения текстуры, маски и 3D изображения, полученного наложением первого на второе.

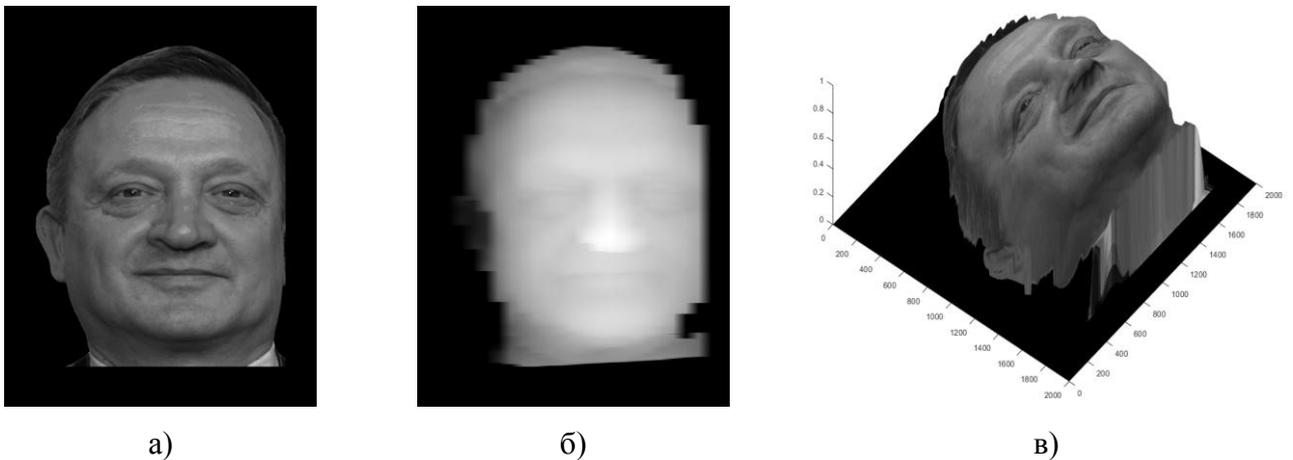


Рисунок 2.15 – Структура 3D объекта голографирования: а) текстура поверхности; б) маска; в) полное 3D изображение объекта

Их пространственные спектры были вычислены по изображениям рисунков 2.15 стандартным оператором БПФ (быстрое преобразование Фурье), который возвращает спектр того же размера как входной сигнал. Ниже приведены срезы двумерных спектров текстуры, маски и полного 3D изображения по их центральному сечению (рисунок 2.16):

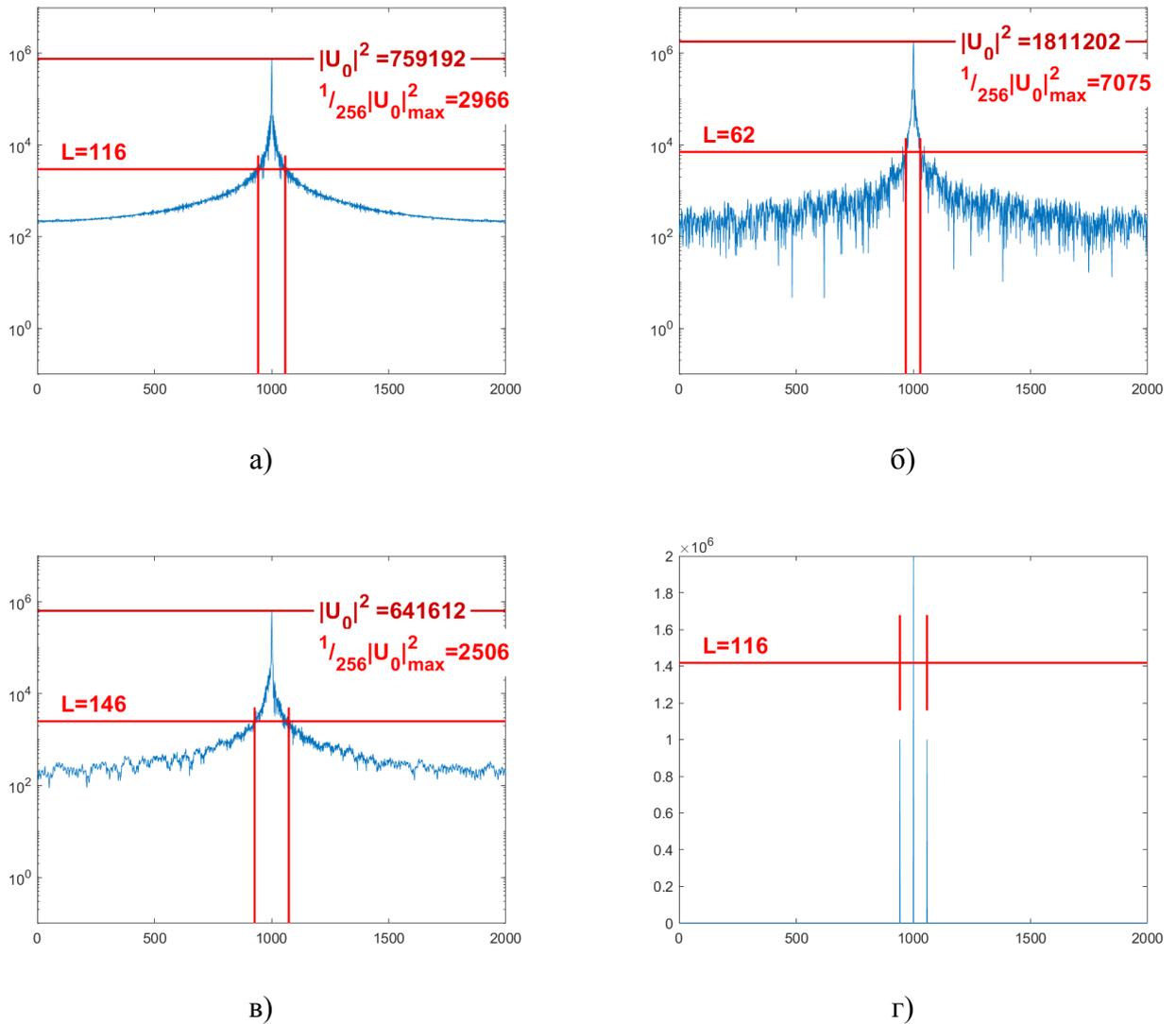


Рисунок 2.16 – Логарифмическая зависимость амплитуды спектра, горизонтальный срез пространственных спектров изображений из рисунка 2.15 по уровню глубины яркости 1/256:

- а) текстура объекта; б) маска объекта; в) полное 3D изображение объекта;
- г) опорная синусоида с периодом, равным 34,5 пикселей

Логарифмическая зависимость амплитуды спектра выбрана для удобства представления. Численные значения на графиках взяты из программы расчётов. Видно, что спектр маски (б) на уровне 1/256 от максимума локального значения, что можно считать уровнем шумов, почти в два раза уже спектра текстуры (а), что указывает на то, что кадр с маской содержит по горизонтали почти вдвое меньше пространственных частот, и содержит в квадрат раз (т. е. в 4 раза) меньше информации. Этот факт можно использовать в задачах распознавания образов,

поскольку текстура 3D изображения содержит гораздо больше информации, чем карта глубин (маска).

В силу теоремы отсчётов Котельникова, без сбоев по причине алиасинга в строке из 2000 пикселей может поместиться до 1000 гармоник. Можно оценить, что по уровню отсечки сигнал/шум  $1/256$  маска объекта (рисунок 2.16б) содержит  $(62/2000)$  возможных гармоник. Это около 3 % информации от допустимой в кадре Full HD. Текстура объекта (рисунок 2.16а) содержит  $(116/2000)$  около 6 % возможной информации в кадре. Даже совмещённые вместе они дают ширину спектра меньше 10 % (рисунок 2.16в). Этот пример ещё раз доказывает, что при прямом поточечном (попиксельном) кодировании значительная часть сигнала практически не несёт полезной информации. Но даже такое высокое разрешение, как в стандарте Full HD, и даже вдвое более высокое 4K UHD, уже само по себе избыточное по отношению к 2D изображениям, не способно передать всю полосу частот, хранящихся в голографическом изображении, содержащем 3D изображение объекта.

Здесь необходимо отметить, что, судя по спектру, само изображение поверхности 3D объекта более гладкое, чем его текстура и содержит меньше информации – как минимум в 2 раза. Реально же, может быть и больше, поскольку мы обычно не замечаем глубины морщинок на лице человека, хотя почти всегда видим их теневую картину на текстуре поверхности. Это тоже даёт повод для понимания неэффективности прямого 3D кодирования, рассматриваемого традиционно, например в [1.76, 1.100, 1.101].

Компьютерно-генерируемые голограммы на сегодняшний день ещё далеки от попыток моделировать объёмные голограммы Денисюка, поэтому ограничимся уже рассмотренными амплитудными голограммами (2.14) и фазовыми голограммами, тоже записанными в схеме Лейта и Упатниекса, в которых интерференционная картина (2.14) модулирует фазу комплексной амплитуды  $A(x)$  восстановленной волны (2.20).

$$\begin{aligned}
 A(x) &= A_0 \left( \exp j(\omega + a \sin \Omega)x \right) = \\
 &= A_0 \sum_{m=-\infty}^{\infty} J_m(a) \exp \left[ j(\omega + a \sin \Omega)x \right]
 \end{aligned} \tag{2.20}$$

В случае фазовых голограмм для сокращения выкладок и без ограничения общности тоже записываем одномерный случай и также для однотонового сигнала. Соответственно, интенсивность спектра такого сигнала будет (2.21).

$$I(\omega) = A_0 \left\{ \sum_{m=-\infty}^{\infty} \delta(\omega + m\Omega) J_m^2(a) \right\}, \tag{2.21}$$

где  $a$  – в терминологии радиотехники – индекс модуляции, что эквивалентно глубине фазовой модуляции материала при записи голографической решётки [2.7].

$$a = \left| \Delta\varphi(x, y) \right| \tag{2.22}$$

Здесь  $\Delta\varphi$  определяется (2.8, 2.9) Анализ графиков функций Бесселя показывает, чем больше порядок  $m$  функции Бесселя, тем при больших аргументах  $a$  наблюдается её максимум, однако при  $m > a$  значения функций Бесселя оказываются малой величиной. Следовательно, малыми будут и соответствующие составляющие спектра, которыми можно пренебречь. Поэтому общую ширину спектра голограммы  $\Delta\omega$ , аналогично [2.7], можно приближённо определить как (2.23).

$$\Delta\omega \approx 2(a+1)(\omega + \Omega_{mid}) = (a+1)(\Omega_{max} + \Omega_{min}), \tag{2.23}$$

где средняя пространственная частота  $\Omega_{mid} = (\Omega_{max} + \Omega_{min}) / 2$ . Однако при записи и восстановлении голограммы необходимо обеспечить условие пространственного разделения различных порядков дифракции. Спектр пространственных частот восстановленного в каждом из  $m$  порядков изображения, присутствующий в

голограмме, лежит в пределах  $\Omega_{min} \leq \Omega \leq \Omega_{max}$ . Каждый из  $m$  порядков дифрагирует, согласно (2.16), в свой диапазон углов (рисунок 2.17).

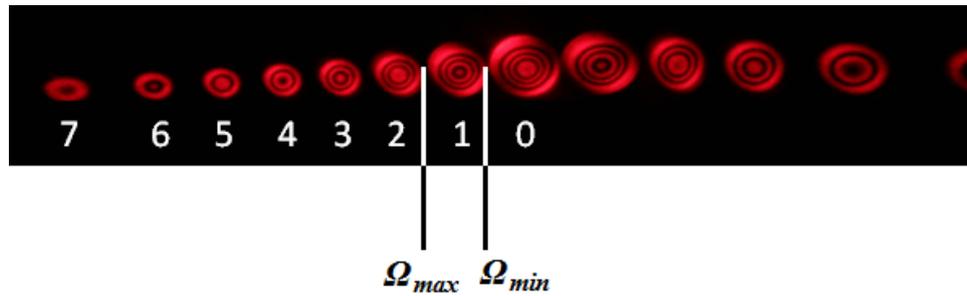


Рисунок 2.17 – Порядки дифракции Рамана – Ната (с нулевого по –7ой порядок) при записи голограммы гауссовыми пучками

Для пространственного разделения сигналов необходимо не только выполнение условия разделения нулевого и плюс-минус первых пучков, но для случая дифракции Рамана – Ната и условия взаимного непересечения всех  $m$  порядков дифракции друг с другом (2.24).

$$\Omega_{max} - \Omega_{min} \leq \Omega_{mid} = (\Omega_{max} + \Omega_{min})/2 \quad (2.24)$$

Более детально сравнивая спектры текстуры (рисунок 2.18) и маски (рисунок 2.19) по ещё более низким уровням отсечки, чем на (рисунок 2.16), можно видеть (рисунок 2.19),

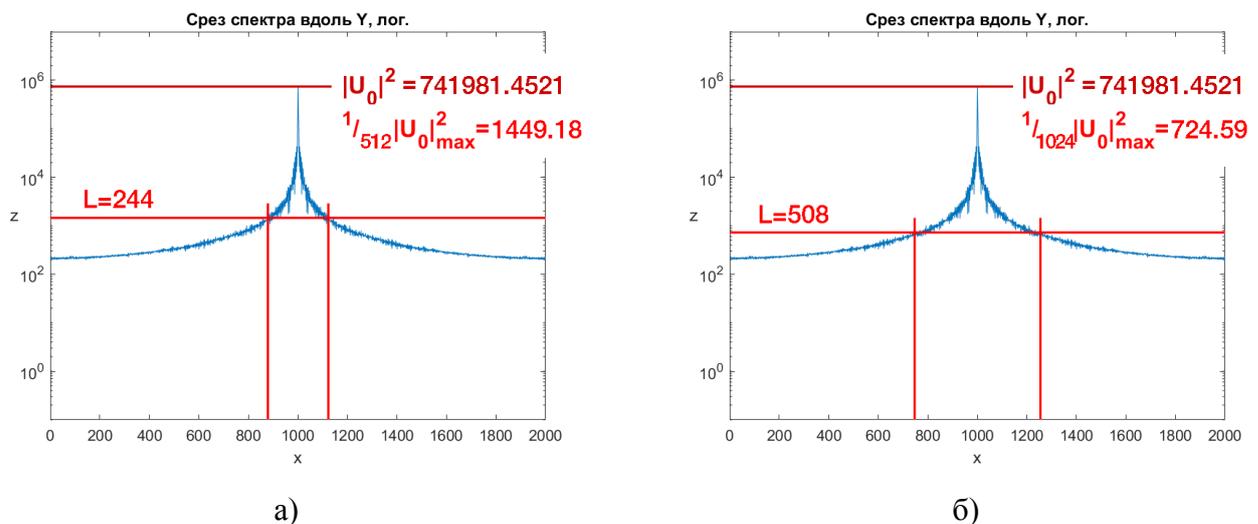


Рисунок 2.18 – Ширина спектра амплитуды (текстуры) с глубокими уровнями отсечки:

а) по уровню  $1/512$  и б) по уровню  $1/1024$

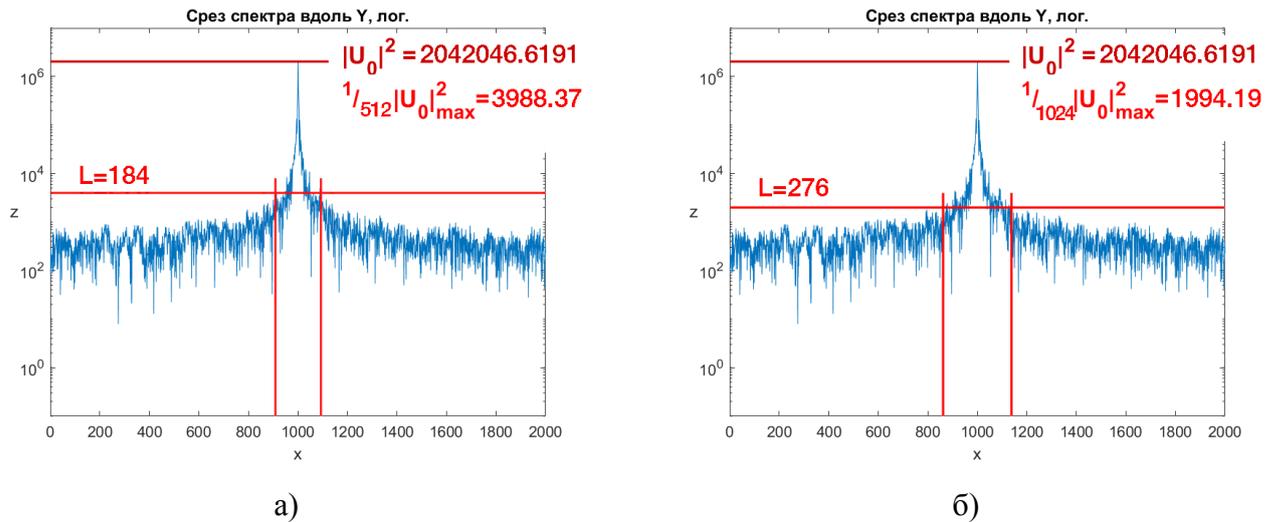


Рисунок 2.19 – Ширина спектра фазы (маски) с глубокими уровнями отсечки:

а) по уровню 1/512 и б) по уровню 1/1024

что даже в хорошей перспективе кодирования глубины серого до 512 и даже до 1024 градаций мы всё равно не будем иметь затруднений при передаче маски и текстуры по каналам связи. Слишком велик зазор между несущей частотой и шириной полезного спектра амплитудного и фазового изображений 3D сигнала.

На рисунке 2.20 то же самое можно сказать и про совмещённые (текстура + маска) 3D изображения.

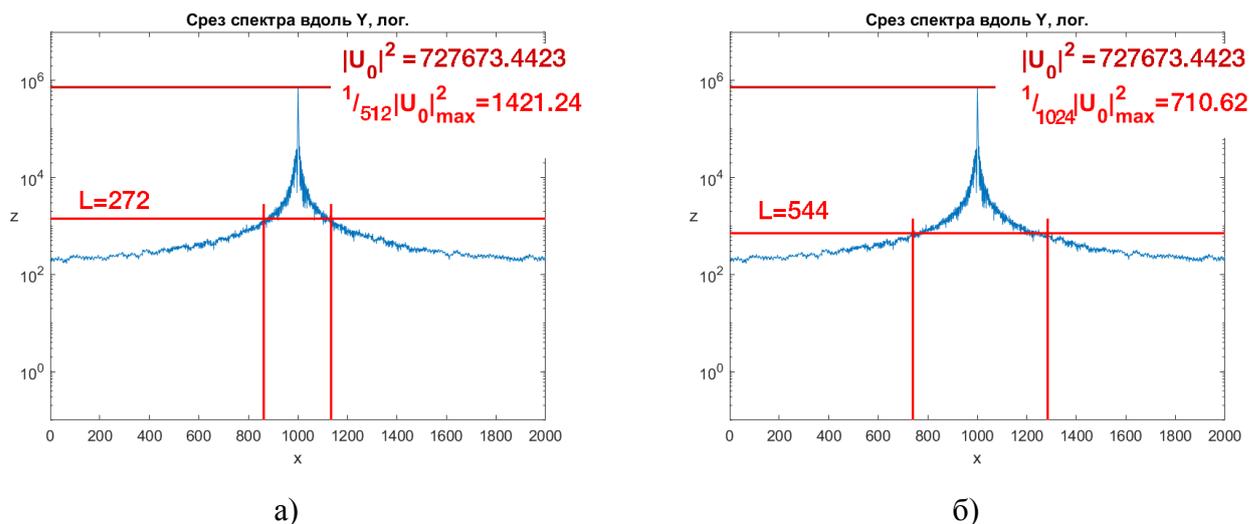


Рисунок 2.20 – Спектр совмещённых текстуры и маски 3D объекта «портрет человека»:

а) по уровню 1/512 и б) по уровню 1/1024

### ***Выводы параграфа 2.2***

В приведённых в этом параграфе модальностях 3D сигнала (текстура и маска) сравниваются не теоретически полученные характеристики спектра 3D объекта голографирования, а реальные спектры численного представления спектров конкретных изображений, причём в самых высококачественных стандартах Full HD и 4K UHD. Это для рассматриваемых задач наиболее значимо, поскольку и вычитание несущей пространственной частоты и её возвращение назад, в спектр сигнала, будет производиться численными методами именно для таких изображений. Для этого вполне можно брать количество отсчётов, не превышающее двойную обратную частоту полученных здесь спектров.

Анализ структуры пространственных частот 3D объекта голографирования и его составляющих – текстуры и маски – показывает, что девиация несущей частоты, определяемая этими спектрами существенно меньше несущей частоты в голограмме. Это хорошо видно при анализе спектрального состава изображений, предлагаемых в качестве двух основных мод 3D объекта для передачи голографической информации по каналу связи. Поэтому для передачи информации о 3D объекте голографирования не следует передавать весь спектр пространственных частот, а достаточно передавать только пространственные частоты 3D объекта в виде маски и текстуры, обеспечивая по ним восстановление голограммы по известной несущей, как это делается в радиотехнике при передаче сигнала на одной боковой полосе. Например так, как это изложено применительно к голографическим изображениям в параграфе 2.1.

Судя по спектрам сигналов высокого качества (2000×2000 пикселей) с большой глубиной дискретизации серого (до 512 и 1024 градаций) видно, что ширина отсечки по таким низким уровням не даёт революционного уширения диапазона передаваемых частот, он остаётся по-прежнему на порядки меньше несущей пространственной частоты. Отсюда следует, что у такой передачи информации есть большой запас прочности в представлении 3D сигнала не только в стандарте Full HD, но и в 4K UHD и даже 8K UHD.

### Параграф 2.3. Разделение несущей частоты и частот девиации

На рисунке 2.21 показана схема модели цифрового дискретного синтеза голограммы. Аналогично [2.11], мы выбрали метод разбиения 3D объекта на слои  $U_{0p}$ , (рисунок 2.22), что было обосновано особенностями работы программы D-FFT (Double Fast Fourier Transform) [2.12], приспособленной для работы с плоскими изображениями.

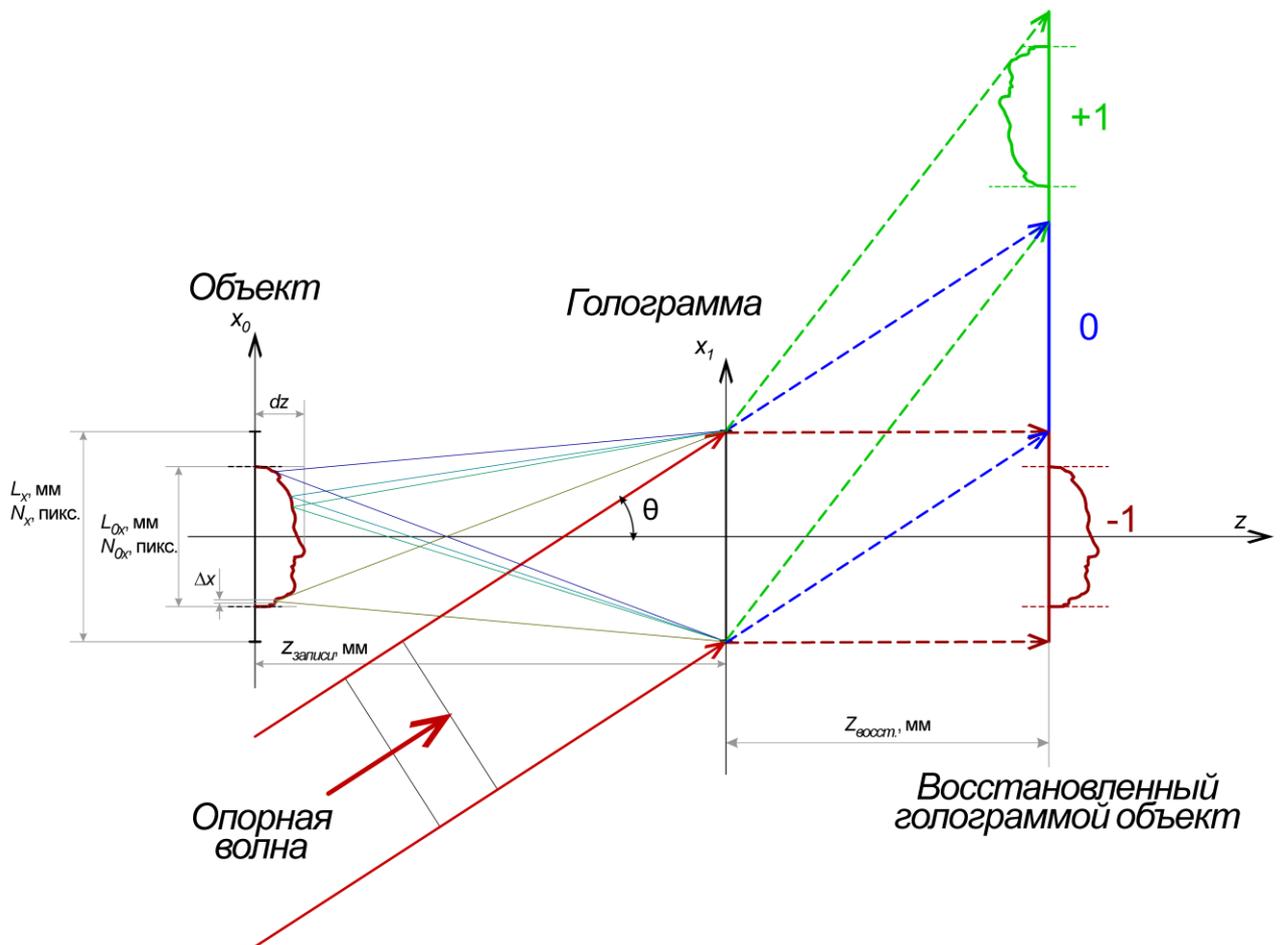


Рисунок 2.21 – Схема синтеза цифровой дискретной голограммы: объект;

$x_1$  – плоскость голограммы;  $\theta$  – угол падения опорной волны;

$L_{0x}$  – ширина объекта в мм;  $N_{0x}$  – ширина объекта в пикс.;

$L_x$  – ширина поля объекта в мм;  $N_x$  – ширина поля объекта в пикс.;

$\Delta x$  – ширина дискреты (пикселя);  $dz$  – глубина объекта;

$z_{зап.}$  – расстояние между основанием объекта и голограммой;  $z_{восст.}$  – расстояние между голограммой и восстановленным изображением

Для отладки работы программы была выбрана тест-модель в виде полутонного ступенчатого по глубине  $z$  объекта  $U_0$ , подробно описанная ниже (рисунок 2.22). Требовалось получить восстановленное изображение минус первого порядка дифракции, куда дифрагируя, восстанавливается действительное изображение объекта. Поэтому поле голограммы было выбрано больше площади объекта для удовлетворения требований используемого алгоритма преобразования Френеля D-FFT [2.12], которое заключается в необходимости формировать по одинаковому количеству пикселей, как в голограмме, так и в объекте голографирования.

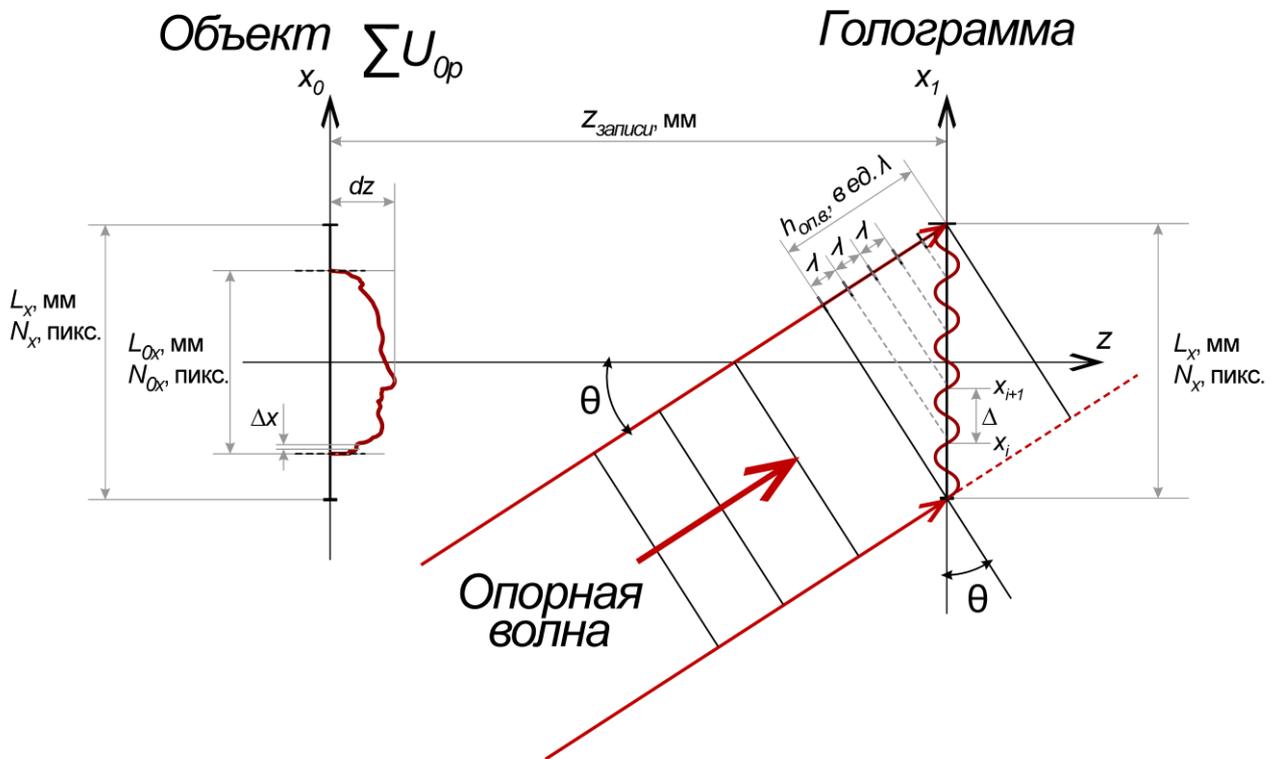


Рисунок 2.22 – Схема синтеза цифровой дискретной голограммы.

Комплексные амплитуды поля:  $U_0$  – сформированная рассеянным излучением объект,  $U_1$  – она же в плоскости голограммы,  $R$  – опорной волны;  $\theta$  – угол падения опорной волны;

$L_x$  – ширина поля объекта в мм;  $N_x$  – ширина поля объекта в пикс.;

$L_{0x}$  – ширина объекта в мм;  $N_{0x}$  – ширина объекта в пикс.;

$\Delta x$  – ширина дискретности (пикселя);  $\Delta z$  – глубина слоя;  $dz$  – глубина объекта;

$z_{\text{зан.}}$  – расстояние между основанием объекта и голограммой;

$\Delta = x_{i+1} - x_i$  – период несущей частоты на голограмме

Согласно схеме, рисунок 2.22 был составлен алгоритм синтеза голограммы, состоящий из двух этапов. Первый этап – послойное преобразование Френеля от амплитуды излучения, рассеянного слоем  $p$  объекта голографирования  $U_{0p}(x_0, y_0)$ ,  $z_p = z_{зан.} - p \cdot \Delta z$ ,  $p$  – номер слоя начиная от основания объекта.

$$U_1(x_1, y_1) = \sum_p \exp(-ikz_p) \cdot \sum_{M,N} \sum_{m,n} \left[ \exp(j\Delta_{M,N}) \cdot U_{0p}(x_{0M}, y_{0N}) \times \right. \\ \left. \times \theta_{Fr}(x_{0M}, y_{0N}, z_p, x_{1m}, y_{1n}) \right] \quad , \quad (2.25)$$

где  $k=2\pi/\lambda$ ;  $\theta_{Fr}$  – ядро преобразования Френеля для каждого из  $p$  слоёв представления объекта (2.26),

$$\theta_{Fr}(x_{0M}, y_{0N}, z_p, x_{1m}, y_{1n}) = \exp \left\{ -\frac{ik}{2z_p} \left[ (x_{1m} - x_{0M})^2 + (y_{1n} - y_{0N})^2 \right] \right\} \quad (2.26)$$

или приближённо, для случая представления объектной волны как волны, изменяющей фазу пропорционально глубине объекта:

$$U_1(x_1, y_1) = \exp(-ikz_{зан.}) \sum_p \sum_{M,N} \sum_{m,n} \left[ \exp(j\Delta_{M,N}) U_{0p}(x_{0M}, y_{0N}) \times \right. \\ \left. \times \exp\{-ik\Delta z \cdot p(x_{0M}, y_{0N})\} \cdot \theta_{Fr}(x_{0M}, y_{0N}, z_{зан.}, x_{1m}, y_{1n}) \right]. \quad (2.27)$$

Здесь, 3D объект голографирования имеет вид  $\sum_p U_{0p}(x_{0M}, y_{0N}) \exp(-ik p \cdot \Delta z)$ .

Для быстрого выполнения преобразования Френеля существует алгоритм (D-FFT), использующий быстрое преобразование Фурье (FFT) [2.12]. Поскольку Быстрое преобразование Фурье (FFT) просто работает с плоскими объектами, то для дискретного преобразования Френеля, использующего FFT, 3D объект представляется суммой слоёв (slicing)  $\sum_p U_0(x_{0i}, y_{0j}, z_p)$ . При использовании быстрого преобразования Френеля для каждого слоя  $p$  на глубине  $z_p$  комплексная амплитуда объектной волны в плоскости голограммы вычисляется как (2.28).

$$U_1(x_1, y_1) = \sum_p \left\{ (\text{D-FFT})_{x_{1i}, y_{1i}, z_p} \left[ U_{op}(x_{0i}, y_{0j}, z_p) \right] \right\} \quad (2.28)$$

Второй этап – суммирование полученного объектного пучка с опорным и нахождение фотоотклика голограммы  $\tau(x_1, y_1)$  по (2.14). Следует отметить, что при выборе угла наклона опорного пучка надо выполнять условие Найквиста о количестве дискретных отсчётов на один период голографической решётки и условие разделения восстановленного изображения (минус первого порядка дифракции) с прошедшим голограмму пучком нулевого порядка дифракции.

В нашем случае для численного эксперимента были выбраны  $L_{0x}$ , равное 10 мм, и состоящее из  $10^4$  пикселей и  $L_x$ , для наблюдения параллакса, равное 47,5 мм, состоящее из 47500 пикселей, а также  $\lambda=0,532$  мкм, в дальнейшем (глава 4) меняющееся на  $\lambda=0,633$  мкм,  $\lambda=0,435$  мкм и  $\lambda=0,937$  мкм. При угле падения опорной волны, равном  $9^\circ$ , расстояние восстановления ( $z_{восст.}$ ) для этих длин волн выбиралось около 80 мм, что обеспечило выполнение условий разделения пучков нулевого и плюс, минус первого порядков восстановленного изображения.

Восстановление 3D изображения голограммой также моделировалось послойно, оператором (2.29).

$$\begin{aligned} U'_0(x'_0, y'_0, z_{p(восст.)}) &= \\ &= \sum_{p(восст.)} \left\{ (\text{D-FFT})_{x_{0i}, y_{0i}, z_{p(восст.)}} \left[ U_{1p}(x_{1i}, y_{1j}, z_{p(восст.)}) \right] \right\} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Для передачи глубины нами производилось разное количество сечений объекта по глубине. Вариант сечения 3D объекта 64 слоями, оказался недостаточно гладким. Квантователь Ллойда – Макса мог бы помочь уменьшить число отсчётов по глубине маски, тем самым увеличить энтропию отсчётов, требуемых для её кодирования, однако уже 128 равномерно расположенных слоёв в нашем случае давали хорошее и достаточно гладкое по глубине изображение. Мы остановились на нём, показывая принципиальную возможность синтеза таких

голограмм 3D живых объектов, но не их предельное качество. Прямое преобразование Френеля 3D объекта требует больших вычислительных ресурсов. В ряде задач, где мы не ставили перед собой задачи сделать восстановленное изображение голограммы аутентичным, где требовалось только доказать возможность существования полного цикла от записи 3D изображения живого человека с качеством Full HD и передачи этой информации по обычному каналу связи для её реставрации в голографическое 3D изображение мы использовали 128 градаций по глубине. В ряде задач, как, например, при определении количества информации в голограммах, синтезированных после передачи по каналу связи, делались расчёты и с 256 слоями, аналогично глубине цвета в стандарте Full HD.

Дальнейшее совершенствование метода требует привлечения ресурсов и объединения усилий разных групп разработчиков и прежде всего разработки экономичных алгоритмов преобразования Френеля от динамически меняющегося с частотой кадровой развёртки 3D сигнала, чему посвящается всё больше работ в настоящее время [2.13, 2.14]. В частности, одному из аспектов этой проблемы, а именно, более простому методу синтеза голограммы по картине структурированного света посвящён первый параграф четвёртой главы настоящей работы.

### ***2.3.1. Условия формирования голограммы с необходимым параллаксом восстановленного изображения и причина допустимого сжатия голографической информации***

Для синтеза дискретной голограммы по (2.28) было необходимо выполнение следующих основных пяти условий:

1. 3D объект голографирования должен быть представлен как сумма слоёв по его глубине ввиду особенностей используемой программы преобразования Френеля (D-FFT). Удобно слои располагать нелинейно, например, применяя

Квантователь Ллойда – Макса, увеличивая их частоту в наиболее значимых и информационных участках голографируемого 3D объекта. Объектная волна на голограмме при этом представляет собой сумму образов Френеля от каждого из слоёв.

2. Следует использовать алгоритм введения в объектный пучок в плоскости объекта голографирования фазовую маску, сдвигающую фазы излучения отдельных ячеек случайным образом. Это реализует наложение фазового шума на объект голографирования, не искажая его изображение, что традиционно используется в голографии для устранения ярких всплесков при записи голограммы и позволяет полнее использовать динамический диапазон фотоотклика голографического материала. Также для дискретных цифровых голограмм случайная фазовая маска помогает уменьшать эффекты алиасинга в плоскости голограммы.

3. Для функционирования программы необходимо, чтобы вычислительное устройство (РС) имело объём оперативной памяти больший, чем объём, занимаемый самой программой и оперативными данными, используемыми во время работы программы. Приведённые ниже вычисления голограмм объёмом до 2.7 ГБ (47500×15000 пикселей в формате single) осуществлялись на устройстве с 32 ГБ оперативной памяти.

4. Чтобы при восстановлении (рисунок 2.21) дифрагировавшие пучки на расстоянии « $z_{зан.}$ » не накладывались друг на друга, т. е. разошлись в пространстве, необходимо выполнять условие (2.30).

$$z_{восст} \geq \frac{L_{0x}}{tg(\theta_{восст.})} \quad (2.30)$$

Последнее накладывает ограничение на допустимый угол падения опорной волны (2.31).

$$\theta_{восст} \geq arctg\left(\frac{L_{0x}}{z_{восст.}}\right) \quad (2.31)$$

5. В силу теоремы Котельникова [2.15] угол падения опорной волны (рисунок 2.22) должен быть таким, чтобы период интерференционных решёток  $d$  у голограммы был больше, чем две дискреты  $\Delta x = (x_1^{i+1} - x_1^i)$  на цифровом массиве, представляющем голограмму, что соответствует частоте Найквиста (2.32) [2.16]. Это необходимо для устранения возможной подмены пространственных частот с возникновением эффектов алиасинга (aliasing). Для этого угол падения опорной волны при записи  $\theta_{зан.}$ , должен удовлетворять (2.32).

$$\frac{\lambda}{\sin(\theta_{зан.})} \geq 2\Delta x \quad (2.32)$$

Для случая  $\theta_{зан.} = \theta_{восст.} = \theta$  получаем из (2.31) и (2.32) граничные условия на угол падения опорной волны (2.33):

$$\arctg\left(\frac{L_{0x}}{z_{зан.}}\right) \leq \theta \leq \arcsin\left(\frac{\lambda}{2d}\right), \quad (2.33)$$

откуда получаем требование на разрешающую способность матрицы чисел, в рамках которой синтезируется голограмма. Действительно, из рисунка 2.21, где поле голограммы его всилу используемой программы D-FFT должно быть равно полю с объектом голографирования, видно (2.34):

$$\Delta x = \frac{L_x}{N_x}, \quad (2.34)$$

и с учётом (2.33) при  $\Delta x = d$  получаем ограничение на минимальное количество дискретных элементов голограммы (2.35), перекликающееся по смыслу с количеством открытых зон Френеля, как например, это выглядит при определении дистанции Рэлея:

$$N_x \geq 2 \frac{L_x L_{0x}}{\lambda z_{зан.}}. \quad (2.35)$$

Можно сказать, что количество пикселей в строке компьютерной голограммы должно быть в несколько раз больше, чем число открытых зон Френеля.

### 2.3.2. Запись голограммы и область наблюдения параллакса

Кроме того, существуют требования (рисунок 2.23), накладываемые необходимым полем обзора  $L_p$ . Выражения (2.36) и (2.37) определяют степень окклюзии, при которой наблюдается объект.

$$L_p \leq \left| (L_x - L_0) \left( \frac{z_{\text{восст.}}}{z_{\text{зан.}}} \right) - L_x \right|, \quad (2.36)$$

при

$$\frac{z_{\text{зан.}}}{z_{\text{восст.}}} \leq 1 - \frac{L_0}{L_x}. \quad (2.37)$$

При синтезе восстановленного голограммой объекта, полученная из (2.14) с учётом (2.30–2.36) матрица дискретных значений  $\tau(x_1, y_1)$  умножается на комплексную амплитуду восстанавливающего пучка, который в нашем случае был выбран равным опорному при записи (рисунок 2.24). Полученный результат снова подвергнулся преобразованию Френеля, аналогично (2.27) в результате чего на расстоянии  $z_{\text{зан.}}$  послойно формировались 3D изображения нулевого и плюс-минус первых порядков. Минус первый формировал нужное нам 3D изображение записанного на голограмму объекта.

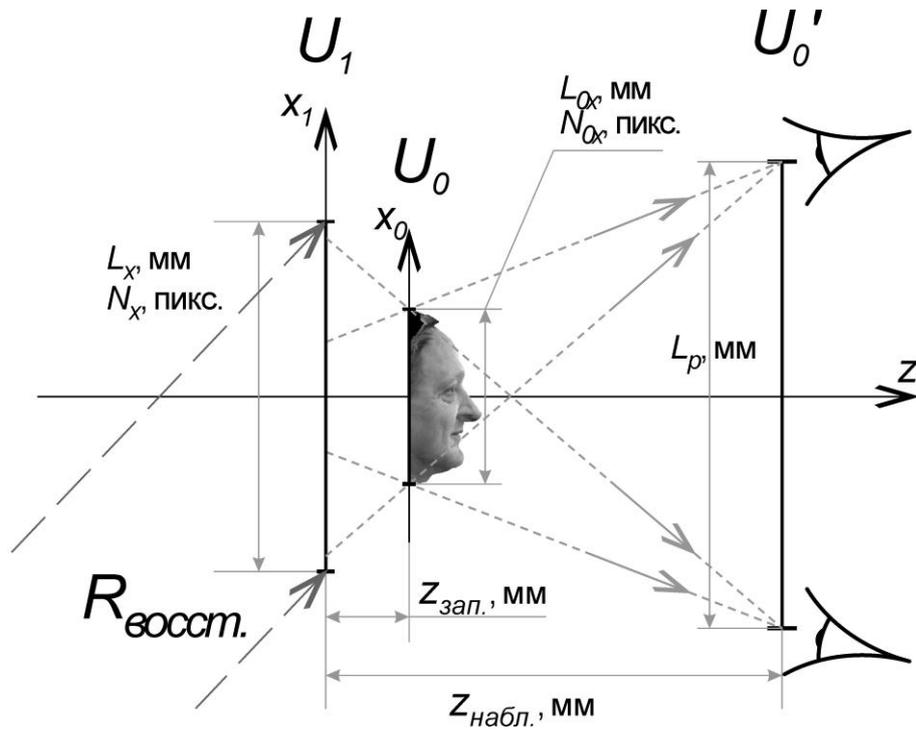


Рисунок 2.23 – Условие наблюдения параллакса:

$U_0$  – изображение объекта;  $U_1$  – амплитуда волны, восстановленной голограммой;  
 $U_0'$  – амплитуда восстановленной волны в плоскости наблюдения;  $R_{восст.}$  – восстанавливающая волна;  $L_{0x}$  – ширина объекта в мм;  $L_x$  – ширина голограммы в мм;  
 $N_{0x}$  – число пикселей объекта в сечении  $x$ ;  $N_x$  – число пикселей голограммы в сечении  $x$ ;  
 $L_p$  – база наблюдения параллакса;  $z_{зап.}$  – расстояние между объектом и голограммой;  
 $z_{набл.}$  – расстояние между голограммой и плоскостью наблюдения;  $N_x$  – количество пикселей на голограмме

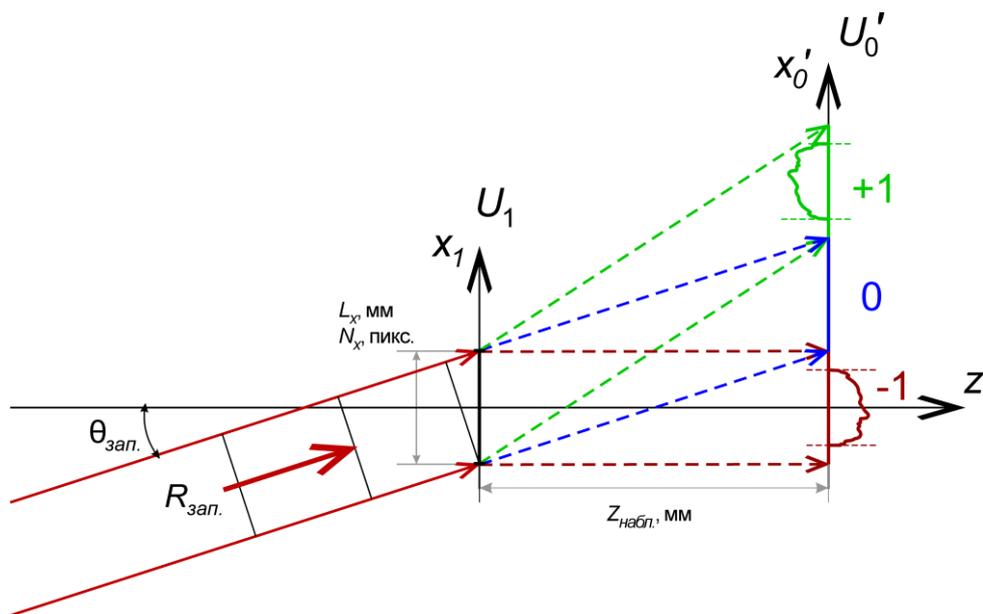


Рисунок 2.24 – Восстановление тестового изображения объекта « $U_0'$ »

Тест-модель в пробных расчётах для проверки качества передачи глубины восстановленного изображения, использованная в схемах (рисунок 2.22) и (рисунок 2.24) представляла собой четыре ступеньки, каждая из которых смещена по глубине.

Описанным выше образом была синтезирована компьютерная голограмма тест-модели. Восстановленная ей (рисунок 2.24) амплитуда изображения объекта  $U_0'(x_0', y_0', z_{зан.} + z_{восст.})$  приведена на рисунке 2.25.

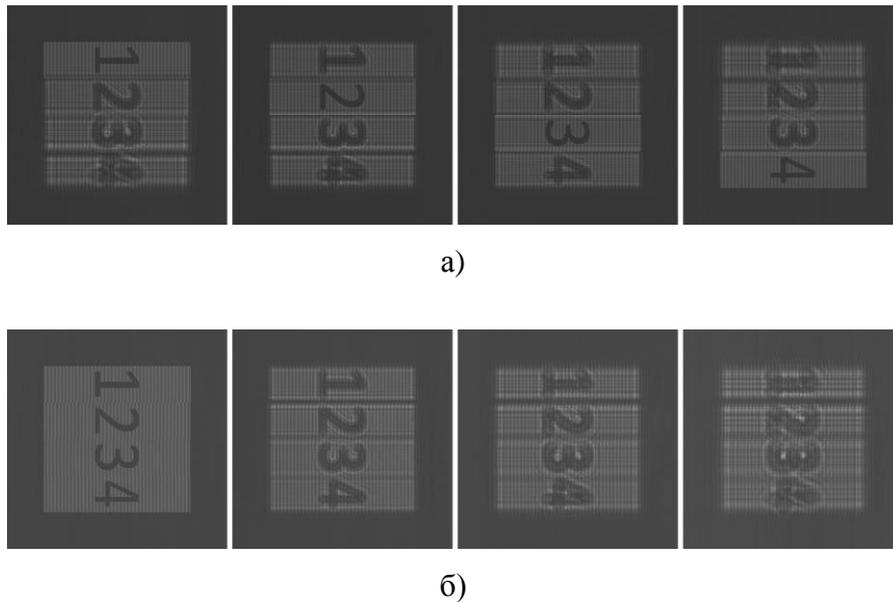


Рисунок 2.25 – Преобразование Френеля, сделанное согласно (2.28) от четырёх плоских ступенек, сдвинутых по глубине друг от друга на 10 мм (слева направо изображения на 62 мм, 72 мм, 82 мм и 92 мм от голограммы): а) глубина задавалась сдвигом по слоям; б) глубина задавалась добавкой фазы объектной волны, соответствующей таким же по расстоянию сдвигам ступенек

Видно, что в случае синтеза голограммы послойно, со сдвигом каждого слоя на  $\Delta z$  (рисунок 2.25а) объём передаётся правильно, поскольку видно дифракционное размытие ступенек, находящихся на расстоянии от восстанавливаемой плоскости. Вторым методом (рисунок 2.25б), когда сдвиг по глубине задаётся увеличением фазы в каждой из ступенек, соответствующим такому же их смещению, как на рисунке 2.25а, D-FFT даёт сбой. Слева направо, сначала все вместе они восстанавливаются на расстоянии первой ступеньки, затем второй, третьей и четвёртой. Не смотря на сдвиг плоскости восстановления, все 4

ступени, находящиеся на разном расстоянии от голограммы, восстанавливаются вместе так, как будто они были на одном расстоянии от основания тест-модели. Это связано с особенностями работы использованного нами преобразования Френеля методом D-FFT [2.12], в котором переход через фазу  $2\pi$  воспринимается программой как возвращение в ноль. Задача сохранения значения фазового сдвига при переходе через  $2\pi$ , именуемая алгоритмом развёртки фазы также решается [2.17–2.19], хотя и не проста, поскольку требует особого внимания к сбоям фазы при наличии шумов [2.20, 2.21].

Ввиду удобства использования преобразования Френеля методом D-FFT и трудностей с работой по восстановлению фазы объектов большой глубины, дальнейшие вычисления проводились послойно. На рисунке 2.26 приведено изображение записанной таким образом голограммы от 3D объекта (рисунок 2.15), на рисунке 2.27 – восстановленное ею изображение, на рисунке 2.28 – её спектр.

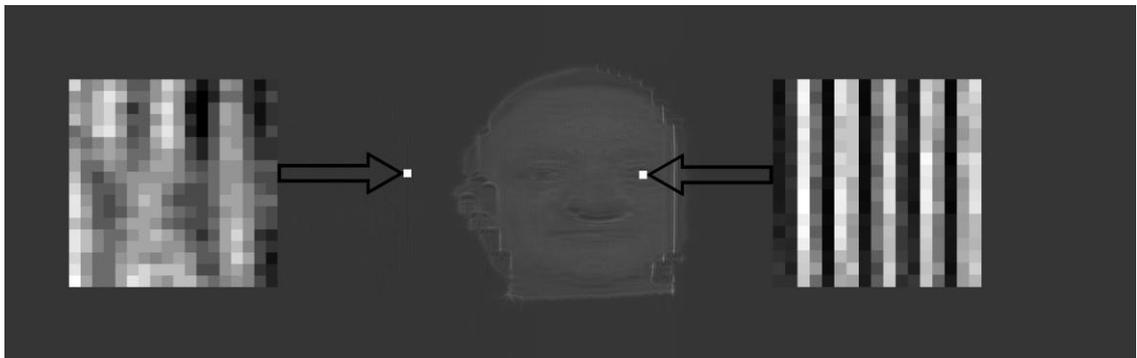
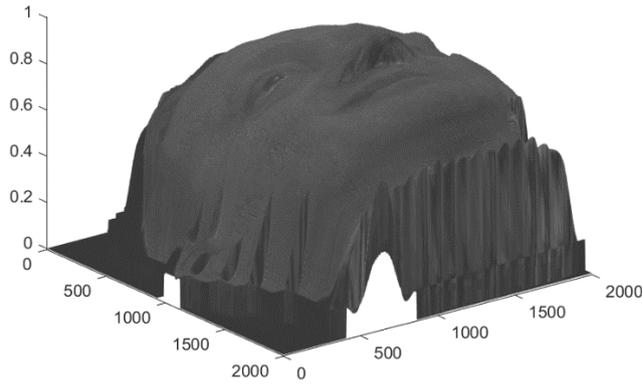


Рисунок 2.26 – Голограмма, размером  $15 \times 47,5$  мм с шагом 1 мкм,  $\lambda=0,532$  мкм, наклон опорного пучка  $9^\circ$ , синтезированная на удалении от объекта на 74 мм (показаны увеличенные фрагменты голограммы)



а)



б)

Рисунок 2.27 – Восстановленное голограммой (рисунок 2.26) 3D изображение:

а) изопроекция; б) её вид сверху

Видно, что голограмма (рисунок 2.26) состоит из размытых преобразованием Френеля интерференционных полос, формируемых сгруппированными вдоль интерференционной полосы точками разной яркости. Интерференционные полосы присутствуют как в центральном участке голограммы, где просматривается интерференционная структура искажённого преобразованием Френеля объекта, так и вне этого участка. Интерференционные полосы вне центрального участка отвечают за восстановление изображения, видимого под углом к оптической оси. Для удобства наблюдения параллакса было сделано по вертикали ( $y_1$ ) полуторакратное увеличение поля голограммы, а по горизонтали ( $x_1$ ) – в 4.75 раз. Таким образом, параллакс (рисунок 2.23) достигал по вертикали  $y_1$  –  $4^\circ$ , а по горизонтали  $x_1$  –  $29^\circ$ . Восстановленное этой голограммой изображение находится в пространстве между наблюдателем и голограммой.

### 2.3.3. Пространственный спектр голограммы

Сечение спектра (рисунок 2.28) голограммы ( $\tau = |U_1|^2$ ), приведённое на рисунке 2.29, показывает, что между нулевой пространственной частотой и плюс-

минус первыми порядками дифракции есть значительный интервал, определяемый условием пространственного разведения пучков нулевого и плюс-минус первого порядков (2.31), как и было предсказано оценками, сделанными выше (параграф 1.3). Эта дистанция в пространстве частот ещё раз указывает на то, что прямое поточечное кодирование голограмм не эффективно, поскольку кодирует и эти пустые участки частотного пространства. Наличие требований пространственного разведения восстановленного (минус первого) и прошедшего (нулевого) порядков дифракции при восстановлении изображений в данном случае входит в противоречие с требованием уплотнения информации. Точнее, требование разведения пучков (рисунок 2.24) предъявляется голограмме в нашем обычном трёхмерном пространстве, а требование уплотнения информации – в пространстве обратной размерности – частотном пространстве (рисунок 2.26).

Эти требования вызваны различными физическими причинами и конкурируют друг с другом. Первое вызвано требованием удобства восприятия изображения, выраженным в величине угла отклонения минус первого пучка  $\theta$  и задаёт несущую пространственную частоту. Второе – стремлением к максимально возможному заполнению частотного пространства спектром объекта. Первое поддаётся схемотехнической регуляции, второе – нет, поскольку определяется композицией голографируемого пространства с объектом голографирования, которым мы схемотехнически не управляем. Аналогично радиосигналу для устранения излишней избыточности голографического сигнала следует искусственно разделить несущую и боковую пространственные частоты с последующей передачей на приёмный конец канала связи только одной боковой полосы, что в нашем случае выполнено в виде передачи пары 2D изображений текстура + маска.

На рисунке 2.28 приведён спектр голограммы, приведённой на рисунке 2.26, синтезированной по схеме рисунок 2.21.

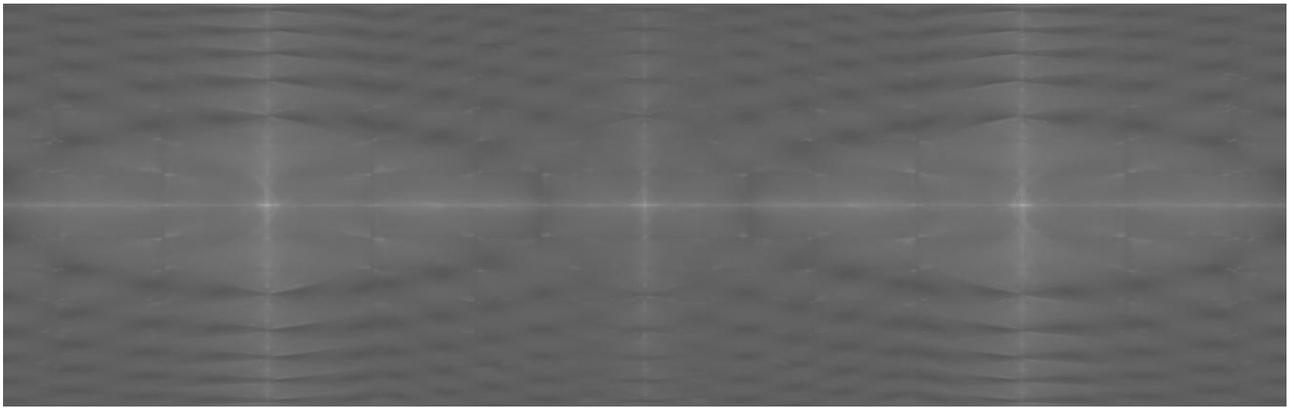


Рисунок 2.28 – Спектр голограммы

На рисунке 2.29 в логарифмической шкале показан горизонтальный срез спектра, приведённого на рисунке 2.28.

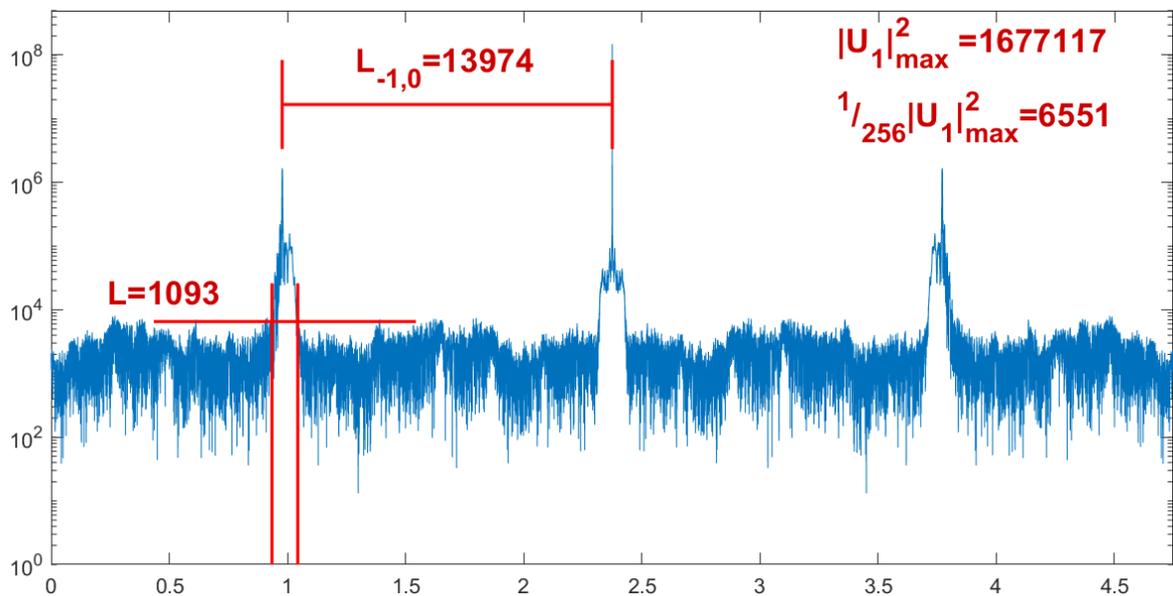


Рисунок 2.29 – Логарифмическая шкала интенсивности спектра вдоль горизонтальной оси  $x$ . Центральный пик спектра находится на оптической оси и соответствует 23751 пикселю от края голограммы. Расстояние от центрального пика нулевого порядка дифракции до минус первого порядка  $L_{-1,0}=13974$  пикселей

При ширине спектра минус первого порядка в 1093 пикселя по уровню отсечки  $1/256$ , спектр всего сигнала вместе со спектром голограммы занимает  $2 \times (13974 + 1093) = 30134$  пикселей.

Это на примере реальных изображений подтверждает большую избыточность информации на голограмме. Такая избыточность не нужна для передачи 3D голографической информации об объекте голографирования. Её

сжатие прямыми математическими методами с увеличением энтропии сообщения, как это делается, например, блочным кодированием Хаффмана, представляет большую проблему.

Действительно, если сравнить условие (2.31) со спектром (рисунок 2.29), можно сделать вывод, что хотя в обычном пространстве нельзя уплотнить расположение изображений нулевого и первого порядков дифракции, в пространстве спектров нулевой и плюс-минус первый порядки можно размещать существенно ближе друг к другу. Это значит, что теоретически можно существенно уплотнять запись информации, только надо найти приемлемый для этого способ. Для этого подходит как метод выделения одной боковой полосы минус первого порядка пространственного спектра объекта, как своего рода голографический аналог (SSB), так и метод передачи двух 2D изображений текстура + маска. Причём последний имеет преимущество по разрешающей способности восстановленного голограммой изображения, что будет показано в следующем параграфе 2.4. Однако для анализа проще употреблять давно известную терминологию передачи информации как на SSB.

### ***Выводы параграфа 2.3***

Пространственные частоты, записанные на голограмме, имеют разную физическую природу и могут быть разделены при передаче 3D голографической информации по каналу связи. На примере расчёта конкретной голограммы 3D объекта, заданного в цифровой форме с качеством, превышающим Full HD формат, было показано, что несущая пространственная частота более чем на порядок превышает её девиацию, вызванную модуляцией объектной волной, несущей информацию. Альтернативой прямому энтропийному кодированию являются методы кодирования, использующие физические принципы формирования волны, как, например, кодирование, основанное на выделении информационной части спектра сигнала. На основе спектральной фильтрации

методом косинусного преобразования Фурье, наряду с выделением участков слабо меняющихся функций, основан известный способ JPEG сжатия сигнала. Однако, как показано в обзорах Pleno [1.104], в голографическом кодировании он себя не проявил. Альтернативному методу представления 3D голографической информации посвящена вся настоящая глава, а в следующем, параграфе 2.4 проводится прямое сравнение качества восстановленного 3D сигнала предложенным в параграфе 2.1 и методом сжатия, использующим преобразование Фурье двумерной голографической дифракционной структуры.

#### **Параграф 2.4. Сравнение передачи на боковой полосе и передачи со спектральным сжатием, содержащим элементы JPEG**

Традиционное энтропийное кодирование сигнала связано с блочным представлением групп символов. Кодирование голографической информации с повышением энтропии связано с кодированием длинными блоками. Это вызвано тем, что кодируемая голограмма содержит объёмы информации, существенно превышающие необходимую нам исходную информацию о 3D объекте голографирования, как это видно из сравнения фурье-спектров голограммы (рисунок 2.28, 2.29) и 3D сигнала (рисунок 2.16).

До настоящего времени активно развивались методы сжатия, основанные на разложении 3D голографического сигнала в спектр с выделением его значимой части и отсечением сигнала на низком уровне, сравнимом с шумами канала связи. Этот же метод является основной составляющей известного метода JPEG сжатия с управляемым пользователем процентом потерь. Он стандартизован документом ISO/IEC IS 10 918 и состоит из нескольких этапов; включая дискретное спектральное преобразование (ДСП), квантование результатов ДСП, при которой вносятся потери, и сжатие методом Хаффмана. В силу симметричности спектра в JPEG сжатии используется косинусное преобразование Фурье [2.22]. Группа Pleno

не оставляет надежды найти оптимальные методы сжатия голографической информации [2.23], хотя опирается на классические энтропийные методы.

### 2.4.1. Энтропия источника

Не смотря на эффективность кодирования таким способом двумерных сигналов (плоских изображений), как сообщается в обзорной работе [1.76] такой метод кодирования 3D голографической информации не находит сегодня широкого применения ввиду двух основных причин – своей малой эффективности и большой вычислительной сложности.

Действительно, при JPEG кодировании 2D сигналов эффективность метода может быть высокой. Это хорошо пояснить на примере, представленном на рисунке 2.16, где ширина спектра не превосходит 146 пикселей для сигнала Full HD. Это позволяет осуществлять кодирование  $L=146 \times 146$  байтами вместо  $L=1920 \times 1080$ , согласно формуле Шеннона [2.24] для канала без шумов с энтропией сигнала  $H$ .

$$L_{\min} = H / \log_2(m). \quad (2.38)$$

Здесь для двоичного кодирования сигнала с мощностью алфавита  $m=2$ , длина кода равна энтропии источника сообщений. Однако более точно определить энтропию источника даже для двумерного изображения, как пишет У. Прэйт [2.24] не просто, не говоря уже о трёхмерных изображениях, добавим мы. Дело в том, что стройно разработанная Шенноном для одномерного сигнала, выражаемого при квантовании вектор – столбцом  $f$ , теория векторного представления сообщений в многомерном пространстве не может быть прямо применена для двумерных и тем более трёхмерных сигналов путём строчной развёртки двумерного изображения  $\sum f_i^j$  в одномерных вектор-столбец  $f_i$  ввиду очевидной корреляционной связи между близлежащими элементами по двум осям, например  $f_i^j; f_i^{j+1}$  и  $f_i^j; f_{i+1}^j$  двумерной матрицы плоского и ещё большим

количеством близких друг к другу по трём осям элементов  ${}_k f_i^j; {}_{k+1} f_i^j$  трёхмерной объёмной матрицы изображений.

В [2.24, с. 189–190], сообщается: «Если яркость каждого из  $N \times N$  элементов изображения квантуется на  $J$  уровней, то данный источник может создать  $I = J^Q$  различных изображений. Многие из них имеют хаотическую структуру и похожи на реализации двумерного случайного шума. Лишь очень небольшое число из  $I$  возможных изображений будут такими, какие дал бы реальный датчик при наблюдении за окружающим миром. В принципе можно считать, что имеется априорное распределение  $P(f_i)$  (где  $i = 1, 2, \dots, I$ ) вероятности появления каждого из возможных состояний вектора  $f$ . Измерить или промоделировать это распределение очень непросто, но сама идея в конце концов приводит к полезным результатам».

Не претендуя на общность полученных результатов для произвольных 3D объектов, а ограничиваясь 3D изображениями человека, как будет показано в следующей, главе 3 – сложными изображениями, имеющими гауссову статистику распределения яркости, здесь мы приведём сравнение предлагаемого в патенте РФ № 2707582 [1.94] метода кодирования 3D сигнала двумя основными модальностями (маска + текстура) с методом кодирования, применяющим спектральную селекцию основных информационных гармоник сигнала, который является основным в JPEG кодировании 2D изображений. Полученный результат, показывающий более высокое разрешение восстановленного изображения, может быть объяснён более точным попаданием на имеющееся априорное распределение  $P(f_i)$ , чем при селекции основных информационных гармоник с применением дискретного спектрального преобразования (ДСП) в JPEG.

#### ***2.4.2. Численный эксперимент сравнения разрешающей способности***

Для проведения численного эксперимента был создан тест – такой же, как в параграфе 2.3 виртуальный объект в виде ступенек, изменяющих своё положение

по глубине (рисунок 2.30), но с нанесёнными на него штрихами пространственной миры.

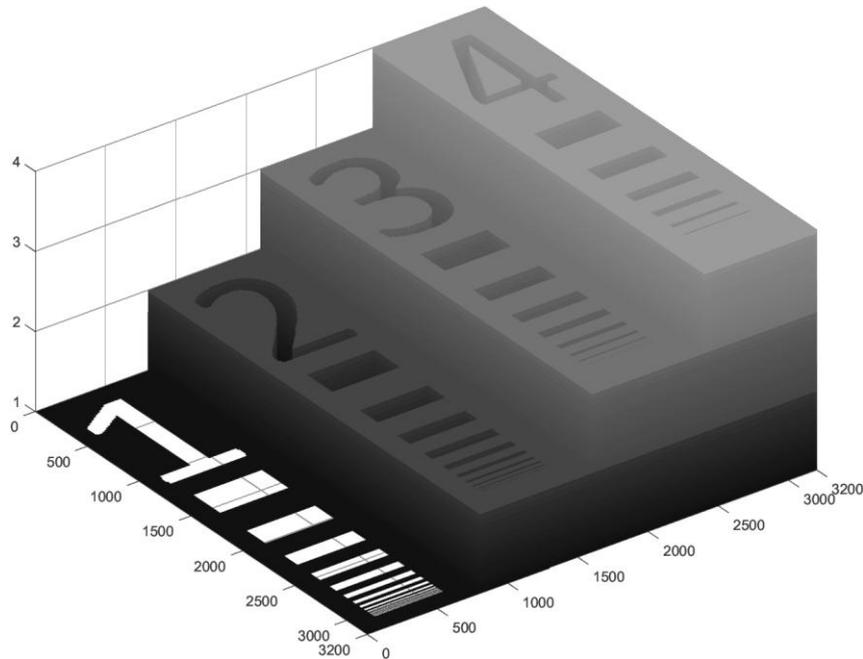


Рисунок 2.30 – Тест-объект, созданный из 4-х ступенек, находящихся на разной глубине с основанием  $6.4 \times 6.4$  мм, высотой 1.6 мм каждая, что в пикселях соответствует основанию  $3200 \times 3200$  и высоте 800 пикселей. Ширина полос миры в пикселях: 256; 181; 91; 64; 45; 32; 23; 16; 11; 8; 6; 4; 3; 2; 1; 1, что соответствует в наших расчётах ширине в мм – 0,512; 0,362; 0,182; 0,128; 0,090; 0,064; 0,046; 0,032; 0,022; 0,016; 0,012; 0,008; 0,006; 0,004; 0,002; 0,002. Каждая прозрачная полоска равна по ширине соседней непрозрачной

В схеме рисунок 2.31 этот объект послойно записывался на голограмму (2.14), спектр которой показан на рисунке 2.32.

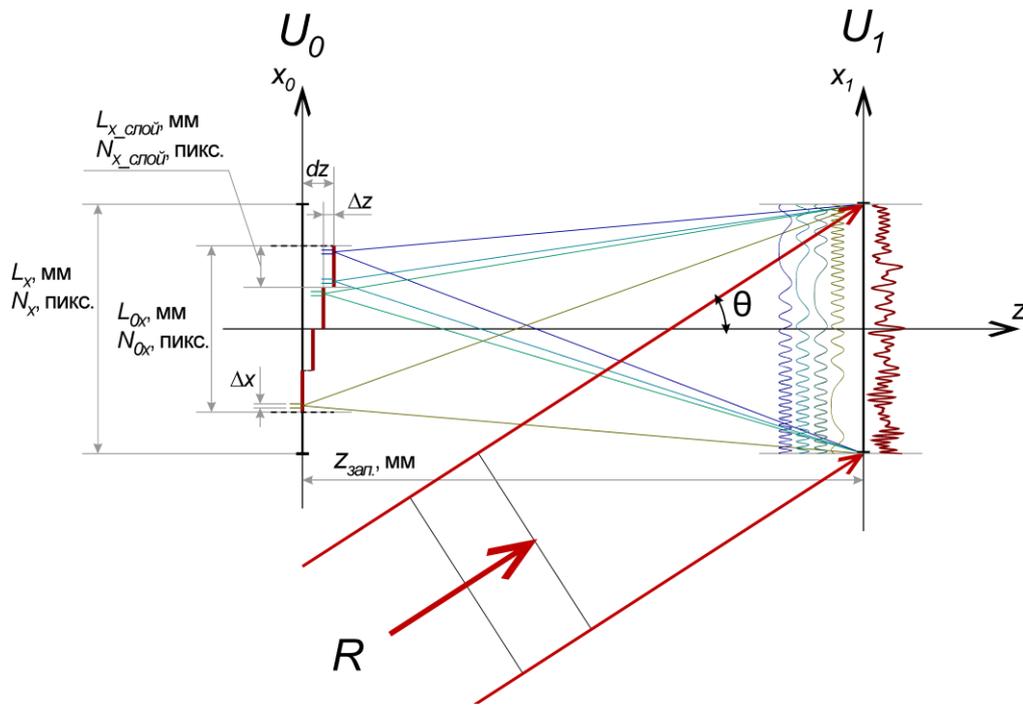


Рисунок 2.31 – Схема синтеза цифровой дискретной голограммы:

$U_0$  – объект;  $U_1$  – плоскость голограммы;  $R$  – опорная волна;  $\theta$  – угол падения опорной волны;

$L_x$  – ширина поля объекта в мм;  $N_x$  – ширина поля объекта в пикс.;

$L_{0x}$  – ширина объекта в мм;  $N_{0x}$  – ширина объекта в пикс.;

$L_{x\_слой}$  – ширина слоя объекта в мм;  $N_{x\_слой}$  – ширина слоя объекта в пикс.;

$\Delta x$  – ширина дискреты (пикселя);  $dz$  – глубина объекта;

$\Delta z$  – расстояния по глубине между 4 слоями;  $z_{зан.}$  – расстояние между объектом и голограммой

Объектная волна – многослойный объект со смещением амплитуды по  $z$ . В численном эксперименте формировалась следующим виртуальным объектом:

Размеры объекта в пикселях  $(N_{0y} \times N_{0x}) = 3200 \times 3200$  пикс.  $\approx 10^7$  пикс.;  
 размеры поля объекта в пикселях  $(N_y \times N_x) = 16000 \times 32000$  пикс.  $\approx 5 \cdot 10^8$  пикс.;  
 размеры объекта в миллиметрах  $(L_{0y} \times L_{0x}) = 6,4 \times 6,4$  мм  $\approx 41$  мм<sup>2</sup>; размеры поля  
 объекта в миллиметрах  $(L_y \times L_x) = 32 \times 64$  мм  $\approx 2048$  мм<sup>2</sup>;  $z_{зан.}$  основания  
 объекта = 122 мм;  $z_{зан.}$  вершины объекта = 152 мм; глубина объекта  
 $dz = 30$  мм  $\approx 56391$  длин волн; длина волны записи – восстановления  
 $\lambda_{зан.} = 0,532$  мкм; количество слоёв объекта по глубине – 4 слоя; угол падения  
 опорной волны при записи и при восстановлении  $\theta = 4^\circ = 0,07$  рад; коэффициент  
 при амплитуде опорной волны при записи 1,0, при восстановлении – 1,0;  
 максимальная разность хода в наклонном опорном пучке при падении на

голограмму  $\approx 4,46$  мм, что соответствует пространственной частоте  $W_x \approx 8392$  лин/мм или периоду  $d \approx 7,63$  мкм; количество пикселей в периоде интерференционной полосы  $\approx 3.8$  пикс.

В схеме с указанными параметрами объекта формировалась амплитудная голограмма размером в пикселях  $(N_y \times N_x) = 16000 \times 32000$  пикс.  $\approx 5 \cdot 10^8$  пикс.; в миллиметрах –  $(L_y \times L_x) = 32 \times 64$  мм  $\approx 2048$  мм<sup>2</sup> (рисунок 2.32).

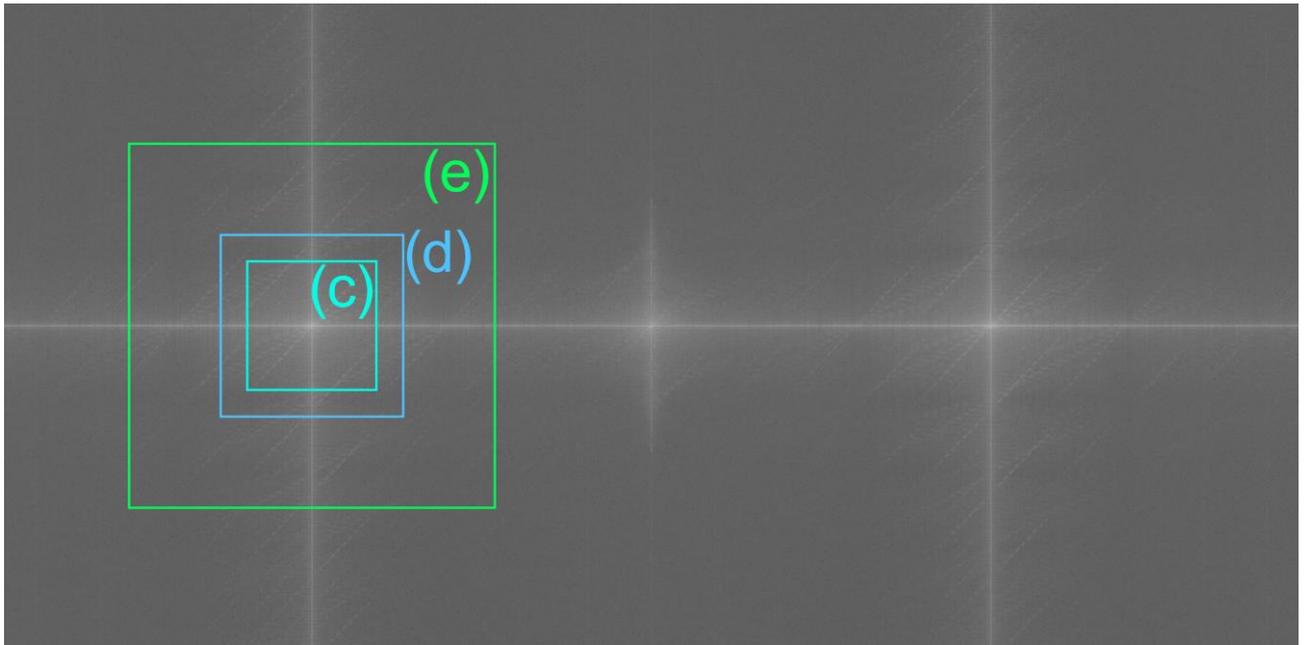
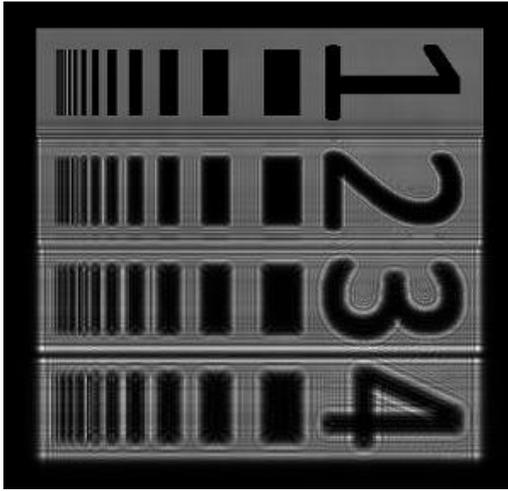


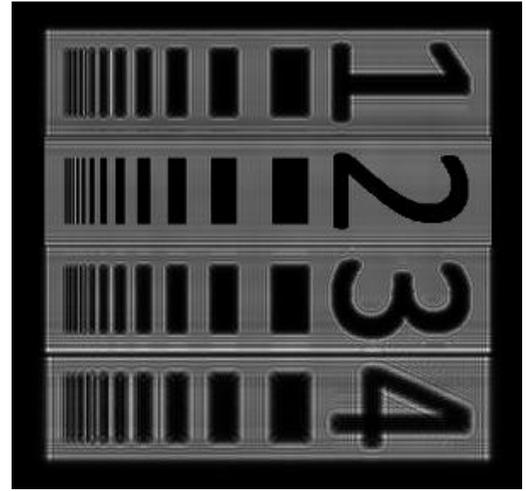
Рисунок 2.32 – Спектр голограммы, синтезированной от объекта рисунок 2.30: (с) – выделенная область, равная количеству пикселей объекта голографирования; (d) – выделенная область, равная полуторакратному количеству пикселей объекта голографирования; (e) – выделенная область, равная восьмикратному количеству пикселей объекта голографирования

На рисунке 2.32 приведена структура рассчитанной по (2.28) фурье-голограммы 3D тестового объекта (рисунок 2.30).

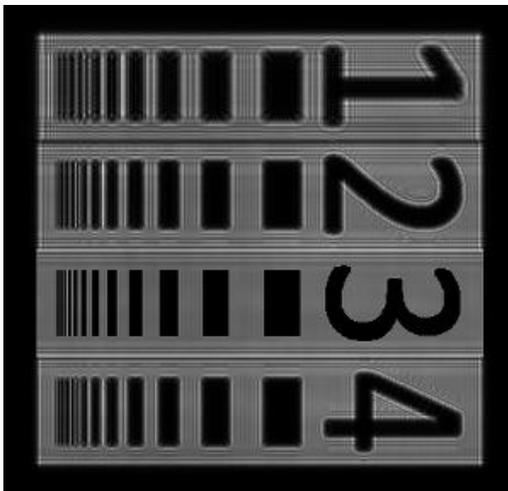
При восстановлении этой голограммы получены изображения, представленные на рисунке 2.33, послойно, в плоскости 1-ой ступеньки (а), 2-ой (б), 3-ей (в) и 4-ой (г). Видно дифракционное размытие изображений ступенек, отстоящих друг от друга по глубине на 10 мм.



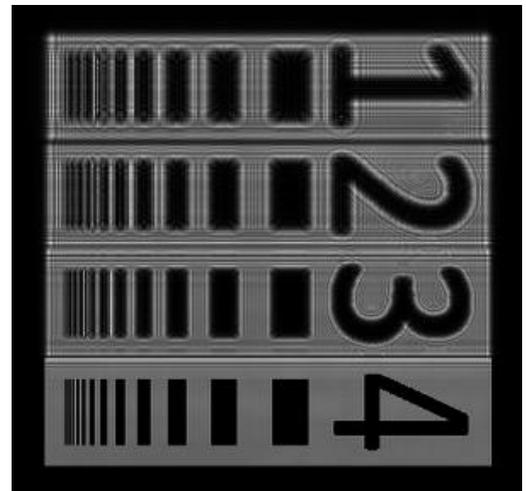
а)



б)



в)



г)

Рисунок 2.33 – Восстановленное голограммой изображение объекта «ступеньки с мирой»:

а) в плоскости удаления первой ступеньки; б) второй ступеньки;

в) третьей ступеньки; г) четвёртой ступеньки

Для иллюстрации качества передаваемого изображения выбрана только одна вторая ступенька от каждого восстановленного изображения объекта. Остальные 3 ступеньки в точности повторяют качество восстановления, показанное для ступеньки номер 2 и поэтому могут быть опущены в этом рассмотрении. Из полной голограммы выделялась область, кратная площади объекта голографирования. Число пикселей пропорционально выделенной площади спектра. Участок голограммы, ограниченный площадкой (с) был равен

по площади и по количеству пикселей объекту голографирования. Участок (d) – полторакратному, (e) – восьмикратному объекту голографирования.

На рисунке 2.34 приведено изображение только одной, второй ступеньки для каждого изображения тест объекта. Исходное изображение мира второй ступеньки (a), полученной предлагаемым в настоящей работе методом синтеза голограммы на приёмном конце канала связи по переданной текстуре и карте глубин, занимающем полосу частот канала, равную полосе, необходимой для передачи двух 2D изображений и соответствующую количеству передаваемой информации, равен сегменту (c) на рисунке 2.32 и меньше, чем сегменты (d) и (e). Полученный результат поясняется на рисунке 2.34, на котором сгруппированы вторые ступеньки тест объекта и его изображений.

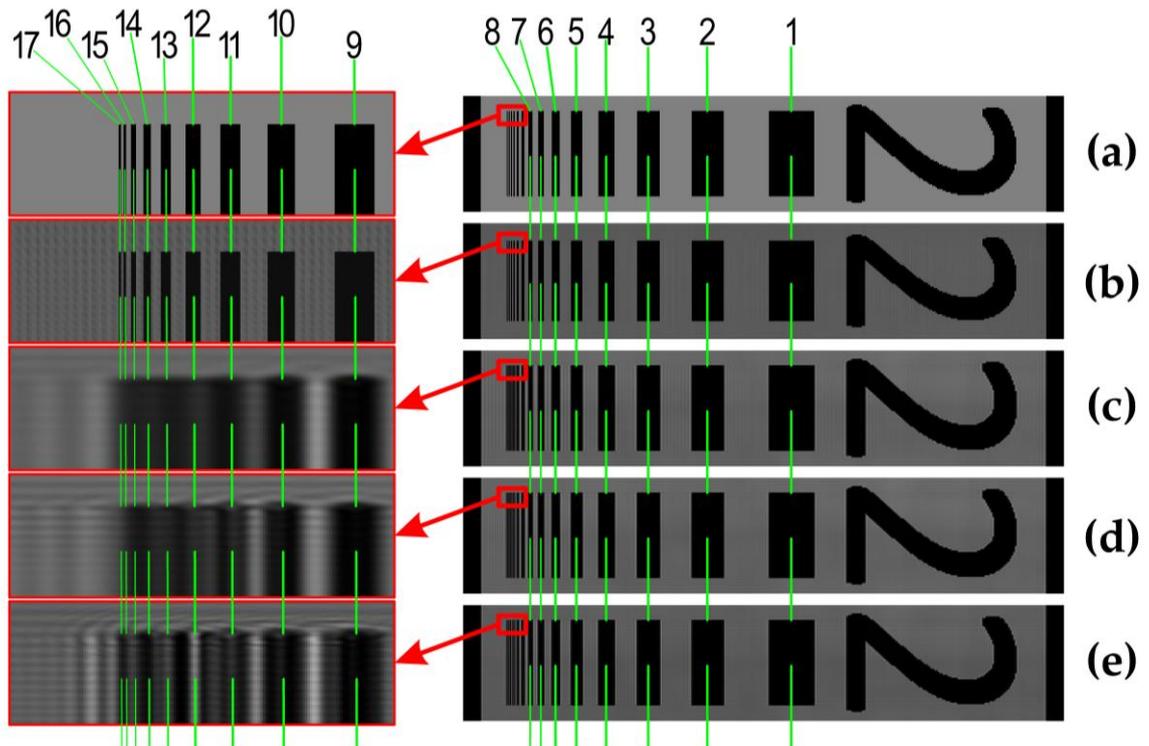


Рисунок 2.34 – Восстановленные голограммой изображения объекта «ступеньки с мирой»: а) вторая ступенька – тест-объекта (рисунок 2.30); б) вторая ступенька изображения тест-объекта восстановленного с голограммы, записанной на приёмном конце канала связи по переданной карте глубин и текстуре; в) вторая ступенька восстановленного изображения с ограниченного участка (c) спектра голограммы (рисунок 2.32); д) вторая ступенька восстановленного с ограниченного участка (d) спектра голограммы (рисунок 2.32); е) вторая ступенька восстановленного с ограниченного участка (e) спектра голограммы (рисунок 2.32)

Видны отличия от исходного изображения (а) восстановленных изображений, полученных представленным в настоящей работе методом (b) и методом, использующим Фурье-сжатие информации (c–d). Разрешение в восстановленном изображении (b) существенно превосходит разрешение как при равном случае (b) объёме передаваемой об объекте информации (c), так и при существенно больших объёмах информации (d, e). Небольшая пиксельная структура, видная при большом увеличении и не мешающая восприятию разрешающей способности метода, обусловлена несовершенством используемого метода D-FFT, такая структура, при использовании D-FFT, проявлялась и в других расчётах.

#### ***2.4.3. Сравнение передачи сжатыми фурье-образами с передачей двумя модальностями***

На рисунке 2.34 показаны вторые ступеньки восстановленного изображения 3D объекта «ступеньки с мирой». Восстановленные изображения оставшихся трёх ступенек дают точно такой же результат и поэтому здесь не приводятся в целях удобного расположения комбинированного рисунка 2.34. На нём в строке (a) приведено изображение второй ступеньки самого тест-объекта (рисунок 2.30). В строке (c) приведено изображение второй ступеньки, восстановленное голограммой, чей спектр был ограничен сегментом (c), равным по площади и по количеству пикселей исходному изображению. Видно, что контраст полос миры очень низок уже на 10 штрихе, что соответствует полосам с шириной в 16 пикселей. В строке (d) плохо различимы, и даже контраст у них инвертируется, штрихи 12–13. Эти штрихи имеют ширину в 6–4 пикселей. Площадь спектра голограммы в пикселях, которая восстановила это изображение, была в полтора раза больше, чем площадь исходного изображения. В 8 раз большей была площадь спектра голограммы, восстановившей изображение второй ступеньки (e). При этом изображения штрихов 14, 15 также теряют контраст, и он даже

инвертируется. Кроме того, на восстановленном изображении ступеньки (e) отчётливо видно сильное эхо, воспроизводящее изображения отсутствующих штрихов миры. Только в строке (b) изображения всех штрихов, включая последние два шириной в 2 пикселя видны полностью, видны контрастно и нет даже следов ложных изображений, как эхо в предыдущих. Во второй строке голограммой восстановлено изображение второй ступеньки объекта (рисунок 2.15), записанной уже после передачи по каналу связи 3D изображения объекта, согласно методу, изложенному в параграфе 2.1. Разрешение у восстановленного изображения предельно высокое, уверенно читаются последние самые тонкие штрихи № 15, 16, 17.

Видно, что первый алгоритм с передачей по каналу связи спектра голограммы, равного и даже большего по размеру, чем площадь пары кадров текстура + маска, уступает по разрешающей способности второму алгоритму с передачей пары текстура + маска по каналу связи. Причём в первом случае увеличение объёма данных почти на порядок (в восемь раз) при передаче пространственного спектра голограммы (e), всё же не даёт такой же разрешающей способности восстановленного изображения, как в восемь раз меньший по объёму информации алгоритм передачи текстура + маска с последующим синтезом голограммы уже на приёмном конце канала связи и восстановления с этой голограммы 3D изображения объекта (b).

#### ***Выводы параграфа 2.4***

Передача 3D голографической информации по каналу связи с помощью передачи двух модальностей 3D изображения объекта голографирования – текстуры его поверхности и топографической карты поверхности (маски) более эффективна, чем передача эквивалентной по объёму информации о спектре голограммы. При одинаковых объёмах передаваемой информации передача двумя модальностями обеспечивает более высокое разрешение в восстановленном

голограммой изображении. При попытках приблизиться по разрешающей способности к качеству передачи двумя модальностями, требуется передавать спектр голограммы существенно, на порядки, большего размера, чем объём этих модальностей.

Полученный результат может быть объяснён тем, что в предложенном методе передачи 3D голографической информации реализуется более точное попадание на распределение  $P(f_i)$  в 3D изображении, чем при использовании спектрального сжатия, подобного элементам JPEG. Это может послужить отправной точкой для более глубокого исследования путей кодирования с лучшим попаданием на имеющееся априорное распределение  $P(f_i)$  с целью сжатия 3D информации для её передачи по каналам связи, но и полученный результат уже пригоден для применения при передаче 3D голографической информации в сжатом виде.

### **Параграф 2.5. Неустраняемые ошибки, алиасинг и формфактор**

При синтезе голограмм, вычислительно повторяющем ход излучения в классической схеме рисунок 2.14, где рассеянное объектом когерентное световое поле описывается двумерным преобразованием Френеля, возникают вопросы дискретного представления достаточно сложной структуры голографических интерференционных полос, образованных объектным и опорным пучками.

Большая крутизна изменения глубины голографируемого объекта по полю голограммы может приводить к утрате поступательного хода искривления интерференционных полос в плоскости голограммы  $U_1(x_1, y_1)$  и приводить к разрывам интерференционных полос и даже к фантомным структурам [2.25].

Следствием этого является нарушение условий дифракции и потеря информации, восстанавливаемой голограммой в целом (рисунок 2.35). Чтобы этого избежать, необходимо при цифровом синтезе голограмм соблюдать неравенство (2.39).

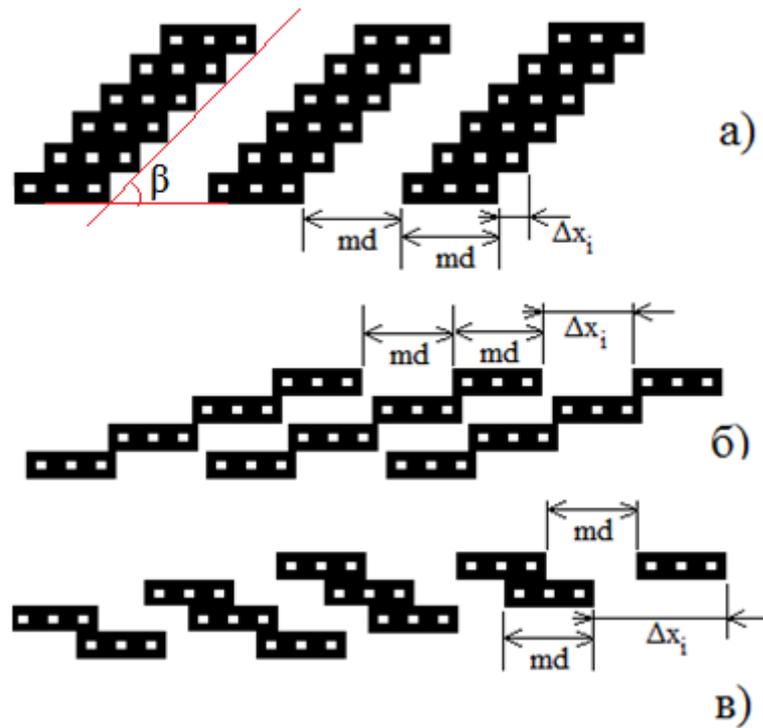


Рисунок 2.35 – Макет участка типовой голограммы с дискретно синтезированными интерференционными полосами шириной три квадратных пикселя и таким же пробелом:

а) сдвинутые от строки к строке примерно на 1 пиксель;

б) примерно на 2,7 пикселя; в) на 4,5 пикселя

Видно, что крутой рост глубины локального участка объекта, которому соответствует наклон полос больше, чем на рисунке 2.35б, приводит к исчезновению полосы и далее к возникновению фантомной интерференционной полосы, отсутствующей при записи классической аналоговой голограммы.

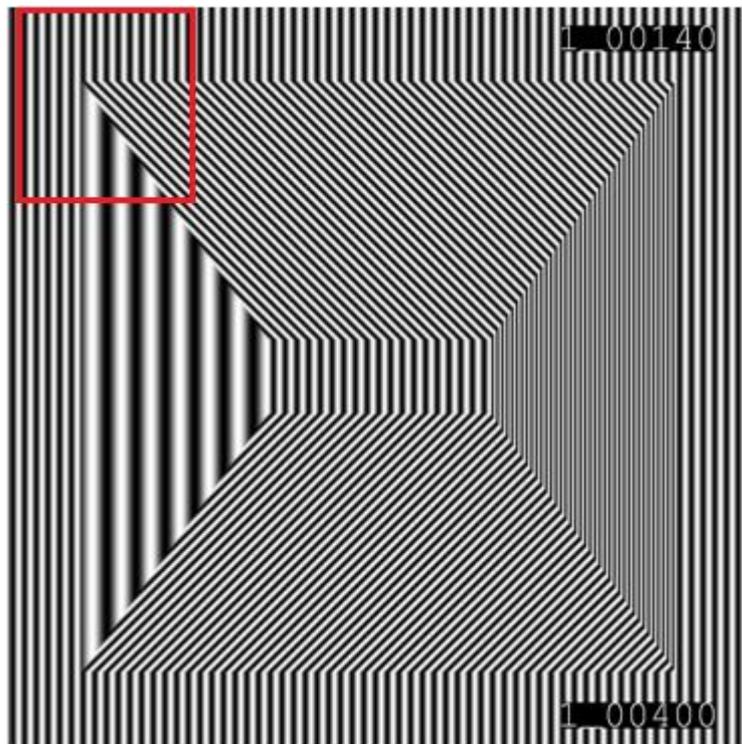
Моделируя запись голограммы простого объекта, можно получить фантомные линии на голограмме при  $\Delta x_i > md$  (рисунок 2.36б,в). Значит, сдвиг полосы при переходе от каждой  $i$ -ой строки к  $i+1$ -ой должен быть ограничен условием:

$$\Delta x_i \leq md . \quad (2.39)$$

Здесь  $\Delta x_i$  – сдвиг  $i$ -ой строки по отношению к строке с номером  $(i-1)$  для всех  $n$  строк, составляющих цифровую голограмму, а  $m$  и  $d$  – число точек (пикселей), формирующих полосу, и их размер по осям  $x$  и  $y$  соответственно. Период решётки  $D$  здесь равен  $2md$ .

Видно, что крутой рост глубины локального участка объекта, которому соответствует наклон полос больше, чем на рисунке 2.35б, приводит к исчезновению полосы и далее к возникновению фантомной интерференционной полосы, отсутствующей при записи классической аналоговой голограммы.

Для тестового объекта пирамида (рисунок 2.36а) это выглядит так (рисунок 2.36б,в,г). Здесь высота пирамиды на рисунке 2.36а и 2.36б минимальна и равна 16 периодам решётки, т. е. 16 длинам волн, которые на тест-объекте специально выбраны большими для наблюдения эффекта глазом. При увеличении высоты пирамиды вдвое структура полос разрушается, а при дальнейшем увеличении возникают фантомные линии, которые меняют направление, что указывает на возможность при восстановлении даже к замене ортоскопического изображения на псевдоскопическое. Такое нарушение пространственных частот и появление их фантомных аналогов называется алиасингом (aliasing) [2.26, с. 197].



а)

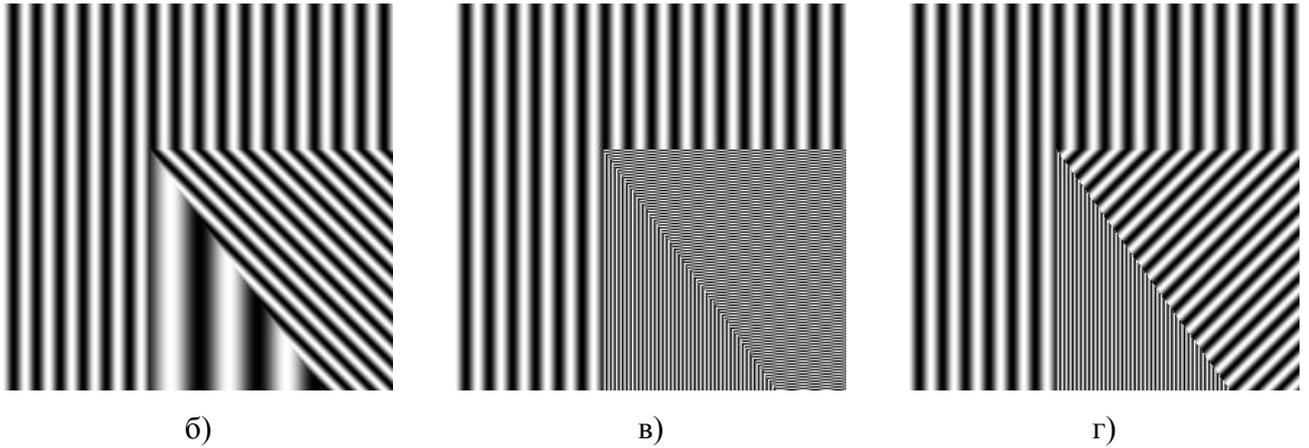


Рисунок 2.36 – Изображение структуры интерференционных полос тестового объекта – пирамиды: а) поле всей голограммы и б) её выделенный фрагмент высотой 16 периодов решётки, или  $16\lambda$ ; в) 128 периодов ( $128\lambda$ ) и г) 496 периодов ( $496\lambda$ )

На этой модели голограммы можно увидеть, что при невыполнении условия (2.39) структура голограммы разрушается, а при дальнейшем увеличении глубины объекта ( $496\lambda$ ) даже возникают фантомные интерференционные линии.

Дальнейшее увеличение диапазона углов наклона интерференционных полос связано с возникновением частичного наложения точек (пикселей), при экспозиции голограмм.

Это ограничение связано с шириной интерференционных полос  $D=2md$  в их основании и их толщины  $D=2md\cos(\beta)$  при наклоне (рисунок 2.36), где  $\beta$  задаётся условием (2.40).

$$\operatorname{tg}(\beta) \leq d / \Delta x \quad (2.40)$$

Здесь  $\Delta x$  лежит в диапазоне  $(0 \div md)$ . Выражая косинус через тангенс и рассматривая (рисунок 2.35) его предельные значения  $(1/m) < \operatorname{tg}(\alpha) < d/\Delta x$ , получим (2.41) и (2.42), которые по условию Брэгга, связывают период решётки  $D$  с углом дифракции  $\theta$  восстанавливающего пучка, регулируя

$$2D \sin(\theta) = 4md \sqrt{\frac{1}{1 + (d/\Delta x)^2}} \sin(\theta) = \lambda, \quad (2.41)$$

$$\lambda \left( \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{4m^2 d} \right) < \sin(\theta) < \lambda \left( \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + d^2}}{4md (\Delta x)^2} \right). \quad (2.42)$$

расстояние от голограммы, на котором (0)-ой и (-1)-ый пучки разойдутся в пространстве при восстановлении. Следовательно, восстановленное цифровой голограммой изображение будет формироваться лучами, дифрагировавшими в диапазоне углов от  $\theta_{min}$  до  $\theta_{max}$ .

$$\left\{ \begin{array}{l} \theta_{min} = \arcsin \left( \lambda \frac{\sqrt{m^2 + 1}}{4m^2 d} \right), \\ \theta_{max} = \arcsin \left( \lambda \frac{\sqrt{(\Delta x)^2 + d^2}}{4md (\Delta x)^2} \right). \end{array} \right. \quad (2.43)$$

Эти углы ограничивают пространство восстановления изображения. Поскольку задача определения этих граничных условий многопараметрическая, мы её решение организовали в виде динамической таблицы в Mathcad, как элемент программы синтеза голограммы. Это позволило минимизировать выход за граничные условия, определяемые критерием Найквиста, приводящий к возникновению ложных изображений, хотя полностью от эффекта при голографировании 3D объектов избавиться нельзя.

Действительно, на рисунке 2.37 на примере сферического объекта хорошо видно, что для 3D объектов голографирования нарушение условия (2.40) является имманентным. Чем больше наклон поверхности  $\alpha$ , тем меньше расстояние между соседними пучностями  $\Delta D_i$ , что рано или поздно неминуемо приводит к нарушению условия Найквиста [2.16], напрямую вытекающего из теоремы отсчётов Котельникова [2.15]. Сформулированное в нём условие о необходимости каждую из пространственных гармоник регистрировать не менее чем двумя отсчётами невозможно выполнять не на всех участках объёмного объекта голографирования, поскольку при  $\alpha$  стремящемся к  $\pi$ , как это видно на

рисунке 2.37, период интерференционных полос  $\Delta D_i$  обязательно становится меньше любой наперед заданной величины дискретного шага  $d$ , определяемого размером пикселя. Этот эффект для любого 3D объекта неизбежен ввиду его ограниченности в объёме пространства, т. е. всегда есть участки его поверхности, тангенциальные к направлению его наблюдения (оптической оси).

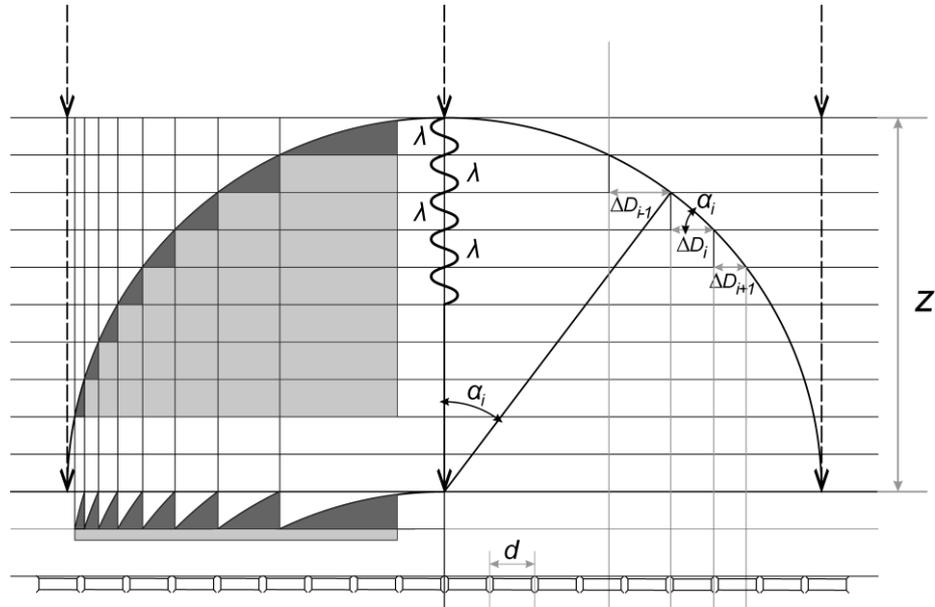


Рисунок 2.37 – Формирование интерференционных полос плоской опорной волной, падающей вертикально на волну, рассеянную сферическим объектом глубиной  $z$ , равной его радиусу. Угол  $\alpha_i$  – нормаль к участку  $i$  изофазной поверхности сферической волны,  $\Delta D_i$  – период в районе  $i$ -ой интерференционной полосы,  $d$  – размер дискреты (пикселя) на голограмме

Этот эффект неминуемо присутствует не только в цифровых голограммах, но и в классических аналоговых, записанных на фотоматериалах. Однако в последних максимальная разрешающая способность намного превышает период основных голографических интерференционных полос и практически всегда выполняются условия (2.44).

$$\begin{aligned} \Delta D_i &\leq 2d, \\ \operatorname{tg}(\alpha_i) &\leq \lambda/\Delta D_i \end{aligned} \quad (2.44)$$

Для видимого диапазона длин волн записи – воспроизведения  $\lambda \sim 0,5$  мкм и разрешающей способности голографических материалов порядка 10 тыс. лин/мм

углы  $\alpha_i$  составляют несколько градусов, а при разрешающей способности на уровне размера молекул, где  $d \sim 1$  нм – порядка десятой градуса. Для сферы рисунок 2.37, радиусом 1 см отношение площадей с нарушением условий Найквиста к полной площади сферы будет порядка  $10^{-5}$ . Такого же порядка (одна тысячная процента) будет и интенсивность ложного сигнала, восстановленного этим участком голограммы. Мы его зачастую не наблюдаем в силу его малости по сравнению с другими шумами голограмм. Но в цифровых голограммах с большей величиной дискретизации  $d$  этот эффект проявляется достаточно сильно.

Возникающие биения, связанные с появлением ложных, отсутствовавших в реальном волновом фронте, пространственных частот, подобных приведённым на рисунке 2.36, могут приводить к серьёзным искажениям восстановленной голограммой волны. Например, изменение наклона интерференционных полос, соответствующее набору фазы по пространству голограммы (рисунок 2.36б), может приводить к появлению пространственных гармоник, похожих на её уменьшение (рисунок 2.36г), что соответствует изменению выпуклой фигуры (ортоскопическое изображение, рисунок 2.38а) на вогнутую (псевдоскопическое изображение рисунок 2.38б).

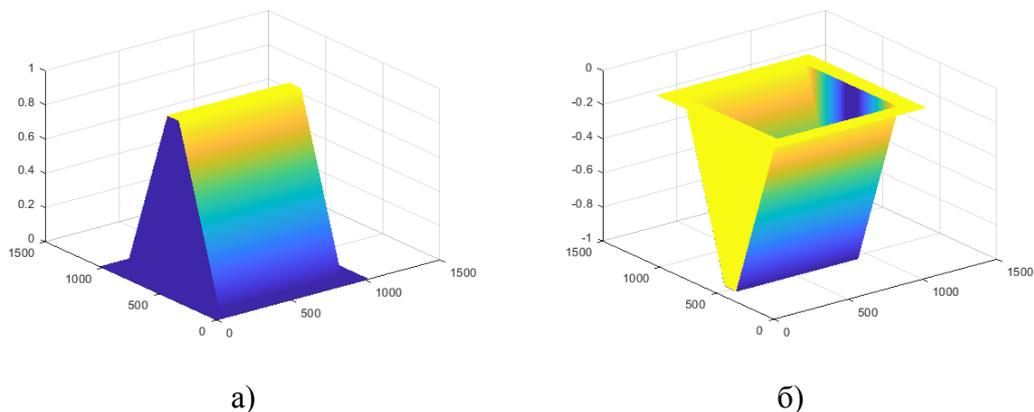


Рисунок 2.38 – Призма при инвертировании направления интерференционных полос может превратиться из выпуклой фигуры (а) в вогнутую (б)

### 2.5.1. Примеры нарушения условия Котельникова – Найквиста и меры противодействия их следствиям

Другое проявление этого эффекта – это появление в восстановленном изображении фантомных структур, т. е. объектов, отсутствовавших при записи, т. н. артефактов, или «духов», как их часто называют. На рисунке 2.40 приведены примеры таких артефактов для случая записи 3D изображения сферической поверхности рисунок 2.39.

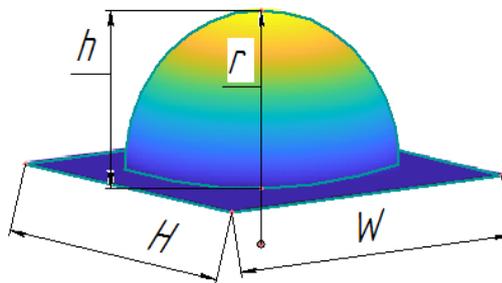
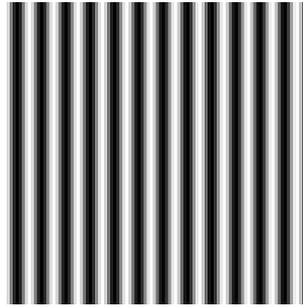


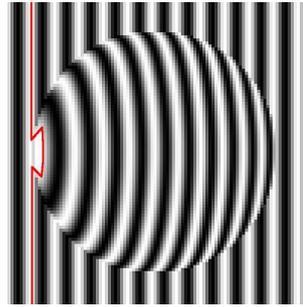
Рисунок 2.39 – Модельный объект – полусфера:  $H = W = 100$  пикс. ( $> r$ ) – длина и ширина поля изображения;  $r = 0.8 \times H/2 = 40$  пикс. – радиус сферы;  $h = (0 - 40)$  пикс. – высота шарового слоя;  $x$  и  $y$  – координаты голограммы

На рисунке 2.40 видно, как при увеличении высоты  $h$  объекта голографирования размером  $100 \times 100$  пикселей, растёт количество полос на голограмме и, соответственно увеличению градиента, уменьшается эффективная ширина интерференционных полос, вначале, при  $h=0$ , составлявших 8 пикселей на период. Наклон опорной волны соответствовал отставанию плоского опорного волнового фронта  $7,8\lambda$  на ширине голограммы 100 пикселей. Высота сферы  $h$  изменялась и составляла от  $\lambda$  до  $28\lambda$ . Красным помечена одна из полос, которая распадается и не обнаруживается как сплошная кривая при увеличении  $h$  до  $6\lambda$ . В областях с увеличивающимся градиентом возникают сбои и разрывы интерференционных полос, организуются артефакты, как это похоже на кольца Френеля. Видно, что подобные кольца зарождаются при наклонах поверхности объекта, порождающих толщину интерференционной полосы меньше периода

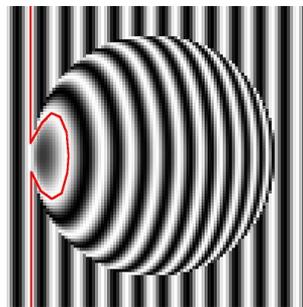
основной (несущей) интерференционной решётки, в соответствии со схемой на рисунке 2.37.



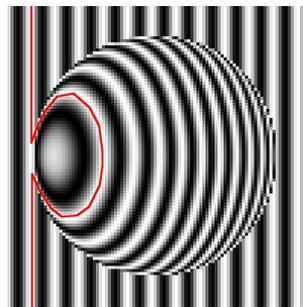
а)



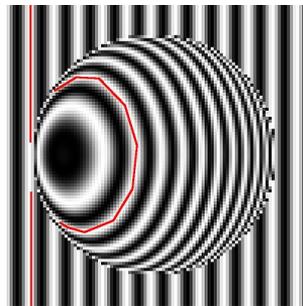
б)



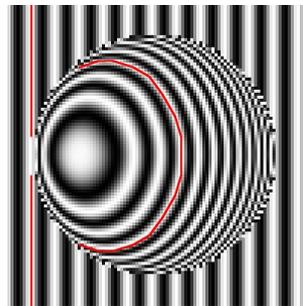
в)



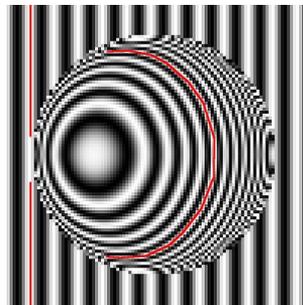
г)



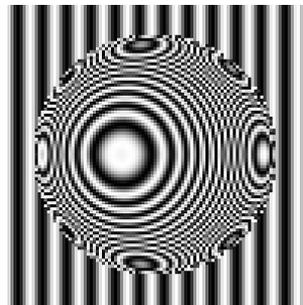
д)



е)



ж)



з)

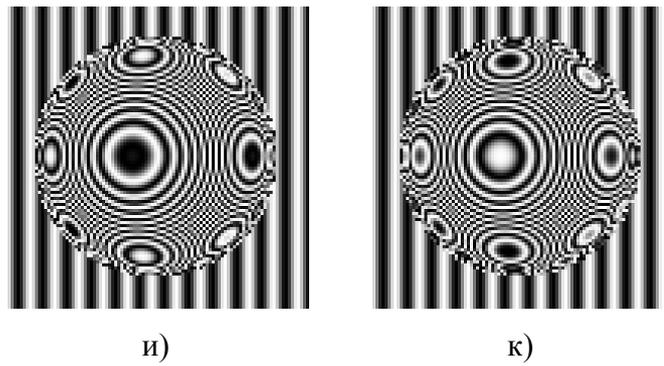


Рисунок 2.40 – Голограмма, записанная в схеме рисунок 2.37 наклонным плоским опорным пучком, на рассеянное тестовым объектом в виде сферы, сжатой по высоте до:  
а)  $h=0$ ; б)  $h=\lambda$ ; в)  $h=2\lambda$ ; г)  $h=3\lambda$ ; д)  $h=4\lambda$ ; е)  $h=6\lambda$ ; ж)  $h=8\lambda$ ; з)  $h=16\lambda$ ; и)  $h=24\lambda$ ; к)  $h=28\lambda$

Видно, что при дальнейшем уменьшении толщины интерференционных полос  $\Delta D_i$  возникают повторные артефакты, затем ещё и ещё более высоких порядков. Это связано с нарушением условия (2.44), т. е. с превышением частоты Найквиста вызывающем «просачивание сигнала из высшей зоны Найквиста в нижнюю» [2.26, с. 197]. На рисунках 2.41 и 2.42 это показано схематически ещё раз. Видно, как возникают разрывы ранее непрерывного ряда пикселей при увеличении частоты решётки, когда её период сравним с шагом пикселя. При этом возникает рисунок, отчасти повторяющий голографируемый объект.

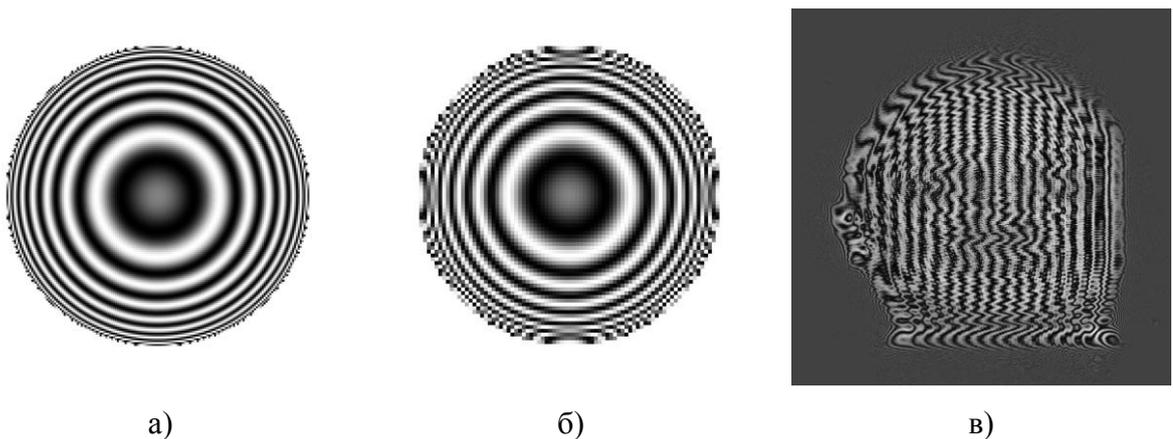


Рисунок 2.41 – Кольца Френеля, образованные объектом – сфера высотой  $8\lambda$  из:  
а)  $200 \times 200$  и б)  $100 \times 100$  пикселей; в) голограмма 3D объекта, с появляющимися аналогичными артефактами на участках с высоким градиентом высоты

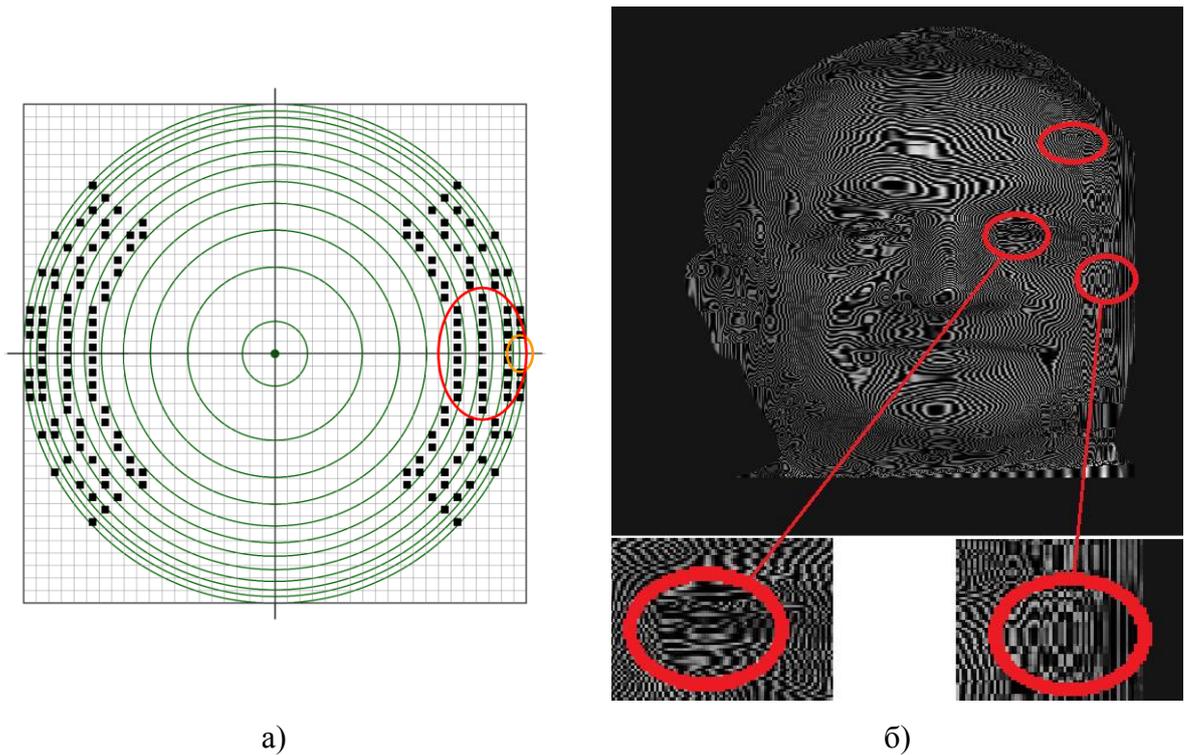


Рисунок 2.42 – Структура голограммы сферы, сформированная пикселями в декартовой системе координат, когда структура разрывов образует артефакты, подобные голографируемому объекту

Аналогичным образом, при записи более сложных объектов голографирования, возникают артефакты, отчасти повторяющие объект голографирования.



Рисунок 2.43 – Восстановленное изображение с кольцевыми артефактами

### 2.5.2. Методы борьбы с артефактами, возникающими при больших градиентах перепадов высот 3D объектов

Устранить этот эффект можно только увеличивая число отсчётов уменьшая размер дискретности  $d$ , что значительно увеличивает требования к вычислительной мощности используемого оборудования и его скорости обмена данными. Либо необходимо синтезировать голограммы не полной глубины, как это показано на рисунке 2.44.

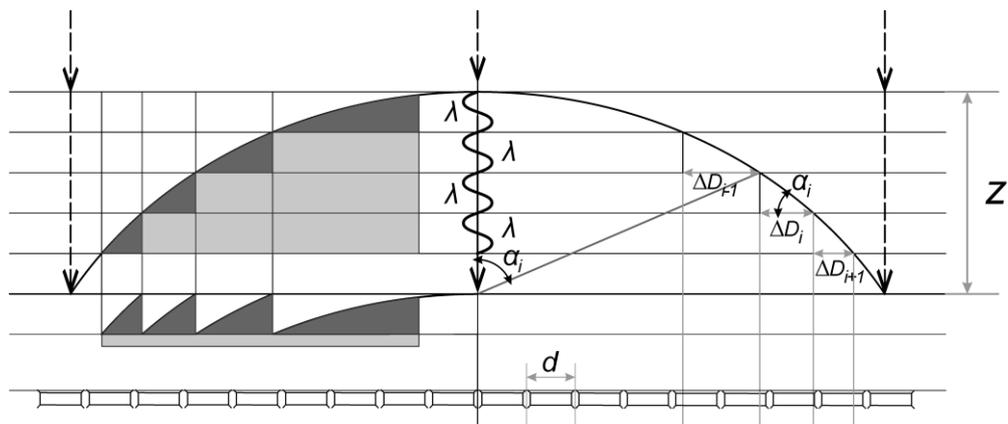


Рисунок 2.44 – Формирование интерференционных полос плоской опорной волной, падающей вертикально на волну, рассеянную сектором сферического объекта глубиной  $z$ , равной его части его радиуса. Угол  $\alpha_i$  – направление к участку  $i$  изофазной поверхности сферической волны,  $\Delta D_i$  – период в районе  $i$ -ой интерференционной полосы,  $d$  – размер дискретности на голограмме

Однако в этом случае надо либо смириться с искажением глубины, либо найти способы её восстановления. Одним из них может быть проекционная деформация с помощью бителецентрической телескопической проекционной системы [2.25], которая проецирует 3D изображение с продольным увеличением больше поперечного.

Учитывая указанные ограничения, реальные изображения могут иметь различную глубину, поэтому для цифрового голографирования следует найти способ восстановления изображений с глубиной больше, чем позволяет цифровая голограмма.

Одним из них является оптическое масштабирование. На рисунке 2.45 приведена схема телескопической системы, которая, в зависимости от расстояния между задней фокальной плоскостью первого объектива и передней фокальной второго, имеет меняющиеся пропорции между продольным и поперечным увеличением [1.14, с. 154]. Такая схема может быть использована, например, при компенсации глубины восстанавливаемого 3D изображения, частично изменяя его из подобного приведённого на рисунке 2.44 в изображение, близкое приведённое на рисунке 2.37.

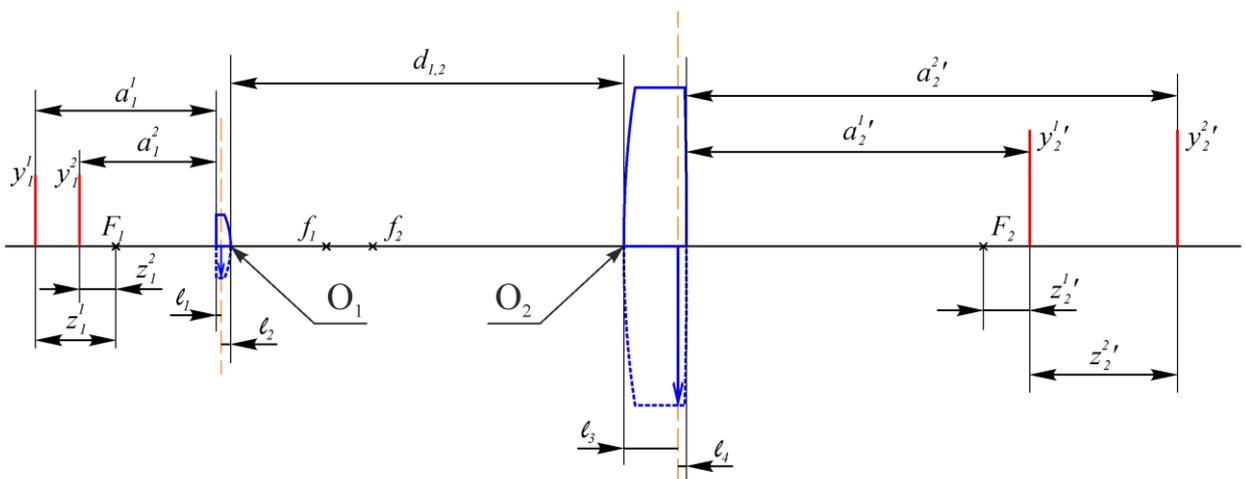


Рисунок 2.45 – Телескопическая система из объективов  $O_1$  и  $O_2$  с несовпадающими в общем случае задним фокусным отрезком первого объектива и передним фокусным второго. Отрезки  $a_1^1$  и  $a_1^2$  – показывают расположение задней и передней плоскости, между которыми находится отображаемый системой 3D объект, а отрезки  $a_2^1$  и  $a_2^2$  показывают расположение соответствующих им задней и передней плоскости, между которыми находится 3D изображение объекта. Положение главных плоскостей эквивалентной тонкой линзы показано пунктиром

Здесь в верхней половине, выше оптической оси, показаны реально использованные в эксперименте объективы, а в нижней – эквивалентные им тонкие линзы, положение которых выбиралось регрессионным анализом. Остатки регрессии, полученные вариациями предикторов  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $l_4$ ,  $f_1$ , и  $f_2$ , с целью минимизировать отличия расчётных положений изображений от экспериментально наблюдаемых была вполне достаточной. Отличие экспериментально измеренных  $a_2^1$  и  $a_2^2$  от расчётных не превышало 2 %, поэтому

полученную точность макетирования процессов построения изображений по схеме из рисунка 2.45 с эквивалентными тонкими линзами можно считать вполне удовлетворительной, что позволило рассчитывать продольное (2.45, 2.46) и поперечное увеличение (2.47) по формулам тонких линз [2.27].

$$\left\{ \begin{array}{l} a_{2'}^1 = f_2 + \frac{(a_1^1 - f_1) \cdot f_2^2}{(a_1^1 - f_1) \cdot (d_{1,2} - f_1 - f_2) - f_1^2}, \\ a_{2'}^2 = f_2 + \frac{(a_1^2 - f_1) \cdot f_2^2}{(a_1^2 - f_1) \cdot (d_{1,2} - f_1 - f_2) - f_1^2}, \end{array} \right. \quad (2.45)$$

$$z_1^1 \cdot z_2^{1'} = f_1 \cdot f_1', \quad (2.46)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} y_{2'}^1 = \frac{y_1^1 \cdot f_1 \cdot f_2}{z_1^1 \cdot (d_{1,2} - f_1 - f_2) - f_1^2}, \\ y_{2'}^2 = \frac{y_1^2 \cdot f_1 \cdot f_2}{z_1^2 \cdot (d_{1,2} - f_1 - f_2) - f_1^2}. \end{array} \right. \quad (2.47)$$

Полученные в расчёте значения параметров схемы были следующими:  $l_1=4,5$  мм,  $l_2=9$  мм,  $l_3=51$  мм,  $l_4=8$  мм,  $f_1=99$  мм,  $f_2=287$  мм. Проведённые в схеме рисунок 2.46 измерения помогли измерить параллакс восстановленных голограммой 3D изображений (глава 4).

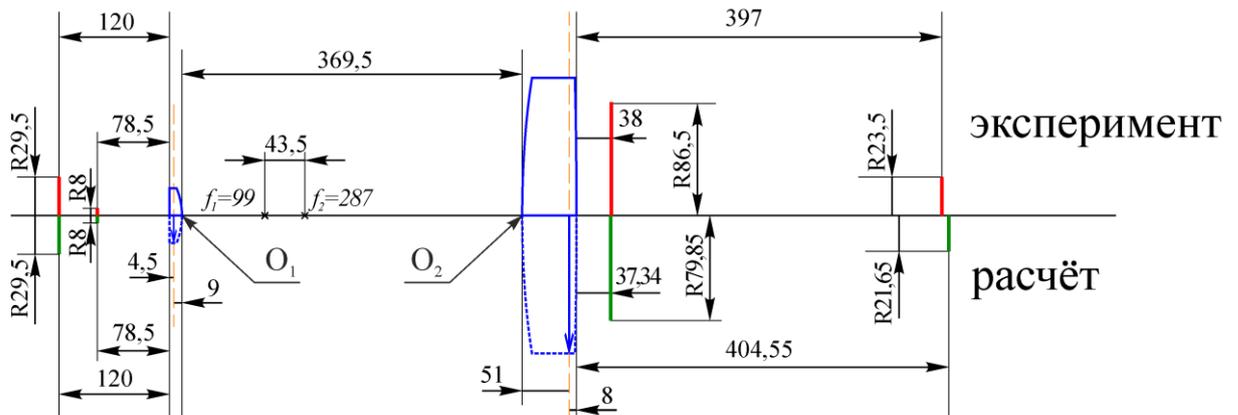


Рисунок 2.46. Параметры телескопической системы.

Верхняя полушарность – эксперимент, нижняя – расчёт

Видно, что ошибка продольного увеличения находится в пределах  $(397-38)/(120-78,5)=359/41,5=8,65$  мм экспериментально и  $(404,55-37,34)/(120-78,5)=367,21/41,5=8,85$  мм расчётно, т. е. в пределах  $(8,85-8,65)/8,85=2,2$  %;

- Величина поперечного увеличения  $(86,5/29,5)=2,93$  – экспериментально второй план и  $(79,85/29,5)=2,7$  – расчётно второй план. Отличие в положении изображения второго плана  $(2,93-2,7)/2,93=7,85$  %;

- Также  $(23,5/8)=2,94$  – экспериментально первый план и  $(21,65/8)=2,7$  – расчётно первый план. Отличие в положении изображения первого плана  $(2,94-2,7)/2,94=8,16$  %.

Полученная точность измерений была получена для трёх типов голограмм – Денисюка, Бентона и Лейта – Упатниекса. Измерения исходных и увеличенных телескопической системой 3D изображений, восстановленных этими голограммами, оказались идентичными как в прямом ходе лучей, так и в обратном.

Предложенный метод позволил увеличить неглубокие 3D изображения на голограмме до приемлемых размеров, одновременно увеличивая поперечный размер восстановленного голографического изображения. Телескопическая система, одновременно может увеличивать поперечный размер голографического изображения и пропорционально его квадрату – продольное. Это очень удобно, поскольку можно создавать исходные сравнительно малоразмерные голограммы для проекции 3D изображений приемлемых размеров и при этом компенсировать малую глубину цифровых голограмм.

В случае совмещения точек заднего фокуса объектива  $O_1$  с передним фокусом объектива  $O_2$ , телескопическая система становится бителецентрической и может быть использована в метрологических задачах [2.28]. Это позволяет с большой точностью переносить изображение, восстановленное малоразмерной голограммой с небольшой глубиной в пространство большого размера, увеличивая глубину изображения.

Конечно, при этом следует учитывать инвариант Лагранжа – Гельмгольца, ставящий в соответствие линейное  $V_1 = (y_2^1 / y_1^1)$ ;  $V_2 = (y_2^2 / y_1^2)$  и угловое  $W_1 = \alpha_1' / \alpha$  увеличение (2.48):

$$V_1 \cdot W_1 = V_2 \cdot W_2 = n/n', \quad (2.48)$$

где  $\alpha_1' = (y_2^1 / a_2^1)$  и  $\alpha_2' = (y_2^2 / a_2^2)$ . Здесь  $y_1^1$ ;  $y_1^2$  и  $y_2^1$ ;  $y_2^2$  – поперечные размеры объекта и его изображения в соответствующих плоскостях  $z_1^1$ ,  $z_1^2$  и  $z_2^1$  и  $z_2^2$ . Поскольку у нас оптическая система работает в воздушной среде, то  $n=n'$ .

На рисунке 2.47 приведён пример переноса с увеличением восстановленного изображения без искажений (рисунок 2.47а,б) и с искажениями, (рисунок 2.47в–е). Красным и зелёным обозначены плоскости поверхностей, прилежащих к поверхности объектива и фокальной плоскости соответственно.

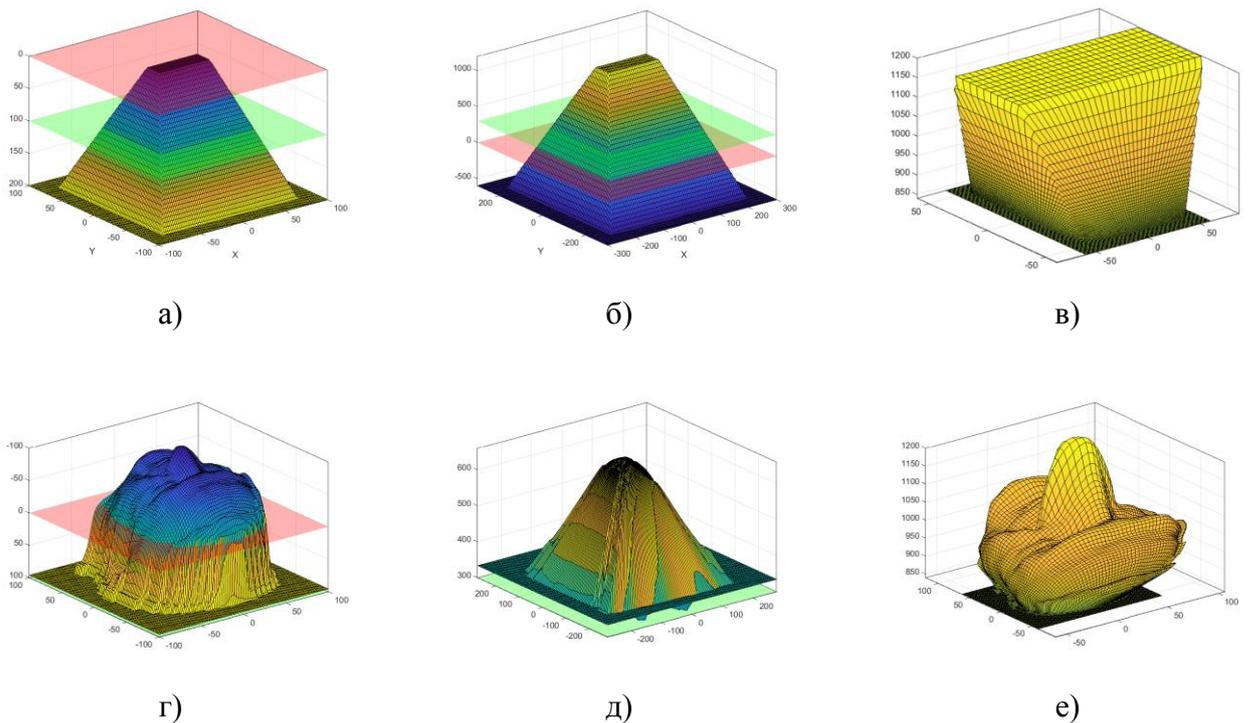


Рисунок 2.47 – Объект пирамида (а) и его изображения (б) и (в); объект 3D портрет (г) и его изображения (д) и (е): а) объект  $a_1 = 0 \div 200$ ; б) изображение  $f_1 = 100$ ;  $f_2 = 300$ ;  $d_{1,2} = 400$ ;  $a_2' = -500 \div 1000$ ; в) изображение  $f_1 = 100$ ;  $f_2 = 300$ ;  $d_{1,2} = 600$ ;  $a_2' = 850 \div 1200$ ; г) объект  $a_1 = 0 \div 200$ ; д) изображение  $f_1 = 100$ ;  $f_2 = 300$ ;  $d_{1,2} = 600$ ;  $a_2' = 300 \div 650$ ; е) изображение  $f_1 = 100$ ;  $f_2 = 300$ ;  $d_{1,2} = 600$ ;  $a_2' = 850 \div 1200$

Видно, что изображение (б) является неискажённым образом объекта (а), поскольку выполняется условие ( $f_1 + f'_2 = d_{1,2}$ ) а изображение (в) претерпело серьёзные деформации в силу невыполнения этого условия. На рисунке 2.47г, показан 3D портрет, а на (д), (е) приведены его изображения при невыполнении условия ( $f_1 + f'_2 = d_{1,2}$ ).

С учётом всех вышеперечисленных ограничений на основе объектива «ВАЛ» и объектива из комплекта СИН с фокусными отрезками (рисунок 2.46) был собран макет устройства проекции голографического изображения с увеличением оптической системой восстановленного голограммой изображения. При поперечном увеличении  $47 / 16 = 2,94$  (рисунок 2.48а,б) было реализовано продольное увеличение  $398 / 42 = 9,48$  (рисунок 2.49а,б,в) восстановленного голограммой 3D изображения.

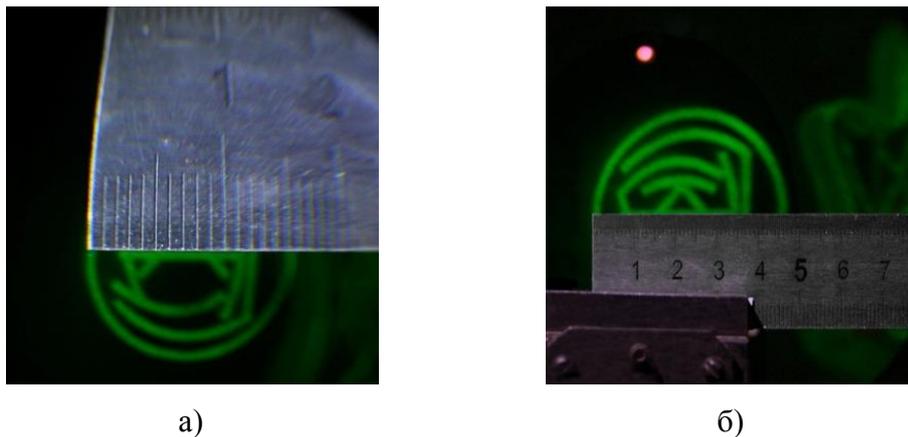


Рисунок 2.48 – а) восстановленное голограммой изображение;  
б) увеличенное телескопической системой голографическое изображение

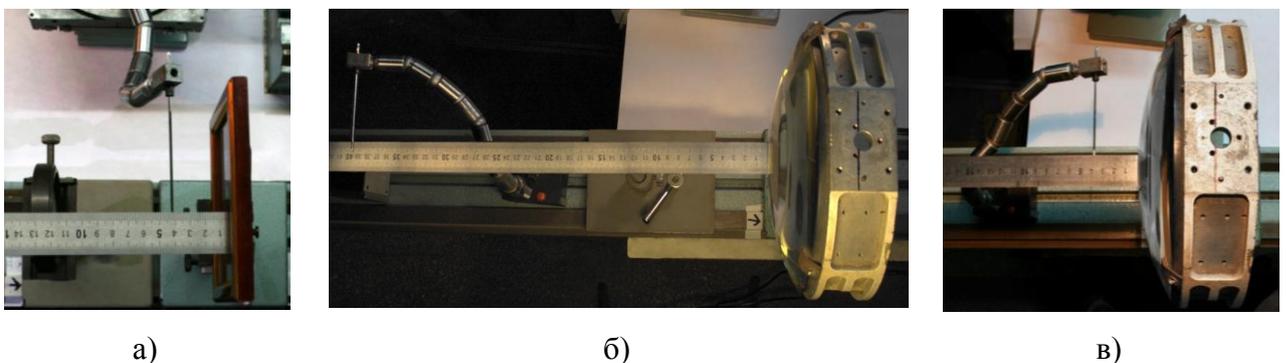


Рисунок 2.49 – а) расположение вынесенного перед голограммой фрагмента 3D изображения;  
б) его положение за объективом  $O_2$ , в) положение поверхности голограммы за объективом  $O_2$

Полученное более, чем трёхкратное отношение продольного размера изображения к поперечному без видимых 3D деформаций не является предельным и расчёты по схеме (рисунок 2.45) позволяют надеяться на возможную реализацию существенно большего увеличения продольного размера 3D голографического изображения.

Решение обратной задачи – вычисление требуемой формы объекта, которая при прохождении через телескопическую систему образует требуемое правильное 3D изображение, позволяет заложить необходимые проекционные деформации при синтезе голограммы, которые в цифровом виде осуществляются сравнительно легко. Такой подход существенно расширяет возможности формирования голограмм, мультиплексирования голографических изображений и уменьшения влияния одного из неустраняемых последствий дискретизации голограммы (рисунок 2.37).

Другим неустраняемым ограничением голограмм, причём не только цифровых, но и классических аналоговых, является ограничение, связанное с неравномерным распределением экспозиции записывающего излучения по голограмме, т. е. связанное с формой голограммы. Он уже упоминался в параграфе 1.2, как эффект формфактора, но подробно будет рассмотрен ниже, в главе 3.

### ***Выводы параграфа 2.5***

При записи (синтезе) цифровых голограмм возникают специфические шумы дискретизации, связанные с неустраняемым в принципе превышением частоты Найквиста. Такие шумы часто эхом повторяют образ самого голографируемого сигнала. Устранить их можно двумя способами – либо увеличивая число дискретных отсчётов голограммы, либо соглашаясь с продольной деформацией изображения, восстанавливаемого дискретной цифровой голограммой. В первом случае это требует существенного увеличения объёма обрабатываемых данных

(пропорционально квадрату линейного размера голограммы в пикселях), а во втором – привлечения дополнительных оптических систем для исправления появляющихся искажений.

Реальные изображения могут иметь различную глубину и различные градиенты перепада высот (глубин). Например, 3D изображение человека обязательно будет иметь участки больших градиентов глубины, поэтому для цифрового голографирования следует найти способ восстановления изображений с глубиной больше, чем позволяет цифровая голограмма. Одним из них является оптическое масштабирование [2.25].

Наряду с описанным выше эффектом превышения граничной частоты Найквиста к неустранимым эффектам, приводящим к снижению дифракционной эффективности голограмм и их информационной ёмкости, как было отмечено выше, относится так называемый формфактор, влияния которого невозможно избежать. Ввиду своей актуальности он будет рассмотрен отдельно, в следующей, главе 3 диссертации.

## **Выводы главы 2**

Предложен способ записи голограмм на приёмном конце канала связи, заключающийся в освещении 3D объекта, поочерёдно простым некогерентным светом и фоторегистрацией текстуры поверхности голографируемого объекта и светом со сформированными заранее паттернами структурированного света, например из латерально освещающих 3D объект параллельных полос, по искривлениям которых вычисляется карта высот объекта голографирования, с последующей передачей сформированных таким образом двух 2D кадров и цифровом синтезе на приёмном конце канала связи голограммы, восстанавливающей 3D изображение исходного объекта на передающем конце канала связи.

При регистрации карты высот поверхности 3D объекта методом проекции на объект голографирования паттернов структурированного света в виде параллельных полос и фиксации их изопроекции возникает структура искривлённых полос, которая несёт информацию о поверхности (маски) 3D регистрируемого объекта, эквивалентную информации на голограмме с непрерывным горизонтальным и вертикальным параллаксом, записанной на существенно более длинной волне записи, соответствующей даже не ИК диапазону электромагнитного излучения, а терагерцовому или даже радиодиапазону, что открывает возможности различных видов комплексирования мультиспектральных 3D изображений на приёмном конце канала связи и создание гиперспектральных голограмм. Маску также можно синтезировать, зондируя объект голографирования ультразвуком, а накладывать на неё текстуру, зарегистрированную фотографированием объекта в видимом, или другом диапазоне электромагнитного спектра, что открывает новые возможности в области создания 3D изображений при работе под водой, в космосе и в других недоступных и агрессивных средах.

Показано, что спектральный состав голограммы состоит из двух типов пространственных частот разной физической природы. Один из них эквивалентен несущей пространственной частоте и отвечает за разделение восстановленных порядков дифракции при восстановлении изображения и который может быть отрегулирован цифровым образом, и второй, отвечающий за девиацию несущей частоты, несущий информацию о голографируемом объекте, который несёт информацию о голографируемом 3D объекте и цифровым образом может быть скорректирован с целью устранения аберраций и внесения других желаемых исправлений. Устранение первого типа пространственных частот сокращает объём передаваемой информации и соответствует (ГОСТ Р 59321.3 2021, п. 38) сжатию данных в цифровой голограмме более, чем на три порядка, с уменьшением размера ключевой информации, содержащейся в файле цифровой голограммы.

Передача 3D голографической информации по каналу связи с помощью передачи двух модальностей 3D изображения объекта голографирования – текстуры его поверхности и топографической карты поверхности (маски) более эффективна, чем передача эквивалентной по объёму информации о спектре голограммы. При одинаковых объёмах передаваемой информации передача двумя модальностями обеспечивает более высокое разрешение в восстановленном голограммой изображении. При попытках приблизиться по разрешающей способности к качеству передачи двумя модальностями, требуется передавать спектр голограммы существенно (на порядки) большего размера, чем размер файла с этими модальностями.

Возникающие при синтезе цифровых голограмм 3D изображений на приёмном конце каналов связи ограничения, связанные с появлением биений и явлений алиасинга, вызванных дискретизацией голограммы, синтезированной пикселями конечного размера и возрастающее влияние таких биений и алиасинга с ростом глубины регистрируемого голограммой 3D объекта неизбежно в случае синтеза цифровой голограммы 3D объектов. Существенным образом компенсировать биения и алиасинг при восстановлении такой компьютерной голограммы можно с использованием бителецентрической телескопической системы, применяемой для метрологических задач, ввиду возможности у такой системы, с одной стороны, не искажающего увеличения изображения, восстановленного компьютерной голограммой, а, с другой стороны, увеличения глубины изображения пропорционально квадрату поперечного увеличения. Это позволяет создавать большеразмерные 3D изображения полной глубины при использовании небольших голограмм, восстанавливающих на входе бителецентрической телескопической системы не глубокие малоразмерные 3D изображения.

Можно считать, что передача двух кадров по радиоканалу отодвигает на второй план экзотические методы мультиэкспозиции, которые к тому же плохо справляются с регистрацией динамических изображений.

### ГЛАВА 3. ОГРАНИЧЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ ЁМКОСТИ ГОЛОГРАММ ФАКТОРОМ ФОРМЫ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЕГО СВОЙСТВ

Начиная с первых работ по голографии [1.8–1.11] всегда перед разработчиками стоял принципиальный вопрос – на каком голографическом материале записывать ту или иную голограмму. Очень удачно сложилась история техники в том, что к моменту зарождения голографии уже достаточно давно развилась индустрия фотоматериалов. Разработанные для фотографии и спектроскопии фотографические материалы на галоидосеребряных эмульсиях уже производились на флагмане социалистической индустрии «ПО Славич», сегодня ОАО «Компания Славич». Это известные во всём мире голографические материалы ПФГ-01, ПФГ-02, ПФГ-03 и ПФГ-04. Последние относятся к бессеребряным материалам и сделаны на основе бихромированной желатины. Такие материалы и сегодня широко используются в голографии [3.1, 3.2].

Однако мечта всех, кто занимается голографией о стопроцентном преобразовании света в восстановленное голограммой изображение на этих материалах, не была достигнута. И не только по причине технологических трудностей. Для тонких голограмм, используемых в схеме Лейта и Упатниекса [1.10, 1.11], есть известный теоретический предел, который для амплитудных материалов не позволяет достигать дифракционную эффективность выше 6,25 %, а для фазовых – 33,9 % [3.2]. Поэтому уже многие годы внимание всех исследователей приковано к так называемым «толстым» голографическим слоям, удовлетворяющим параметру объёмности Клейна, в которых можно реализовать фазовые фотоиндуцированные изменения, т. е. изменения под действием света диэлектрической проницаемости вещества, приводящей к фотоиндуцированному изменению показателя преломления на длине волны восстановления. Теоретически такие материалы, в случае отсутствия собственного поглощения, могут достигать 100 % дифракционной эффективности. Поэтому множество исследователей активно занялись разработкой таких материалов. Однако вскоре

выяснилось, что большинство из них несовершенно. Либо имеет сильное собственное поглощение, без которого невозможно обеспечить фоточувствительность, либо обладает значительной анизотропией, искажающей дифракцию, как это бывает в кристаллах, либо недостаточный диапазон фотоотклика, не позволяющий создать необходимую дифракционную эффективность, либо недостаточна толщина голографического материала, либо есть почти всё, но голограмма долго не живёт. Словом, множество проблем не позволяет выбрать лучший материал, хотя можно сформулировать требования, которые надо предъявлять к «идеальному» голографическому материалу. Известно, что наилучшими голографическими материалами считаются материалы с высоким пространственным разрешением, достаточной чувствительностью при записи, не деструктивные при считывании, с фазовым фотооткликом и небольшим собственным поглощением. Оказалось, что существуют принципиально важные ограничения, имманентно присущие большинству таких объёмных фазовых голографических материалов. Следует обратить внимание на два физических эффекта, которые мешают фазовым голографическим материалам достигать большой дифракционной эффективности, а, значит, ограничивают их информационную ёмкость. Первый из них связан с эффектом, который мы назвали «пространственным резонансом записывающего голограмму поля с неоднородностями показателя преломления, вызванными этой записью» [1.53, 1.71, 1.72], который свойственен голограммам, записываемым в динамических безрелаксационных средах, т. е. средах, формирующих фотоотклик непосредственно во время записи. Второй существует и в средах с проявлением и связан с наличием неоднородностей в записывающих объёмную (брэгговскую) голограмму пучках. Изучению этого эффекта, названного «формфактором голограмм» [1.135, 3.3–3.5, 1.136, 1.137] и посвящена глава 3. Также следует отметить, что эти ограничения влияют не только на энергетические характеристики голограмм, в частности, на дифракционную эффективность, но и на информационную ёмкость голограмм, что связано с вызванным этими

ограничениями снижением числа возможных состояний голографической структуры, т. е. уменьшением энтропии голограмм.

При изучении компьютерно-синтезированных голограмм (CGH), обычно на нелинейные эффекты исследователи не обращают внимания, справедливо полагая, что все процессы в виртуальном пространстве синтеза голограмм можно линеаризовать. Однако при первой же попытке материализовать CGH все проблемы, связанные с неустраняемыми полностью ограничениями в концентрированном виде всплывают на первый план. К ним добавляется ещё ряд специфических проблем, как ограниченность размеров пикселя и поля голограммы, алиасинг и др., часть из которых будет рассмотрена в этой главе, а часть в главе 4 настоящей диссертации. Сегодня нет достаточно убедительных работ по компьютерному синтезу объёмных голограмм, пригодных для записи и синтеза голограмм Денисюка, однако в аналоговой записи они представлены рядом успешно реализованных фотополимеров в матрице полиметилметакрилата [1.52, 1.73, 1.74], азополимеров [2.4, 3.6], халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП) [3.7, 3.8] и других традиционных материалов [1.81].

Первый ошеломляющий успех объёмных фазовых голограмм вскоре сменился трезвым осмыслением их недостатков. В частности, было обнаружено искривление голографической решётки по глубине объёма материала «Реоксан», что распространяется на все непроявляемые среды, которые, как и Реоксан, формируют фотоотклик непосредственно в процессе экспозиции. На рисунке 3.1 приведены результаты экспериментальной проверки [1.71] самовоздействия записывающего голограмму излучения с формирующейся им голографической решёткой, которое приводит к искривлению интерференционных полос и, следовательно, к смещению пика угловой селективности объёмной голограммы.

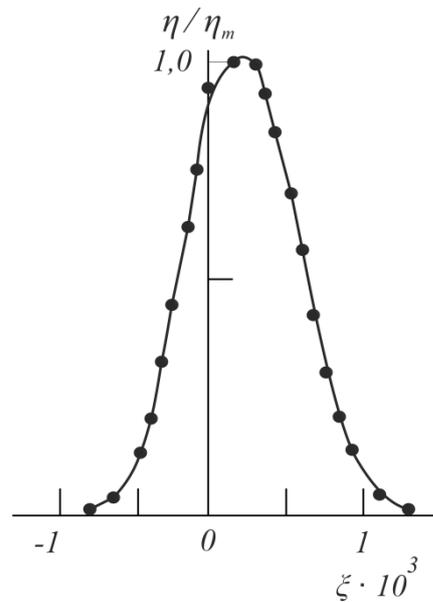


Рисунок 3.1 – Экспериментально измеренные точки и аппроксимирующая их кривая нормированной величины дифракционной эффективности  $\eta/\eta_0$  в зависимости от угла поворота  $\xi$  плоской восстанавливающей волны относительно опорной при записи. Запись производилась *HeNe* лазером на плоскую голографическую среду Реоксан толщиной 1 мм

Кроме описанного эффекта искривления полос в динамическом безрелаксационном материале, сначала в нём же был экспериментально обнаружен эффект резонанса спекл-поля при записи голограмм, который тоже приводит к искривлению интерференционных полос в процессе записи голограмм (рисунок 1.1) [1.53], а затем теоретически объяснён [1.72]. Учитывая, что спекл-структура является имманентным проявлением сложных волновых полей, к которым относятся практически все изображения реальных объектов, область применимости полученных результатов практически не ограничена.

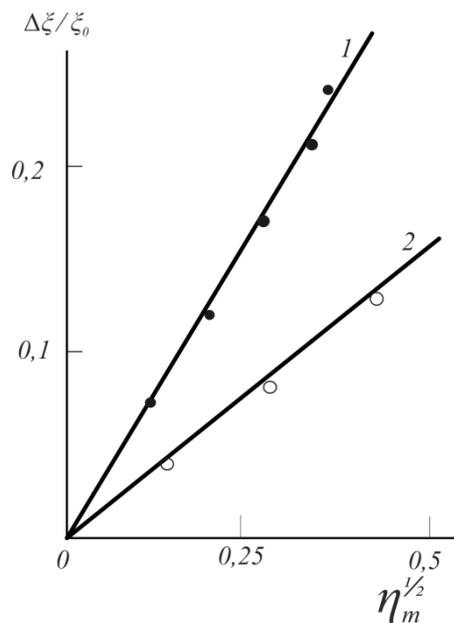


Рисунок 3.2 – Экспериментально измеренные точки сдвига оптимального угла восстановления ( $\Delta\xi/\xi_0$ ) (в единицах полуширины кривой селективности) при котором достигается максимальная дифракционная эффективность  $\eta_{max}$ : 1 – для объектной спекл-волны, 2 – для объектной плоской волны

Видно, что в случае спекл-поля резонансное взаимодействие спекл-структуры уже записанной на фотоматериале, в процессе экспозиции взаимодействует с записывающим её спекл-полем, приводя, практически, к двукратному увеличению скорости исчерпания динамического диапазона фотоотклика, что ограничивает достижимую ДЭ.

Эти два эффекта существенно ограничивают максимально достижимые значения ДЭ, но особое место занимает третий физический эффект, связанный с взаимодействием двух нелинейных зависимостей – синусоидальной зависимости дифракционной эффективности от фотоиндуцированного изменения фотоотклика, т. е. от экспозиции голограммы, с нелинейностью распределения локальных значений этой экспозиции по полю голограмм. Для гауссовых пучков такое ограничение, названное впоследствии формфактором, снижает среднюю ДЭ в 3–5 раз [3.3–3.5, 1.136, 1.137]. Он был обнаружен при работе со схемой ГЗУ (рисунок 1.3), но в то время не был объяснён.

### Параграф 3.1. Формфактор гауссовых пучков и оптимальные информационные характеристики голограммы

Исторически впервые эффект формфактора был обнаружен при записи голограмм, записываемых гауссовыми пучками в объёмных голографических средах, работающих в режиме дифракции Брэгга, в ГЗУ [1.171]. Однако, оказалось, что он играет важную роль и в голограммах, работающих в режиме дифракции Рамана – Ната, и не только для голограмм гауссовых пучков, но и для большинства голограмм сложных изображений, чья статика распределения интенсивности, формируемой многими причинами, согласно центральной предельной теореме М. Ляпунова, имеет гистограмму, близкую к гауссовой.

Как показано выше (параграф 1.3), голограммы обоих типов могут стать основой динамических голографических мониторов, поэтому далее будут более подробно рассмотрены ограничения информационной ёмкости и оценки энтропии таких голограмм.

Согласно (1.5) количество информации в одном голографическом кадре 3D видеопотока практически пропорционально логарифму отношения сигнал/шум, или логарифму от числа возможных (и различимых между собой) состояний. На площади голограммы не все участки могут иметь одинаковое число таких различимых состояний. Например, крайние участки голограммы, записанной гауссовыми пучками, могут иметь меньшее число градаций локальной дифракционной эффективности, в пределах которой может изменяться полезный сигнал, а значит и его энтропия. Полная энтропия голограммы  $H$  [3.9], как максимально возможное количество информации о системе, определяется (3.1):

$$H = -\sum_1^Q p_m \log_2(p_m), \quad (3.1)$$

где  $p_m=1/Q$  – вероятность нахождения голограммы в состоянии  $m$ , а  $Q = (\eta)^{M \cdot N}$  – полное число состояний, равное числу разрешимых градаций отношения сигнал/шум в степени размерности голограммы.

Если у нашей компьютерной голограммы число градаций яркости равно 256, как в современных телевизионных стандартах, и вероятность для всех  $p_i$  состояний одинакова, то в среднем на каждый пиксель голограммы  $H_q = \log_2(256) = 8$ .

Однако ограничения, накладываемые формой пучков при записи голограммы, сложным образом влияют на распределение локальной дифракционной эффективности по полю голограммы, а, значит, и на вероятности её отдельных состояний. Поэтому среднее количество информации, приходящееся на один пиксель цифровой голограммы ( $n'$ ) проще оценить по (1.6), которая для каждой единичной гармоники  $W_x=W_y=1$  (что соответствует одному пикселю на поле голограммы) и выражается как (3.2).

$$n' = \frac{1}{M \cdot N} \cdot \sum_{m=-M}^M \sum_{k=-N}^N \log_2 \left\{ 1 + \frac{P_o}{P_n} \exp \left[ - \left( \frac{m}{\alpha M} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[ - \left( \frac{k}{\alpha N} \right)^2 \right] \right\}, \quad (3.2)$$

где  $M$  и  $N$  – число пикселей в кадре по оси абсцисс и ординат соответственно,  $m$  и  $k$  – номер текущего пикселя,  $P_o/P_n$  – число градаций в центре кадра.

Для стандарта Full HD, при  $\alpha = 1/2$ , что соответствует спаданию гаусса на краю кадра до уровня  $1/e^2$  (рисунок 3.3а), получаем  $H \approx 4,38$ , а при  $\alpha = 1$ , (рисунок 3.3б), что соответствует спаданию гаусса на краю кадра до уровня  $1/e$ , энтропия поднимается до  $H \approx 7,04$ . С увеличением числа дискрет (пикселей), которыми мы представляем голограмму, энтропия, или предельно возможная плотность записи информации, практически не меняется, так например, в стандарте 4K UHD число строк и столбцов равно 3072 и 4096, и соответствующие значения энтропии по (3.2) будут при  $\alpha = 1/2$  тоже  $H \approx 4,38$ , а при  $\alpha = 1$  тоже  $H \approx 7,04$ . Это несколько ниже энтропии равномерной по полю голограммы ( $H=8$ ), хотя и незначительно, по сравнению со случаем, когда  $\alpha = 1$ , но уже существенно

для случая, когда  $\alpha = 1/2$ . Приблизённо можно считать, что при неравномерности дифракционной эффективности по полю кадра менее, чем  $1/e$ , ограничения, связанные с фактором формы голограммы, количественно не велики, но они принципиально не устранимы, независимо от числа градаций яркости на голограмме и независимо от разрешающей способности монитора, которым мы представляем голограмму. Значит, ограничениям, связанным с фактором формы голограммы (формфактором), следует уделить особое внимание. Позже, получив выражения для среднего значения дифракционной эффективности сложных голограмм, мы покажем, как сравнительно просто можно оценить их энтропию.

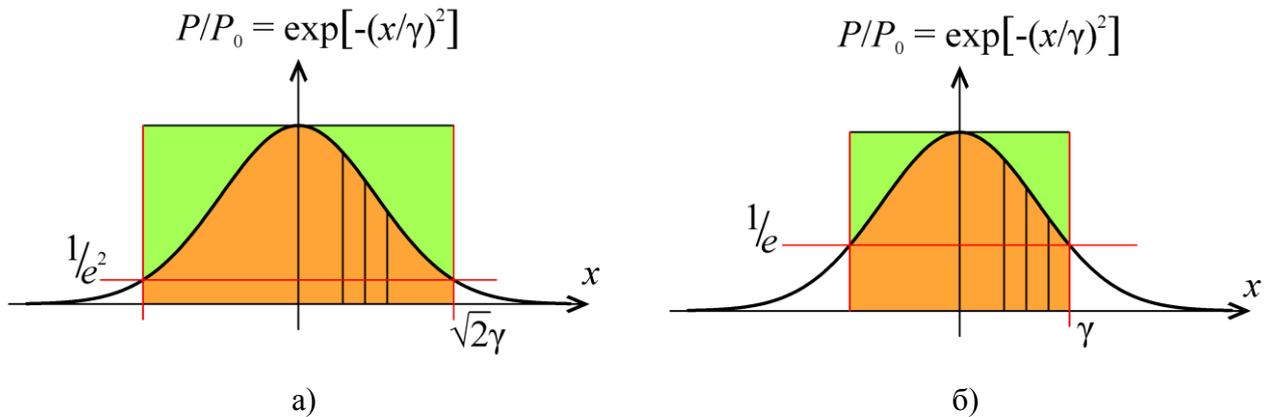


Рисунок 3.3 – Ограничения диапазона возможных состояний сигнала, формируемого голограммой при её записи гауссовыми пучками:

а) ширина голограммы по уровню  $1/e^2$ ; б) ширина голограммы по уровню  $1/e$

Как выше упоминалось, энтропия голограммы и плотность записи информации на ней прямо зависят от распределения её локальных значений ДЭ. Дифракционная эффективность, в свою очередь, определяется глубиной модуляции голографической среды [2.3], полученной в результате фоторегистрации картины интерференции предметного пучка  $a$  – несущего информацию о голографируемом объекте, и  $r$  – вспомогательного опорного пучка. Наибольшие значения ДЭ, а, значит, и энтропии, можно получать в голографических материалах с фазовым откликом. Для таких материалов, к которым относятся все объёмные, в т. ч. полимерные материалы [1.52, 1.59, 1.73, 1.74], работающие в брэгговском режиме дифракции, в [1.137] проанализировано

взаимное влияние неравномерной по полю голограмм экспозиции и нелинейной зависимости ДЭ от экспозиции. Для тонких голограмм, работающих в режиме дифракции Рамана – Ната, в параграфе 3.6 также показаны аналогичные зависимости. Для учёта взаимного влияния указанных двух нелинейных эффектов предлагается использовать специальный параметр, названный формфактором голограммы, по аналогии с описанием взаимодействия тел сложной формы с помощью корректирующей функции или параметра, учитывающего влияние протяжённости (формы) частицы на её взаимодействие с другими частицами и полями [3.10–3.14].

В соответствии с требованиями максимизации фотоиндуцированного эйконала (1.13), для повышения  $\eta_v$  (1.11), в силу (1.12), прежде всего, используются голографические материалы с большим динамическим диапазоном фотоотклика. Однако при записи голограмм на такой фотоматериал, как Реоксан [1.59, 1.71], было экспериментально обнаружено несоответствие роста ДЭ ( $\eta_v$ ) голограмм формулам теории объёмных голограмм Когельника [1.66]. Рост ДЭ ограничивался по не понятным причинам далеко от Когельниковского максимума. На рисунке 3.4а,б приведены экспериментально полученные графики зависимости  $\eta$  от экспозиции. Видно, что рост  $\eta$  с экспозицией имеет не простой вид, вначале  $\eta$  растёт, причём медленнее расчётных по [1.66] значений, а затем начинает падать, далеко не достигая максимума, предсказанного Когельником.

Так был впервые замечен эффект, ограничивающий ДЭ голограмм. Позже выяснилось, что эти ограничения  $\eta$  связаны с фактором формы записываемого сигнала, названного впоследствии формфактором [3.3–3.5, 1.136, 1.137].

Это ограничение дифракционной эффективности ( $\eta_v$ ) повлияло на то, что практически максимальное уплотнение записи бинарной информации в ГЗУ (по схеме на рисунке 1.3) достигло величины чуть меньше одного порядка. Экспериментально голограммы вдоль каждой из пространственных координат матрицы Фурье-голограмм удалось сблизить с частичным наложением на расстояние  $1/3$  их диаметра, с перекрытием на  $2/3$  их диаметра. Достигнутый коэффициент уплотнения был при этом равен  $k=3 \times 3=9$ .

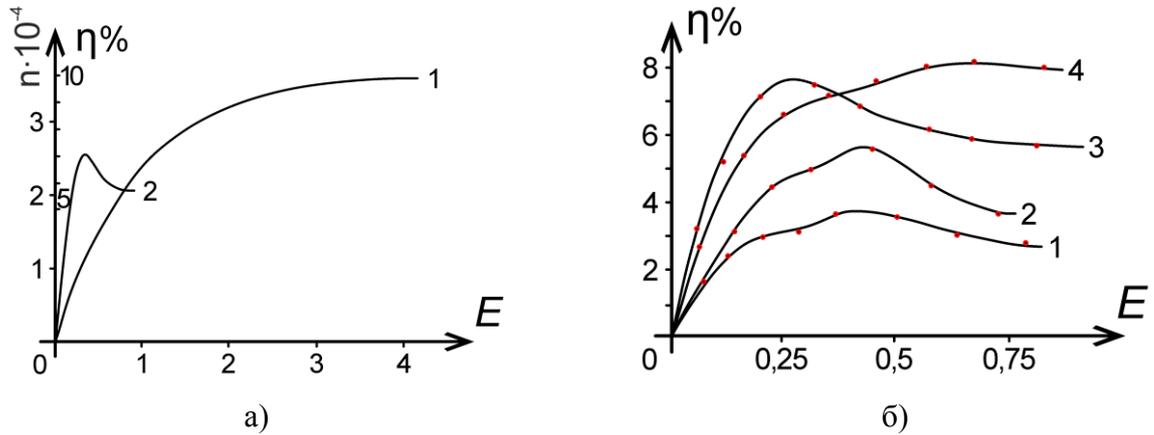


Рисунок 3.4 – а) график 1 – зависимость изменения фотоиндуцированного показателя преломления  $\Delta n$  от экспозиции  $E$  при регистрации голограмм, график 2 – зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  Фурье-голограмм, сформированных гауссовыми пучками; б) графики 1–4 зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  голограмм от экспозиции  $E$ , сформированных в окрестностях Фурье-плоскости записывающего объектива, график 3 соответствует наиболее точному попаданию голограммы в Фурье-плоскость, графики 1, 2 – соответствуют голограммам, расположенным перед плоскостью Фурье, а график 4 – голограмме за Фурье-плоскостью

Далее, ограничение средней ДЭ голограмм, значительно влияющее на отношение сигнал/шум за счёт снижения достижимых значений локальной ДЭ по полю голограмм, а, значит, и информационной ёмкости голограмм – формфактор, представлен более подробно. Известно, что фазовые объёмные голограммы могут достигать самую большую ДЭ. Ниже показано, что для них существует значительное ограничение величины достижимой ДЭ. Оно связано с взаимодействием двух нелинейных эффектов при записи голограмм. При отсутствии одного из них этот эффект исчезает, поэтому не сразу был замечен исследователями. Кратко его суть можно изложить следующим образом.

Поскольку локальная ДЭ по полю голограмм определяется глубиной модуляции голографической среды, полученной в результате интерференции предметного пучка  $a$  – несущего информацию о голографируемом объекте, и опорного пучка –  $r$ , а глубину модуляции характеризует видность, то фотоотклик голографического материала существенно зависит и от экспозиции, и от видности. Оба этих параметра влияют на величину фотоотклика  $\Delta n$ , который для

объёмных фазовых голограмм по [1.66] определяется как их произведение и качественно может быть описан (3.3):

$$\eta \sim \sin^2(E \cdot V). \quad (3.3)$$

Здесь  $E$  – экспозиция и  $V$  – видность. Для большинства голограмм период интерференционной решётки существенно меньше любых других характерных размеров на голограмме, в т. ч. и её размера, что, в частности, используется в технологии Dot Matrix [3.15]. В силу этого, полная ДЭ таких голограмм может быть представлена как сумма её локальных ДЭ.

На рисунках 3.5, 3.6 показано, как могла бы, согласно (3.3), изменяться ДЭ по радиусу голограммы (вдоль  $r$ ), при увеличении  $\alpha \cdot \Delta n$ , если записывающие пучки, объектный и опорный, равномерны по полю.

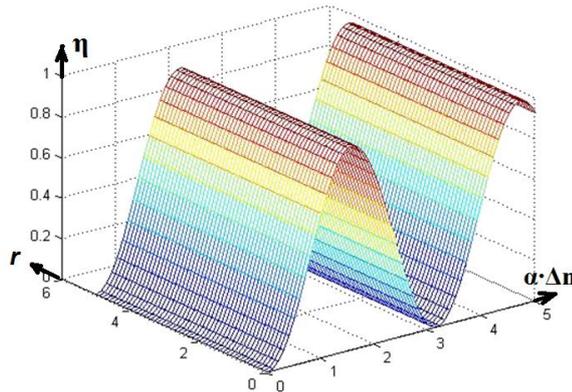


Рисунок 3.5 – Зависимость дифракционной эффективности  $\eta$  по полю равномерно проэкспонированной (не меняется вдоль  $r$ ) голограммы от экспозиции, вызывающей изменение показателя преломления среды  $\Delta n$  в безразмерных единицах  $\alpha \cdot \Delta n$

Очевидная нелинейная зависимость  $\eta(\alpha \cdot \Delta n)$  при равномерно вдоль  $r$  освещённой голограмме (рисунок 3.5) усложняется при неравномерной засветке голограмм (рисунок 3.6). Так, в случае гауссовых пучков, когда  $\Delta n$  изменяется пропорционально видности и экспозиции, см. [1.135], возникает ситуация, когда центральные, более яркие, части голограммы (здесь  $r=3$ ) экспонируются сильнее. Они и быстрее, с ростом  $\Delta n$ , приходят к насыщению. А вот периферийные участки голограммы (где  $r$  ближе к 1 и 4) отстают.

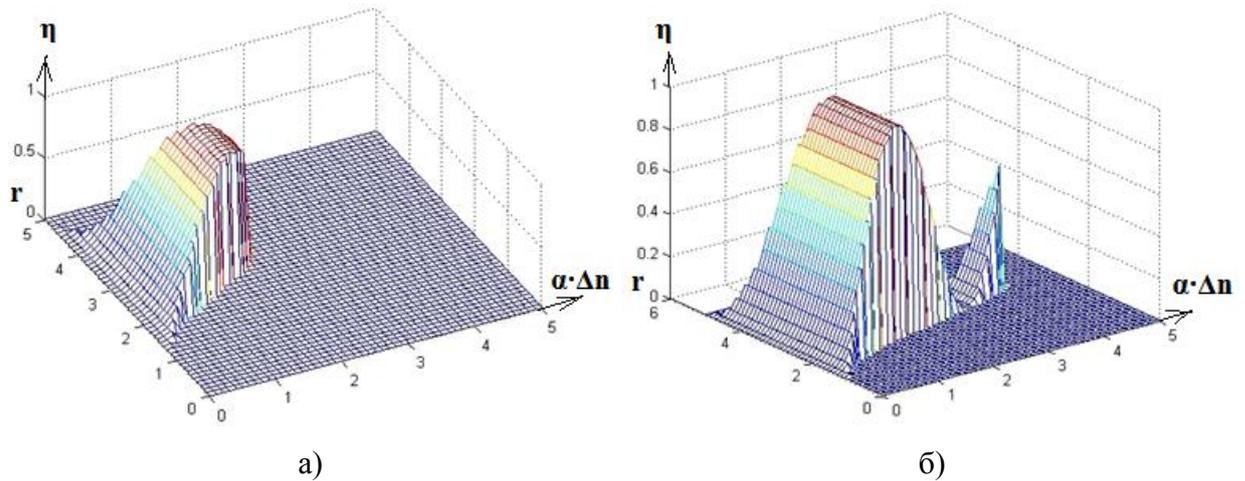


Рисунок 3.6 – Зависимость дифракционной эффективности  $\eta(r)$  по радиусу гауссовой голограммы от экспозиции, которая увеличивается от а)  $\alpha \cdot \Delta n = 2$  к б)  $\alpha \cdot \Delta n = 4$ , вызывающей неравномерное по полю ( $r$ ) изменение показателя преломления среды  $\Delta n$ , выраженное в безразмерных единицах ( $\alpha \cdot \Delta n$ )

На рисунке 3.6а видна ситуация, когда только центральная часть голограммы достигла максимума дифракционной эффективности. На рисунке 3.6б она уже перевалила максимум и, согласно модели связанных волн, снова уменьшилась, пройдя ноль и даже снова подросла.

Полная же ДЭ, складывающаяся из локальных участков, имеет вид сначала растущей, затем проваливающейся и снова поднимающейся кривой. Она явно зависит от формы голограммы и определяется интегралом локальных эффективностей по полю голограммы, что сродни понятию фактор формы или «формфактор».

Аналогичные ограничения, хотя и без объяснения их физической природы, можно увидеть в экспериментальных графиках авторов других работ [2.4, 3.1, 3.6, 3.7, 3.15–3.18]. В [3.1] авторы просто констатируют, что при неравномерной экспозиции ДЭ может снижаться. В [3.15] авторы показали запись пиксельных («Dot Matrix») голограмм на азополимерных слоях с различной по голограмме интенсивностью пучка записи. Как видно на рисунке 3.7, приведённом в их работе, в зависимости от интенсивности пучка, каждый пиксель голограммы, исследованный с помощью атомно-силового микроскопа, трансформируется из

пикселя с гауссовым распределением модуляции поверхности, в пиксель с провалом в центре пятна.

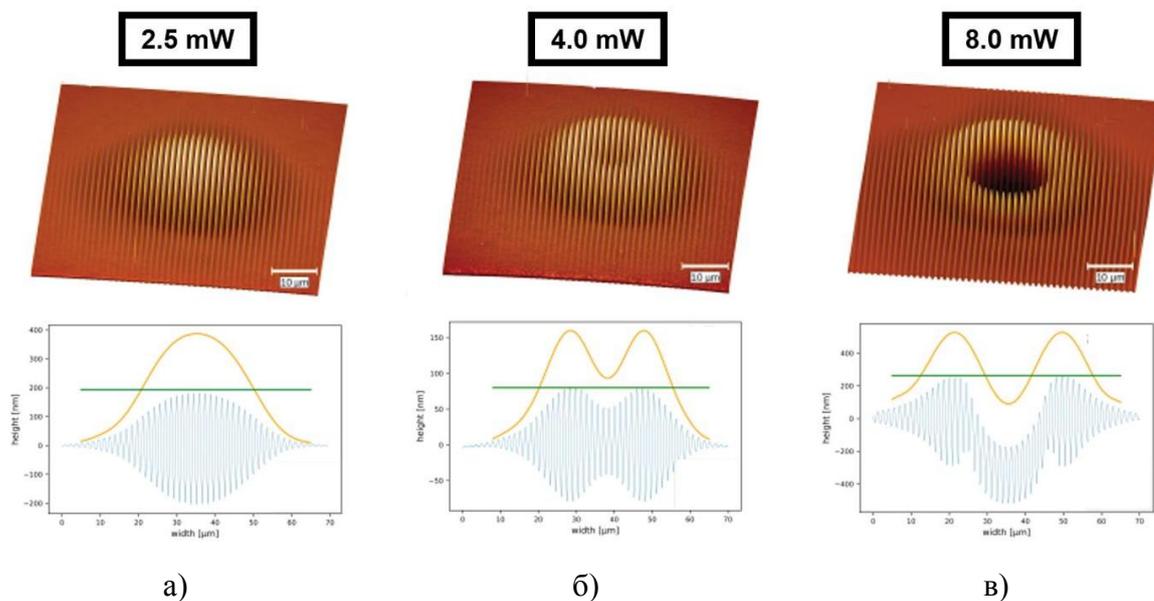


Рисунок 3.7 – Изображения пикселей записанной голограммы с различной интенсивностью пучка записи: а) 2.5 мВт; б) 4.0 мВт и в) 8.0 мВт

В другой работе [2.4] авторы приводят экспериментальную кинетику дифракционной эффективности рельефной решётки, записанной на азополимере. Сложную картину эволюции дифракционной эффективности они объясняют одновременным формированием трёх различных фазовых решёток с разными соответствующими параметрами. Однако анализ данной зависимости с учётом эффекта формфактора позволяет объяснить полученный эффект без необъяснимо появляющихся решёток, появлением только одной записываемой решётки, а именно: формфактором рельефно-фазовой решётки с гауссовым распределением модуляции глубины рельефа.

Таким образом, влияние формы пучков на характеристики голограммы очевидно. Также очевидно, что их форма влияет на информационную ёмкость голограмм.

Применение этого эффекта в настоящее время уже вышло за рамки изучения его влияния на общую информационную ёмкость голограмм и нашло применение в работах по созданию новых голографических материалов. Так, в

институте прикладной физики Молдавской академии наук, г. Кишинёв, этот эффект активно используют при изучении кинетики формирования фотоотклика в халькогенидных стеклообразных полупроводниках и в азополимерах [3.19, 3.20]. По сравнению с интерференционными методами, а также по сравнению с атомно-силовой микроскопией (АСМ), он имеет ряд существенных преимуществ. Одним из главных преимуществ является возможность измерения кинетики роста фотоотклика непосредственно в процессе экспозиции голограммы без дополнительных оптических и механических схем и устройств. Это достигается тем, что для измерений используется дифракция опорного пучка на уже частично сформированном, при непрерывной экспозиции, фотоотклике голограммы. Следует подчеркнуть, что этот метод измерения фотоотклика голографического материала является дифракционным, что отличает его от известных интерференционных и от традиционных в этой области методов (АСМ).

В полученном патенте [3.19] влияние формфактора голограммы было предложено использовать для экспресс анализа величины динамического диапазона фазового фотоотклика голографического материала как в случае дифракции Брэгга, так и в случае дифракции Рамана – Ната. Указанный эффект может быть использован для неразрушающего и бесконтактного определения диапазона фотоотклика голографического материала и кинетики его формирования непосредственно в процессе записи голограмм. Данный метод позволяет в течение одной экспозиции достаточно точно оценить глубину фазовой модуляции исследуемого фоточувствительного материала, и использовать эти данные для сравнения и применения этого материала в качестве голографической регистрирующей среды. И не только грубо по количеству колец, образуемых в голограмме при экспозиции, см. рисунок 3.4, но и с достаточно высокой точностью, используя кольца во всех порядках дифракции.

В работе [3.20] показано, что увеличение количества рассматриваемых дифракционных порядков для анализа фазового фотоотклика позволяет увеличить точность измерения в  $k$  раз, где  $k$  – количество дифракционных порядков от  $\lambda/2$  –

( $\pi$  радиан) для одного дифракционного порядка до  $\lambda/20$  ( $\pi/10$  радиан) для 10 порядков, что сравнимо с точностью классических интерференционных методов.

В [1.138], показано, что сложные изображения, имеющие гауссову статистику распределения яркости по полю голограммы в силу ЦПТ, также имеют формфактор, близкий к формфактору гауссовых пучков. Там же показано, что портретные изображения, как многие другие, тоже можно отнести к сложным, а их формфактор близок к формфактору усечённого снизу гаусса, который также нужно учитывать как для определения ограничений на максимально достижимую ДЭ портретных голограмм, так и для определения отношения сигнал/шум при их записи и восстановлении. На плотность записи информации влияет и это ограничение на  $\eta_c/\eta_{ш}$  (см. (1.6)), и более широкий диапазон пространственных частот, который могут занимать голограммы ограниченных размеров, как это происходит, например, с голограммами, записанными гауссовыми пучками [3.3, 3.4]. Чаще всего для случая большинства реальных объектов в силу ЦПТ формфактор будет близок к гауссовому. Значит, мы можем ожидать примерно полуторакратного превышения экспозиции, которую надо делать при записи голограммы этих объектов для достижения ею первого максимума дифракционной эффективности [1.136], а также существенного (в разы) снижения величины этого первого максимума, а вместе с ним и отношения сигнал/шум под логарифмом выражения для плотности записи информации в (1.6).

Это хорошо видно на рисунке 3.8, где зелёным ограничен прямоугольник возможных состояний яркости восстановленного голограммой сигнала для случая её формирования излучением с равномерным распределением яркости по полю.

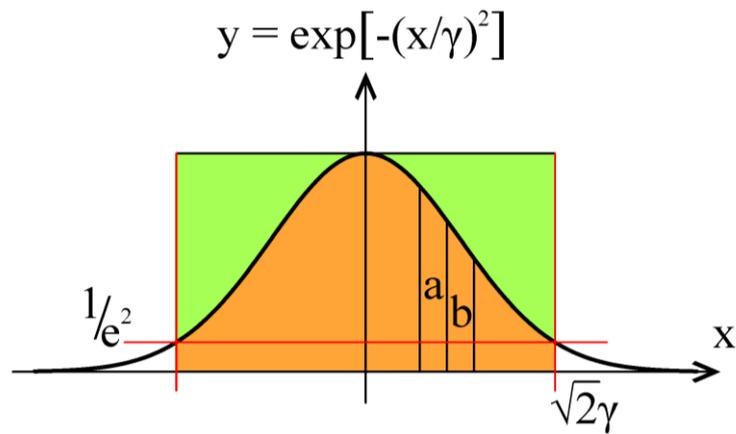


Рисунок 3.8 – Прямоугольное (выделено зелёным) и гауссово (выделено коричневым) распределение локальных значений дифракционной эффективности. (а) и (б) – локальные значения дифракционной эффективности для голограммы гауссовых пучков

Согласно (1.5, 1.6), информационная плотность записи голограммы на каждом локальном участке пропорциональна логарифму числа возможных состояний каждого локального участка, а суммарная информационная ёмкость равна интегралу этих плотностей. Это легко видеть, имея ввиду компьютерные голограммы с попиксельным представлением. Тогда диапазон возможных состояний каждого пикселя голограммы ограничен верхней границей функции  $y(x)$  на рисунке 3.8. Для равномерного сигнала (зелёный цвет) стандарта TrueColor размером  $1920 \times 1080$  пикселей с диапазоном изменения яркости  $m=256$  градаций логарифм в (1.6) в любой точке голограммы равен 8. В случае ограничения диапазона допустимых значений  $m$  функцией гаусса (коричневый цвет) на координатном отрезке от  $x = -\sqrt{2}\gamma$  до  $x = \sqrt{2}\gamma$ , сумма логарифмов по всем пикселям двумерного гауссова распределения, нормированная на количество этих пикселей уже будет равна 7,04. Это говорит о том, как неравномерное распределение яркости голограммы ограничивает её потенциальную информационную ёмкость, что подробнее будет обсуждаться далее.

### 3.1.1. Вычисление влияния двух нелинейных эффектов

Известно, что одними из важнейших элементов голографической схемы являются лазерные источники света [3.21], характеристики излучения которых прямо влияют на основные параметры голограмм. Поэтому более подробно исследование взаимного влияния характеристик голографической среды и лазерного излучения на дифракционную эффективность, а именно: нелинейности дифракционной эффективности от экспозиции и неравномерности записываемого голограмму излучения по её полю было выполнено в ходе работ по выбору оптимального лазерного излучения для записи голограмм. Без ограничения общности оно будет проиллюстрировано на примере оптической схемы записи голограмм Лейта – Упатниекса (рисунок 3.9а), записываемой голограмму (рисунок 3.9б).

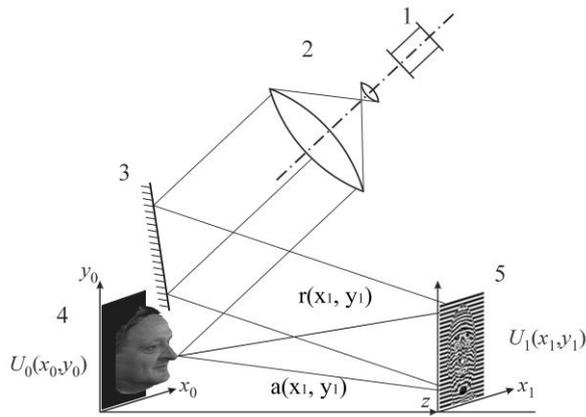
Глубину модуляции картины интерференции объектного и опорного пучков характеризует видность ( $V$ ) интерференционных полос, которую Майкельсон [3.22] определил следующим образом:

$$V = \frac{(I_{\max} - I_{\min})}{(I_{\max} + I_{\min})}. \quad (3.4)$$

Здесь  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  – максимальная и минимальная интенсивности соответственно. В голографии  $I_{\max}$  и  $I_{\min}$  образуются в результате интерференции объектной и опорной волн:

$$I = |a + r|^2 = I_a + I_r + ar^* + ra^*, \quad (3.5)$$

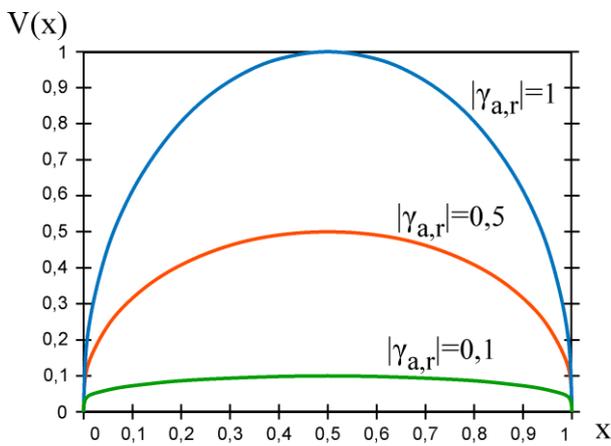
где  $a$  и  $r$  – комплексные амплитуды электромагнитного поля объектного и опорного пучков, которые используются для когерентного света.



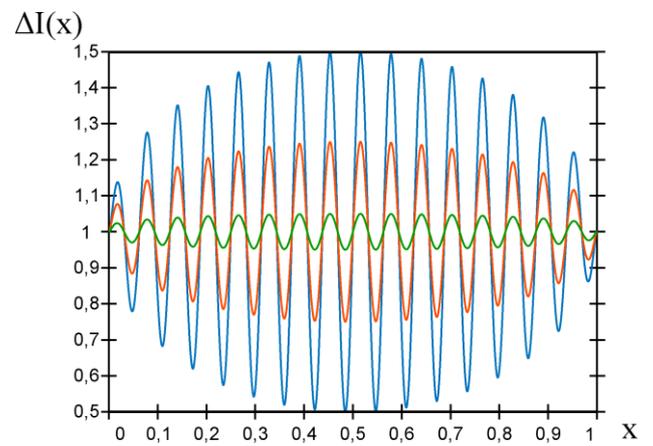
а)



б)



в)



г)

Рисунок 3.9 – Запись голограммы: а) схема Лейта и Упатниекса; б) пример структуры интерференционных полос; в) график локальной видимости интерференционной картины записывающих голограмму пучков; г) вид интерференционных полос от изменяющейся по полю голограммы видимости интерференционной картины

Если их заменить на напряжённости электромагнитных полей  $a_e$  и  $r_e$ , то получится [1.14] более общее выражение, пригодное для частично когерентного света:

$$\begin{aligned}
 I &= |a_e + r_e|^2 = I_a + I_r + \langle a_e r_e^* + r_e a_e^* \rangle = I_a + I_r + 2 \operatorname{Re} \left[ \langle a_e r_e^* \rangle \right] = \\
 &= I_a + I_r + 2 \langle I_a I_r \rangle^{1/2} \operatorname{Re} [\gamma_{ar}] = I_a + I_r + 2 (I_a I_r)^{1/2} |\gamma_{ar}| \cos(\beta_{ar}) .
 \end{aligned} \quad (3.6)$$

В выражении (3.6) комплексная степень когерентности  $\gamma_{ar}$  определяется как нормированная корреляция между  $a_e$  и  $r_e$ :

$$\gamma_{ar}(\tau) \equiv \frac{\langle a_{p_1}(t+\tau)r_{p_2}^*(t) \rangle}{\left[ \langle a_{p_1}(t)a_{p_2}^*(t) \rangle \langle r_{p_2}(t)r_{p_2}^*(t) \rangle \right]^{1/2}} =$$

$$= \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T a_{p_1}(t+\tau)r_{p_2}^*(t) dt}{\left[ \left( \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T a_{p_1}(t)a_{p_1}^*(t) dt \right) \left( \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^T r_{p_2}(t)r_{p_2}^*(t) dt \right) \right]^{1/2}}. \quad (3.7)$$

В формуле (3.7) заключены и пространственная когерентность  $\mu_{ar} = \gamma_{ar}$  при временной задержке  $\tau = 0$ , и временная когерентность  $\zeta_{ar} = \gamma_{ar}$  в произвольной точке  $p_1 = p_2$  для объектного и опорного пучков.

Зачастую этих понятий хватает, чтобы разобраться, какой когерентностью должен обладать источник света для записи идеальных, равномерных по полю, голограмм плоских пучков [1.66], хотя и недостаточно для реальных голограмм, например, голограмм гауссовых пучков. Как мы указали выше и в работах [1.31, 1.71, 3.3, 3.23], неоднократно было замечено, что ДЭ голограмм на практике почти никогда не достигает теоретически достижимого максимума по причине различных рассогласований регистрирующего излучения в процессе записи локальных участков интерферирующих полей внутри объёма регистрирующей среды. Также оптимальная экспозиция, как правило, бывает выше декларированной в технических условиях (ТУ) на голографическую среду.

Ниже будет показано, как перекрёстное влияние нелинейности дифракционной эффективности от экспозиции и видности вместе с неравномерностью локальной экспозиции по полю голограммы приводят к снижению максимума ДЭ и к увеличению оптимального значения экспозиции, позволяющей достигать этот максимум.

Так, для определения локальных по полю тонкой голограммы максимумов и минимумов интенсивности достаточно, подставив в формулу (3.6)  $\cos(\beta_{ar}) = 1$  и  $\cos(\beta_{ar}) = -1$  – что соответствует полной когерентности излучения, получить:

$$\begin{cases} I_{\max} = I_a + I_r + 2(I_a I_r)^{1/2} |\gamma_{ar}|, \\ I_{\min} = I_a + I_r - 2(I_a I_r)^{1/2} |\gamma_{ar}|. \end{cases} \quad (3.8)$$

Отсюда локальное значение видности:

$$V = 4(I_a I_r)^{1/2} \frac{|\gamma_{ar}|}{2(I_a + I_r)} = \frac{2|\gamma_{ar}|}{\left(\frac{I_a}{I_r}\right)^{1/2} + \left(\frac{I_r}{I_a}\right)^{1/2}}. \quad (3.9)$$

Очевидный результат – видность интерференционных полос падающего на голограмму излучения достигает максимума при  $I_a = I_r$  и равняется  $V = |\gamma_{ar}|$ . Воздействие на среду осуществляют как первая половина выражений (3.8):

$$\bar{I} = I_a + I_r, \quad (3.10)$$

которая создаёт среднюю засветку фотоматериала, так и вторая:

$$\Delta I = \pm 2(I_a I_r)^{1/2} |\gamma_{ar}| = \bar{I} V, \quad (3.11)$$

которая, складываясь, либо вычитаясь из средней, создаёт контрастную «интерференционную компоненту поля» (рисунок 3.9г) и формирует интерференционную компоненту фотопропускания –  $\Delta\tau \sim \Delta I$  или показателя преломления –  $\Delta n \sim \Delta I$  в голографическом материале, как это показано в (2.7–2.13). На рисунке 3.9в и 3.9г приведены зависимости локальных значений видности и интенсивности соответственно от изменяющегося отношения интенсивностей опорного и объектного пучков. По оси  $x$  отложена интенсивность объектного пучка при естественной нормировке  $I_a + I_r = 1$ . Такая нормировка, по нашему мнению, наиболее ясно показывает практическое стремление в экспериментальных работах выдерживать одинаковую среднюю экспозицию по полю голограммы.

При сложном объектном пучке, образованном множеством слагаемых, результирующая видность и интенсивность на разных участках голограммы могут меняться в тех же пределах, как и на рисунке 3.9в,г. Также отметим, что линейная зависимость видности от  $\chi_{a,r}$  на этом рисунке сочетается с нелинейной от  $I_a / I_r$ . Интересно, что вопреки распространённому мнению о том, что опорный пучок должен быть не слабее объектного по интенсивности ( $I_r \geq I_a$ ), и видность, и контраст полос (как видно из рисунков 3.9в,г) симметрично зависят от отношения их интенсивностей. Обычно в голографии пользуются логикой формирования амплитудно-модулированного радиосигнала, когда более мощный опорный пучок, интерферируя с более слабой плоской компонентой объектной волны, образуют интерференционную картину, соответствующую несущей частоте, а остальные, тоже слабые, плоские компоненты, формирующие объектный пучок, модулируют эту частоту. Однако известно, что голограммы можно эффективно записывать и при сильном объектном пучке на фоне слабого опорного, что неоднократно использовалось в практике записи голограмм [1.31, 1.71, 3.24–3.26].

То же самое почти всегда происходит на разных локальных участках голограмм, записанных неоднородными по полю пучками, когда на одном локальном участке преобладает объектная волна  $I_a$ , а на другом – опорная  $I_r$ .

На нормированном графике (рисунок 3.9г) средняя интенсивность равна единице или разнице между наибольшим максимумом (1,5) и наибольшим минимумом (0,5) интерференционной картины. При этом хорошо видна структура различных участков интерференционного поля при разных отношениях интенсивностей объектного и опорного пучков и разных степенях когерентности излучения. Практически это означает, что на различные участки голографического материала попадает и формирует фотоотклик излучение с различной видностью. Можно сказать, что разные участки голограммы достигают излучение с различным «качеством» и что в случае неполной видности полос часть динамического диапазона фотоотклика регистрирующей среды будет использоваться впустую, просто засвечиваясь средней интенсивностью (3.10), и не на всю глубину модулируясь интерференционной компонентой волны (3.11).

Также по полю (а в общем случае и объёму) голограммы может варьироваться и величина  $\gamma_{a,r}$ , изменяя локальные значения видности, определяемые модовой структурой излучения.

В обычных тонких амплитудных голограммах, чей фотоотклик формируется в виде почернения фотоматериала, его зависимость от степени когерентности и соотношения интенсивностей объектного и опорного пучков будет пропорциональна видности полос в пределах линейности фотоотклика. Локальная по полю голограммы ДЭ ( $\eta$ ) таких голограмм определена, например в [2.3, с. 256], как:

$$\sqrt{\eta} = \beta EV . \quad (3.12)$$

Здесь  $E$  – локальная экспозиция голограммы, равная интегралу от  $(I_a + I_r)$  по времени экспозиции, коэффициент  $\beta = (k |\gamma ar|) / 2$ , где  $k$  – чувствительность регистрирующей среды. Но как только энергия экспозиции выходит за пределы линейного участка фотоотклика, простое произведение (3.12) для средней ДЭ голограммы  $\eta'$  превращается в интеграл по полю голограммы  $S$  с переменной чувствительностью  $\beta(E)$ , которая, в общем случае, зависит от экспозиции и неравномерно меняется с её ростом.

$$\sqrt{\eta'} = \left( \frac{1}{s} \right) \int \beta(E) E(x, y) V(x, y) dx dy \quad (3.13)$$

Вычисляемые по формуле (3.13) средние значения  $\eta'$  обычно значительно ниже локальных (3.12), а максимальные значения локальной  $\eta$  для тонких амплитудных голограмм даже не могут превышать 6,25 %. Поэтому сосредоточим внимание на более распространённых сегодня фазовых объёмных голограммах, которые, согласно Когельнику [2.3], потенциально могут достигать  $\eta = 100$  %.

В работе [3.3] нами уже упоминалось о проблеме взаимного влияния нелинейности фотоотклика светочувствительного голографического материала и неравномерности экспозиции по полю. Продолжая эту тему, можно вычислить

реальные значения средней ДЭ для различных по форме записывающих пучков. Обратим внимание, что обычно период голографической решётки сравним с длиной волны видимого излучения, а это микронные размеры. Размер голограммы существенно больше, например, в случае изобразительных голограмм – это десятки сантиметров и даже в микроголограммах ГЗУ – это доли миллиметров. Поэтому можно локально, по полю голограммы, применять приведённые выше результаты (3.4–3.12) для определения видности и интенсивности, считая, что на малых участках голограмм это константы.

Случай объёмных фазовых голограмм более интересен, так как у них поглощение сводится к минимуму и, соответственно, голограммой восстанавливаются более яркие изображения. Их локальная ДЭ при линейном фотоотклике [2.3] без учёта собственного поглощения определяется из следующего соотношения:

$$\eta = \sin^2 \{ \alpha (\Delta n) \}. \quad (3.14)$$

Здесь  $\alpha$  – коэффициент, учитывающий геометрию записи голограмм и толщину материала. Локальное значение  $\Delta I \sim \bar{I}V$  из выражения (3.11) при равномерной по времени экспозиции осуществляет модуляцию фотоотклика  $\Delta n = kEV$ , отсюда для линейного случая:

$$\eta = \sin^2 (\beta EV). \quad (3.15)$$

Здесь  $\beta = \alpha k$ , но в дальнейшем, для простоты изложения, постараемся нормированием избавиться от учёта этих коэффициентов без утраты существа исследуемых эффектов.

В само выражение для ДЭ идеальной голограммы (3.14) уже заложена синусоидальная нелинейность, однако она может быть усилена нелинейностью фотоотклика (3.16), реально существующей у всех материалов:

$$\Delta n = f (EV). \quad (3.16)$$

Тогда, средняя ДЭ ( $\eta'$ ) определяется из выражений (3.13–3.16), как:

$$\eta' = \left( \frac{1}{S} \right) \int \sin^2 \{ \beta(E) \Delta n(E(x, y)) \} dx dy, \quad (3.17)$$

или:

$$\eta' = \left( \frac{1}{S} \right) \int \sin^2 \{ \beta(E) E(x, y) V(x, y) \} dx dy, \quad (3.18)$$

где  $(1/S)$  – нормировочный множитель, определяемый эффективной площадью голограммы  $S$ .

Наиболее часто встречаются голограммы, записанные гауссовыми лазерными пучками. И даже когда при записи голограмм стремятся сформировать наиболее равномерные по яркости по полю голограммы пучки, неминуемо теряется существенная часть лазерного излучения. А именно: какую неравномерность (в процентах) хотят получить от выделенной части гауссового пучка, такую же (в процентах) часть от полной энергии излучения лазера и получают на голограмме [2.3, с. 191]. Поэтому, не теряя энергии лазера, часто записывают голограммы гауссовыми пучками (так называемые «гауссовы» голограммы) или, как было сказано выше, голограммы записывают частью этих гауссовых пучков.

При засветке гауссовыми пучками более яркие, центральные участки голограммы быстрее достигают максимума, как это видно из выражений, применимых для локальных по полю голограммы ДЭ и видности (3.4–3.12). Пока края голограммы ещё не достигли максимума, центр уже достиг, а когда они его тоже достигают, центр уже переэкспонирован, и его ДЭ падает.

На рисунке 3.10а приведено типичное нормированное гауссово распределение интенсивности (3.5) по полю голограммы, ограниченной площади, с целью получить неравномерность интенсивности экспозиции, ограниченную  $I$  при максимальном  $I = I_0$ .

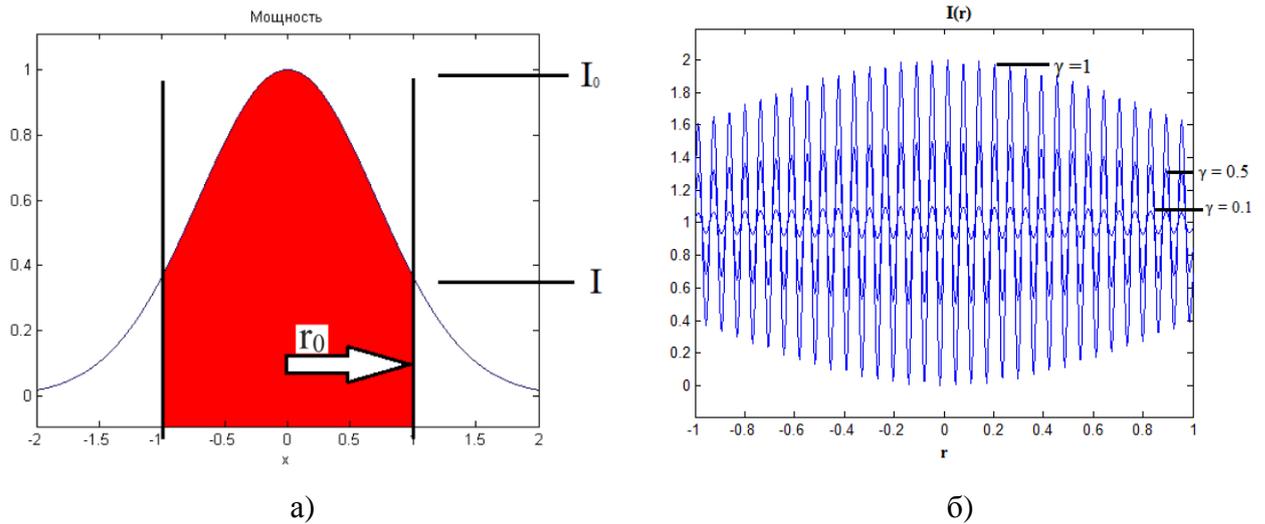


Рисунок 3.10 – Распределение по сечению  $x$  интенсивности  $I$  на гауссовой голограмме:

а) средней; б) локальной

На рисунке 3.11 по формуле (3.17) для линейного фотоотклика приведены изменения локальных по полю  $(x, y)$  значений ДЭ голограммы гауссовой формы в случае трёх экспозиций, при которых (рисунок 3.11а)  $\alpha \cdot \Delta n$  достигает 60 % от оптимального, равного  $\pi/2$ , на рисунке 3.11б – превышает  $\pi/2$  на 20 % и на рисунке 3.11в намного (в 3,5 раза) превышает  $\pi/2$ . Видно, как значения локальной ДЭ в центре голограммы сначала первыми растут, затем буквально «проваливаются», затем снова растут и «проваливаются» вновь. Т. е., когда центр голограммы уже «перешагнул» порог экспозиции с максимальной  $\eta$  (при  $\alpha \Delta n = \pi/2$ ), часть поля голограммы, соответствующая некоторому расстоянию от её центра, ещё только достигла  $\pi/2$ , а её края все ещё двигаются к максимальной  $\eta$ . Все участки голограммы вносят разный вклад в её суммарную ДЭ, которая, в отличие от идеальной [1.66], уже никогда не достигнет 100 %.

Позже [1.139] этот эффект был подтверждён и экспериментально изучен при записи для поверхностных голограмм на материале Халькогенидный стеклообразный полупроводник (ХСП), где ДЭ голограммы формируется механизмом дифракции Рамана – Ната (рисунок 3.11г) и на голограммах, записанных на Азополимерах (рисунок 3.11д)

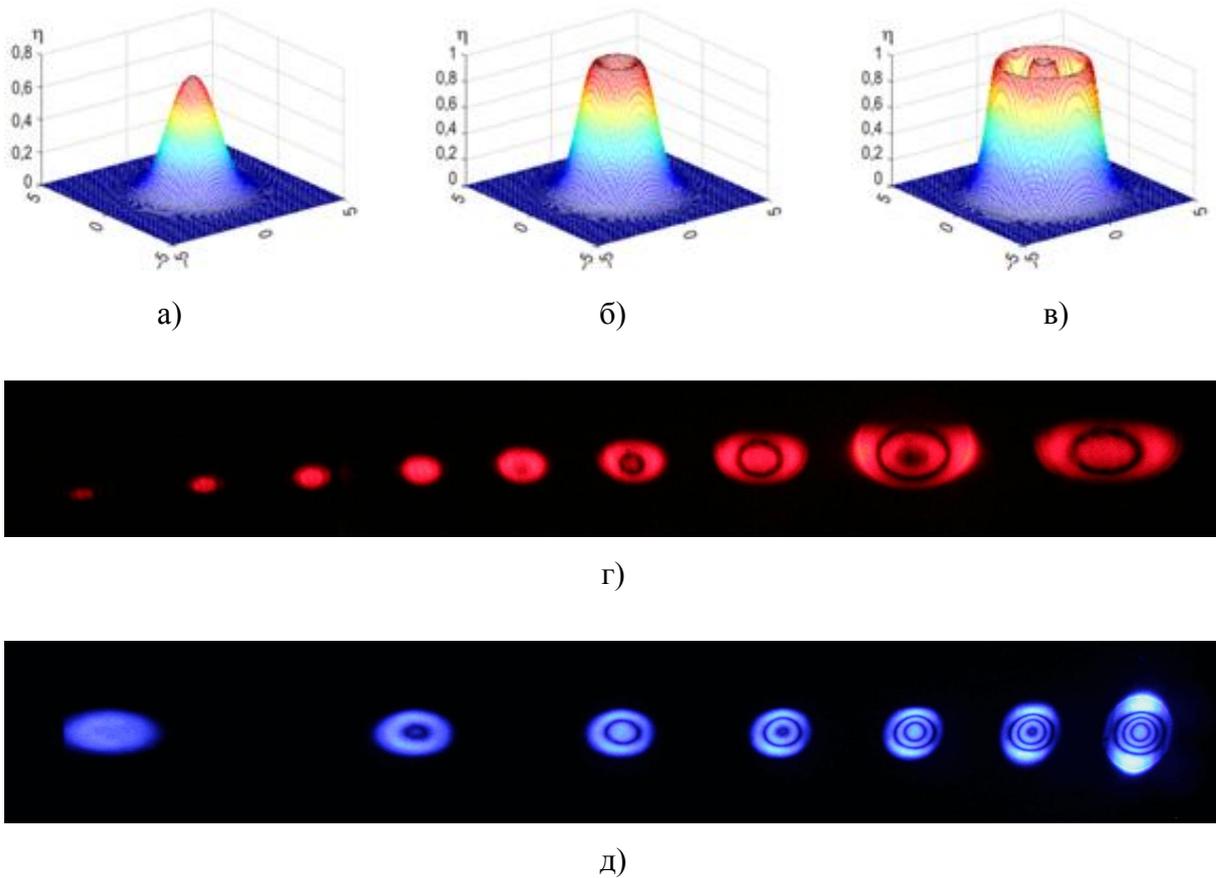


Рисунок 3.11 – Распределение локальной  $\eta$  по полю голограммы записанной гауссовыми пучками при: а)  $\alpha \cdot \Delta n = (0,8)\pi/2$ ; б)  $\alpha \cdot \Delta n = 0,6\pi$ ; в)  $\alpha \cdot \Delta n = 3,5\pi/2$  соответственно;  
 г) экспериментальное наблюдение колец на голограмме, записанной в халькогенидном стеклообразном полупроводнике;  
 д) экспериментальное наблюдение колец на голограмме, записанной на азополимере, подобно расчётным голограммам (а), (б), (в)

Для брэгговской «гауссовой» голограммы с линейным фотооткликом, когда  $\beta(E) = \text{const}$ , интеграл (3.18) в нормированных выражениях имеет вид, представленный графиком  $I$  на рисунке 3.12.

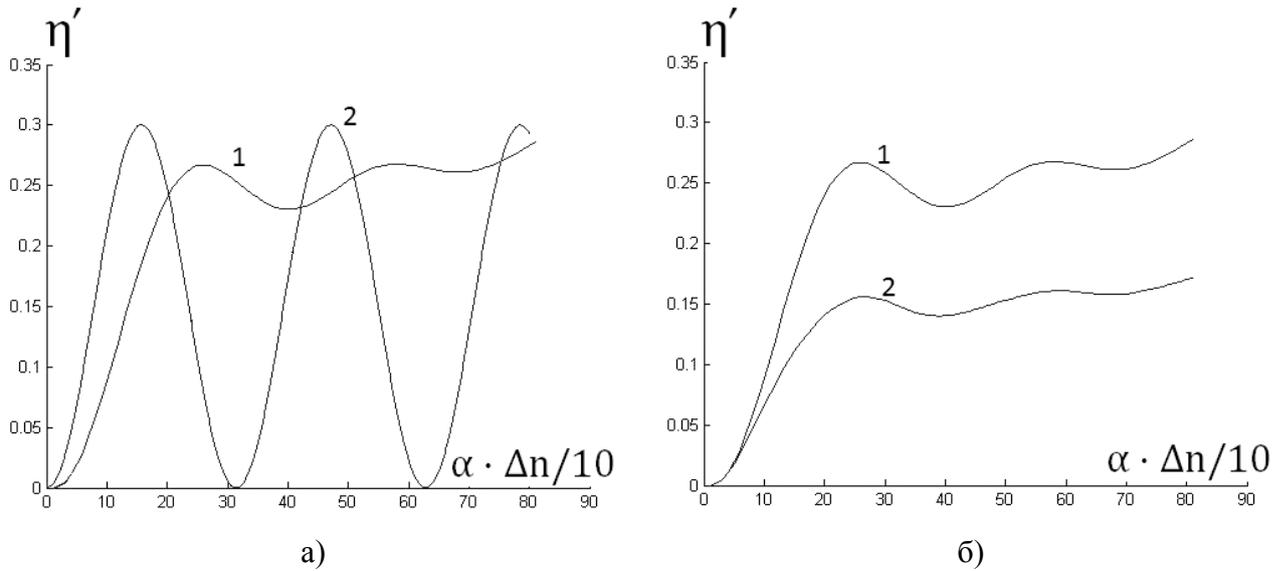


Рисунок 3.12 – Средняя ДЭ ( $\eta'$ ) голограммы гауссовых пучков: а) для случая линейного фотоотклика (график 1) в сравнении с ДЭ плоских, равномерных пучков (график 2); б) для случая линейного фотоотклика (график 1) в сравнении с ДЭ в голографическом с поглощением (график 2)

График 2 на рисунке 3.12а отнормирован по амплитуде на максимальное в расчётах значение  $\eta'$  для удобства сравнения формы кривых. По оси абсцисс отложена нормированная экспозиция в единицах, соответствующих изменению  $\alpha \cdot \Delta n$  в формуле (3.14) на  $0,1\pi$ . На рисунке 3.12а,б, виден характерный локальный максимум у расчётного графика 1, повторяющий характерное поведение экспериментальным графиком 2 на рисунке 3.4а. Более высокие значения полученных в районе горба максимальных значений ДЭ объясняются наличием в Реоксане собственного поглощения.

На рисунке 3.12б повторён график 1 рисунка 3.12а в сравнении с графиком 2, который рассчитан с учётом реального поглощения Реоксана, использованного в эксперименте при получении графиков рисунка 3.4. Видно хорошее совпадение экспериментально полученного графика 2 рисунка 3.4а и графика 2 рисунка 3.12б, что доказывает корректность описанного эффекта формфактора в голографии. Ниже, в параграфе 3.6 будут показаны экспериментальные и теоретические результаты, доказывающие, что аналогичный

эффект существует и в тонких голограммах, работающих в режиме дифракции Рамана – Ната.

График 2 на рисунке 3.12а демонстрирует ДЭ, рассчитанную для плоских равномерных пучков (3.14), для удобства сравнения, уменьшенную по амплитуде более, чем втрое. Видно, что первый максимум графика 1 отстаёт от первого максимума графика 2 примерно в 1,6 раза, что связано именно с гауссовой формой голограммы. При смещении точки первого максимума графика 1 на рисунке 3.12а в точку первого максимума графика 2 (при сохранении положения нулевых точек) и пропорциональном смещении остальных точек графика 1, они с точностью до 4 % ложатся на график 2 рисунка 3.12а. Это доказывает корректность замены (3.18), в практической работе по записи голограмм, выражением (3.19) вплоть до первого максимума ДЭ. Соответственно, для вычисления оптимальной экспозиции «гауссовых» голограмм можно использовать известную для плоских голограмм (3.15) экспозицию, умножая её на коэффициент  $\Psi = 15/28 \approx 0,53$ :

$$\eta' = \Phi \sin^2 \{ \Psi \beta E V \}, \quad (3.19)$$

где

$$\Psi \cdot \beta \cdot E \cdot V = \pi/2. \quad (3.20)$$

Здесь  $E$  – экспозиция, рекомендованная по ТУ [1.81], а  $\Phi$  – коэффициент снижения максимальной ДЭ голограммы, определенный из модельных расчётов по формуле (3.18), рисунок 3.12, как  $\Phi \approx 0,26$ .

Коэффициент  $\Psi$  является формфактором по аналогии с применяющимся в расчётах гравитационных и других полей для тел сложной формы. Форма объекта влияет на результирующие силы через фактор их формы, как и в рассматриваемом случае, оптимальная экспозиция и результирующая ДЭ зависят от фактора формы голограммы.

Методика вычисления формфактора голограмм, таким образом, сводится к вычислению первого максимума на кривой средней ДЭ с учётом неравномерности распределения мощности записывающих и восстанавливающих пучков по полю голограммы и нелинейности фотоотклика голографического материала.

В целом из сравнения экспериментально измеренных значений средней  $\eta'$  гауссовых голограмм и рассчитанных в настоящем параграфе видно хорошее совпадение, что указывает на возможность использовать на практике предложенный метод расчёта оптимальных экспозиций с учётом формфактора  $\Psi$ . Так, важные для практики значения оптимальной экспозиции гауссовых голограмм, точно вычисленные по графикам на основе формулы (3.18) с использованием значений экспозиций  $E$ , приводимых в ТУ [1.81], можно вычислять упрощённо, по выражению (3.19) умножая  $E$  на коэффициент  $\Psi = 0,53$ .

Важно, что для получения стабильных значений  $\eta'$  можно подбирать оптимальные соотношения экспозиции или видности.

В случаях других голограмм, представляющих практический интерес, со сложными объектами голографирования, например, изобразительных или портретных голограмм, в принципе, необходимо снова рассчитывать формфактор. Однако с учётом того, что к результирующему полю сложных объектов, в силу центральной предельной теоремы теории вероятности, применима гауссова статистика [1.72], полученные выше результаты могут быть применимы и для сложных объектов, что будет обсуждено в следующем параграфе.

Для иллюстрации рассмотрим случай модельной голограммы, записанной конусообразными пучками (рисунок 3.13), которых в природе нет, но они, в данном случае, помогут проиллюстрировать вычисление  $\eta'$  для пучков, полученных рассеянием от сложных объектов, часть из которых представляет собой плоские, равномерные по яркости участки, а часть – градиентные, меняющие яркость (интенсивность в плоскости голографического материала) по полю. Суммарная площадь равномерной (плоской) компоненты в этой модели представлена частью голограммы, соответствующей площади верхнего основания усечённого конуса, а площадь наклонных поверхностей конуса равна площади

градиентных поверхностей объекта. Несмотря на некоторый примитивизм, эта модель помогает понять, как возникает эффект формфактора в голографии. Для этой модели была рассчитана средняя ДЭ от  $E$ ,  $V$  (рисунок 3.17б) при  $\beta(E) = \text{const}$ , в сравнении с ДЭ от  $E$ ,  $V$  гауссовых пучков (рисунок 3.17а). На рисунке 3.13б видно, как меняется вид зависимости  $\eta'$  с ростом  $\Delta l$  при росте отношения плоской и градиентной поверхностей голографируемого объекта.

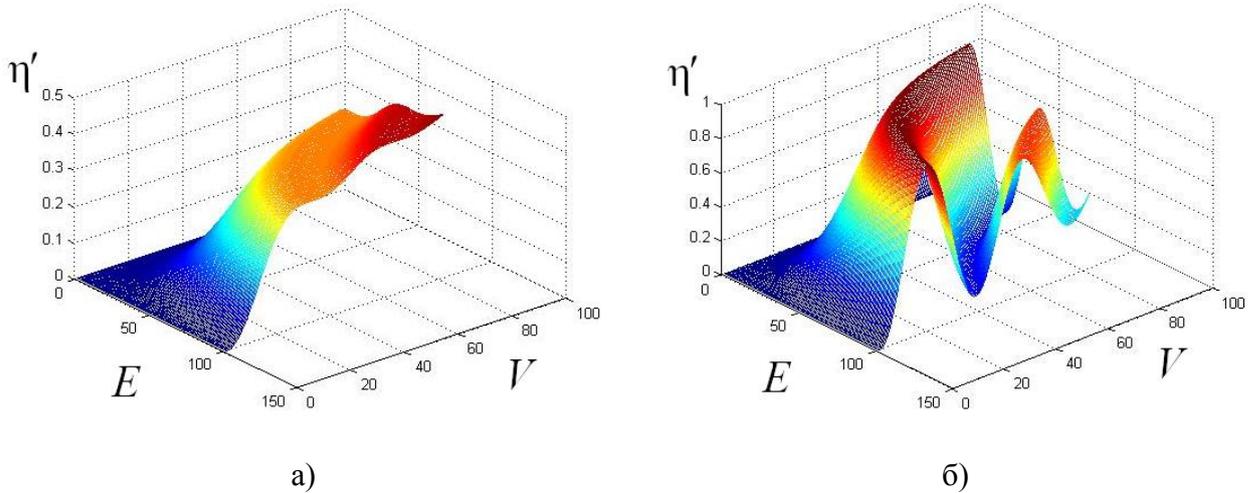


Рисунок 3.13 – зависимость дифракционной эффективности брэгговской голограммы от экспозиции и видности для случаев а) гауссовых пучков и б) конусообразных

Сечения поверхности графиков, аналогичных рисунку 3.13б приведены на рисунке 3.14. График 1 соответствует форме пучка в виде наиболее острого конуса с отношением диаметров  $1/30$ . Графики 2–5 – отношениям  $5/30$ ,  $19/30$ ,  $20/30$  и  $29/30$  соответственно. Видно, что для острого конуса, когда плоской верхней поверхностью пучка можно просто пренебречь (график 1), зависимость  $\eta'$  от фотоиндуцированного  $\Delta l$  плавно выходит на своё максимальное значение и там стабилизируется.

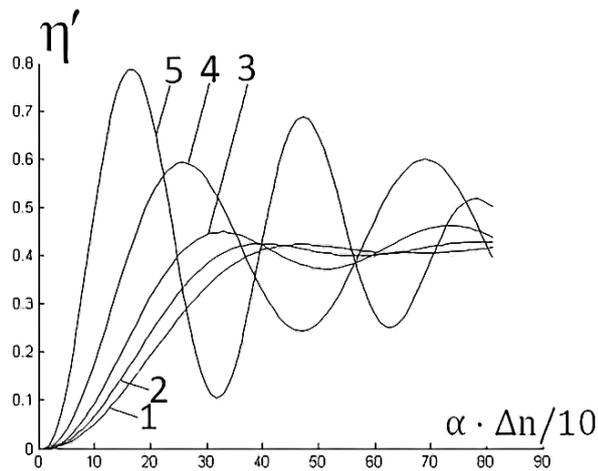


Рисунок 3.14 – Средняя дифракционная эффективность голограммы, сформированной пучками в виде усечённого конуса, где отношение диаметров верхнего сечения к нижнему равны 1/30 – график 1; 5/30 – график 2; 10/30 – график 3; 20/30 – график 4 и 29/30 – график 5 соответственно

Это объясняется плавным нарастанием суммарного среднего значения локальных  $\eta'$  при росте аргумента под синусом в формуле (3.17). Даже после того, как центр голограммы уже миновал первый пик локальной ДЭ и начал снижаться, его поддерживают активно растущие соседние участки. А вот при максимальной схожести диаметров верхнего и нижнего сечений конуса (график 5 на рисунке 3.13),  $\eta'$  переходит к своему среднему значению со значительными биениями, отчего приобретает вид, близкий графику 2 на рисунке 3.12, что и понятно, так как в этом случае голограмма все больше становится похожей на классическую, записанную равномерными плоскими пучками. Одновременно с приближением верхнего сечения конуса к нижнему (на рисунке 3.14 от графика 1 до графика 5) пропорционально росту площади верхнего основания конуса первый максимум  $\eta'$  смещается по оси абсцисс от  $\alpha\Delta n \approx \pi$  до положения  $\alpha\Delta n \approx \pi/2$  – ближе к положению первого максимума графика 5 рисунка 3.14. Такое поведение  $\eta'$  близко  $\eta$  на голограмме, записанной равномерными по яркости и плоскими по полю  $(x, y)$  пучками. Графики 2–4, в той или иной мере, на качественном уровне отражают все промежуточные случаи между голограммой объекта, у которого отсутствуют равномерные по яркости площадки, состоящего только из градиентно-освещённых участков и голограммой, записанной плоскими, равномерными пучками. Графики 2, 3 на рисунке 3.14 наиболее

похожи на график  $I$  рисунка 3.12(1), и формфактор  $\Psi$ , определенный по ним, также близок к формфактору гауссовой голограммы. Следует ожидать, что примерно так будут вести себя и фазовые изобразительные (портретные) голограммы, у которых пропорции между градиентными и равномерными по яркости участками их площади будут аналогичными, т. е. подчиняющимися гауссовой статистике [1.72].

Ясно, что коэффициент  $\Psi$ , характеризующий формфактор, у голограмм объектов, имеющих гауссову статистику распределения по полю голографирования, должен находиться недалеко от 0,6, и его значение будет указывать на степень сложности пучков, рассеянных конкретным объектом голографирования, по сравнению с равномерными плоскими пучками с  $\Psi = 1$ . В следующем параграфе это будет рассмотрено подробнее.

Из сравнения графиках  $I-5$  на рисунке 3.14 видно, что наибольшие значения  $\eta'$  (в области первого максимума) достигаются при больших значениях формфактора  $\Psi$ . Однако область локализации оптимальных значений  $\Delta l$  при этом сужается. Из рисунка 3.13 видно, что создание ярких голограмм с высокой ДЭ может быть достигнуто не только получением равномерного по полю освещения регистрирующей среды, а и изменением по полю голограммы видности записываемого излучения. Поскольку зависимость дифракционной эффективности от видности не прямая (видно, что она может даже падать с ростом видности), можно пытаться компенсировать локальную переэкспозицию локальным изменением видности. Простейшим примером, иллюстрирующим это, по мнению автора, является использование при записи голограмм не только моды  $TEM_{00}$  (рисунок 3.15а), но и моды  $TEM_{01}^*$  («бублика»), что не вполне осознанно использовалось, например, в работе [1.29] и в др. В этом случае при записи голограммы с пучками  $TEM_{00}$  и восстановлении пучками  $TEM_{01}^*$  (или наоборот) можно получать более равномерное по полю распределение локальной ДЭ, а иногда и повысить энтропию.

### 3.1.2. Сложные пучки и энтропия

Следует отметить, что в последнее время появляются исследования, позволяющие значительно расширить, как конфигурации распределения мощности излучения по сечению пучка, так и его поляризации по сравнению с обсуждаемыми выше (рисунок 3.14) вариантами, а, значит, и степени когерентности  $\gamma_{a,r}$ , и видности  $V$  интерференционной картины по полю голограммы. Это могло бы показаться фантастикой, если бы не появление серии работ, объединённых в публикации [3.27], в которых найдены и подтверждены экспериментально новые методы синтеза когерентных световых полей и частично решена задача фокусировки лазерного излучения в область заданной формы.

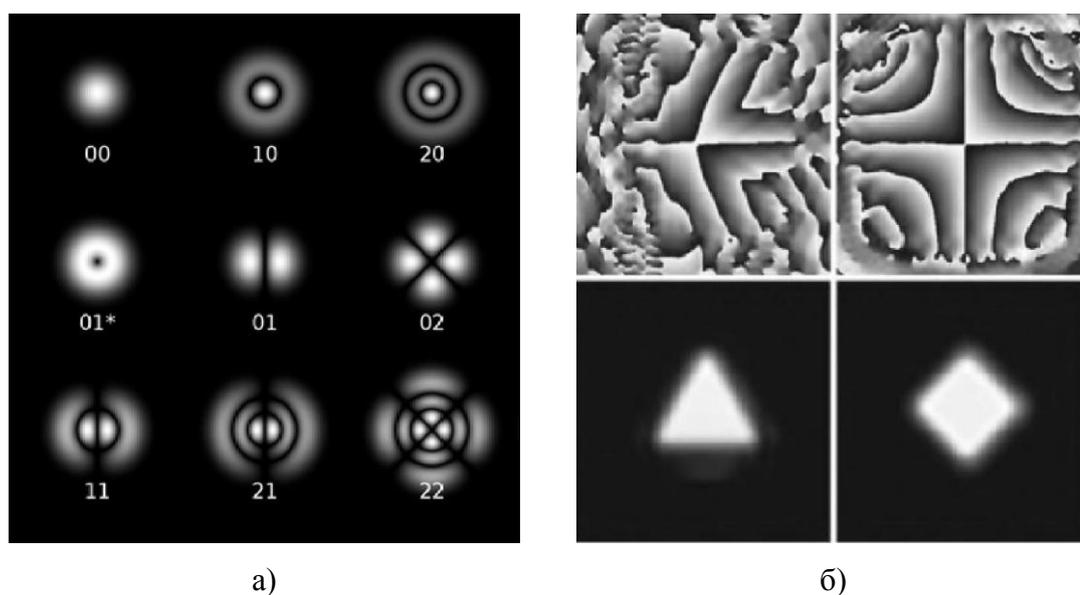


Рисунок 3.15 – а) типовые моды колебаний в резонаторе лазера; б) фазовые транспаранты (верхний ряд) и результаты фокусировки (нижний ряд) при освещении их гауссовыми пучками

На рисунке 3.15б приведён результат фокусировки в виде равномерно освещённого треугольника и квадрата при освещении гауссовым пучком соответствующих транспарантов. Изменяя в таких пучках  $\gamma_{a,r}$  (3.7), например, за счёт поляризации [3.27, с. 213] и комбинируя  $E(x, y)$  и  $V(x, y)$  в формуле (3.18) таким образом, чтобы их произведение в различных участках поля голограммы обеспечивало  $\Psi\alpha\Delta n \approx \pi/2$ , как это происходит в области первого максимума на

рисунке 3.13б, можно добиваться примерно постоянных значений  $\eta'$  на большей площади голограмм. Таким образом, для некоторых специальных голограмм можно не только увеличить значение формфактора, приближая его к единице, но и достичь более высоких значений средней ДЭ, уже не ограниченных  $\Phi$ .

Следует отметить, что полученный формфактор  $\Psi$  вырождается при отсутствии любого из двух факторов – либо нелинейности, либо неоднородности пучков. Так, при исчезновении неоднородности экспозиции формфактор вырождается и  $\Psi = 1$ , а при исчезновении нелинейности ДЭ нет локальных максимумов на графиках (рисунки 3.12–3.13), по которым определяется значение оптимальной экспозиции, задающее значение  $\Psi$ . Следовательно, между нелинейностью ДЭ и неравномерностью экспозиции существует перекрёстное взаимодействие, порождающее возникновение эффекта, описанного выше как формфактор.

Предложенная здесь методика вычисления средней ДЭ голограмм сложной формы подтверждается экспериментальными данными для гауссовых голограмм и может быть использована при расчёте параметров различных голограмм на линейных и нелинейных участках фотоотклика голографического материала. Проведённые модельные расчёты показывают, что в первом приближении сложные голограммы, как например, созданные комбинацией гауссовых пучков, или даже изобразительные голограммы, также могут быть рассчитаны с использованием их собственного формфактора, который мало отличается от формфактора, вычисленного для «гауссовых» голограмм. Приведённые результаты могут оказаться полезными при разработке новых голографических материалов как для голограмм, так и для выбора используемых в голографии лазеров, имеющих моды излучения не только  $TEM_{00}$ , но в том числе и  $TEM_{01}^*$  или более сложные моды, сформированные, например, на основе результатов разработок [3.27, с. 213]. Основная рекомендация может состоять в том, что записывать и восстанавливать голограммы лазерным излучением с переменными по полю интенсивностью (3.6) и видностью (3.9) следует так, чтобы аргумент в формулах (3.17, 3.18), состоящий из произведения нескольких компонент,

минимально изменялся по полю  $(x, y)$ . В этом случае влияние формфактора будет минимизировано и голограмма будет достигать более высоких, более близких к Когельниковским [1.66], значениям средней ДЭ. Этого, в частности, можно добиваться, формируя пучки с переменными по полю значениями комплексной степени когерентности  $\gamma_{a,r}$ , а также с помощью лазеров с многопетлевой голографической обратной связью [3.28].

В упрощённом виде, полагая, что средняя ДЭ, как это показано на рисунке 3.12, стабилизируется около значения  $\Phi$ , можно считать, что и глубина модуляции несущей частоты голограммы (рисунок 3.9б) стабилизируется около этого значения. Согласно формуле (3.1), ограничение  $\eta'$  значением  $\Phi$  уменьшает энтропию голограммы, поскольку при сохранении уровня шумов число возможных различимых состояний сигнала  $Q$  пропорционально уменьшается до  $Q=(\eta_m \cdot \Phi)^{(M \cdot N)}$ , где  $\eta_m$  – число градаций, представляющих в дискретном виде эффективность дифракции в каждой локальной точке голограммы (пикселе):

$$\begin{aligned} H &= -\sum_1^Q (1/Q) \log(1/Q) = \\ &= -\sum_1^{(\Phi \cdot \eta_m)^{M \cdot N}} (1/(\Phi \cdot \eta_m))^{M \cdot N} \log_2 \left[ 1/(\Phi \cdot \eta_m)^{M \cdot N} \right] =, \\ &= -(M \cdot N) \log_2 \left[ 1/(\Phi \cdot \eta_m) \right] \end{aligned} \quad (3.21)$$

что при равновероятных исходах, когда все  $\eta_m$  лежат в пределах  $(\eta' \geq \eta_m > \eta_u)$ , приводит к приближённому выражению для удельной энтропии  $h$  на один пиксель (3.22):

$$h \approx -\log_2 (1/(\Phi \cdot \eta')) = \log_2 (\eta') + \log_2 (\Phi). \quad (3.22)$$

Здесь значения  $\eta'$  имеют смысл отношения сигнал/шум или отношения средней ДЭ сигнала к средним шумам голограммы (3.23):

$$\eta' = \frac{\eta_c}{\eta_u}. \quad (3.23)$$

При подстановке в (3.23) значений  $\eta'/\eta=256$ , что соответствует современному стандарту «глубины цвета» и ранее полученной  $\Phi \approx 0,3$  (рисунок 3.6б) получаем уменьшение энтропии на пиксель голограммы с 8 до 6,3, что хорошо согласуется с оценками плотности записи информации по (3.2) при  $\alpha = 1$ .

### ***Выводы параграфа 3.1***

ДЭ объёмных голограмм, работающих в режиме дифракции Брэгга, ограничивается и не достигает теоретического максимума за счёт наличия эффекта перекрёстного взаимодействия двух нелинейных характеристик, одна из которых вызвана неоднородной по полю голограммы интенсивностью записываемого излучения как объектной, так и опорной волны, а другая – нелинейной зависимостью ДЭ от экспозиции. Поскольку зависимость локальных значений ДЭ от экспозиции имеет локальные максимумы при разных значениях экспозиции, то на среднюю ДЭ влияет форма голограммы (фактор формы или формфактор).

Ввиду связи между энтропией голограммы и величиной формфактора, её ограничивающей, следует учитывать не только коэффициент требуемого увеличения экспозиции –  $\Psi$ , названный в [3.3–3.5, 1.136, 1.137] формфактором, но и величину ограничения максимальной по голограмме ДЭ  $\Phi$ . Таким образом, формфактор голограмм характеризует два параметра  $\Psi$  и  $\Phi$ . Далее формфактор голограмм будем характеризовать этими двумя числами. Учитывая специфику голографической записи, проявляющуюся в ортогональности параметров  $\Phi$  и  $\Psi$ , удобно характеризовать формфактор голограмм в векторной форме  $(\Phi; \Psi)$ , который для гауссовых пучков равен:

$$(\Phi; \Psi) = (0,26; 0,6). \quad (3.24)$$

И удельная энтропия  $h$  по (3.22), при  $\Phi=0,26$  равна:

$$h \approx \log_2(256) + \log_2(0,26) = 8 - 1,943 \approx 6. \quad (3.25)$$

### Параграф 3.2. Формфактор голограмм сложных изображений

Как было показано в предыдущем параграфе 3.1, форма пучков, записывающих голограмму, значительно влияет как на дифракционную эффективность голограммы, так и на оптимальную экспозицию. Также она определяет энтропию и количество информации, которое может содержать голограмма. Это касается как аналоговых голограмм, записываемых традиционно на фоточувствительные материалы, так и компьютерных, записанных или воспроизводимых цифровым способом.

На рисунке 3.16 хорошо видно, что ограничения, вызванные фактором формы голограммы, при изменениях её формы, в определённых случаях, могут не изменяться. Это указывает на наличие эффектов, связывающих свойства голограмм, на первый взгляд, совсем не похожих друг на друга.

Действительно диапазон изменения сигнала, восстановленного голограммой, не зависит от координаты на голограмме, а зависит только от допустимого изменения фотоотклика голографического материала и порождённой этим изменением локальной ДЭ.

Выше было отмечено, что влияние формфактора проявляется только при одновременном существовании двух эффектов – нелинейности отклика, в данном случае  $\eta'(E, V)$ , и неравномерности яркости по полю  $E(x, y)$ . Несмотря на широкую применимость модели гауссовых пучков при записи голограмм, часто распределение яркости, так называемых, объектных пучков, по полю голограммы не соответствует форме гауссовых кривых.

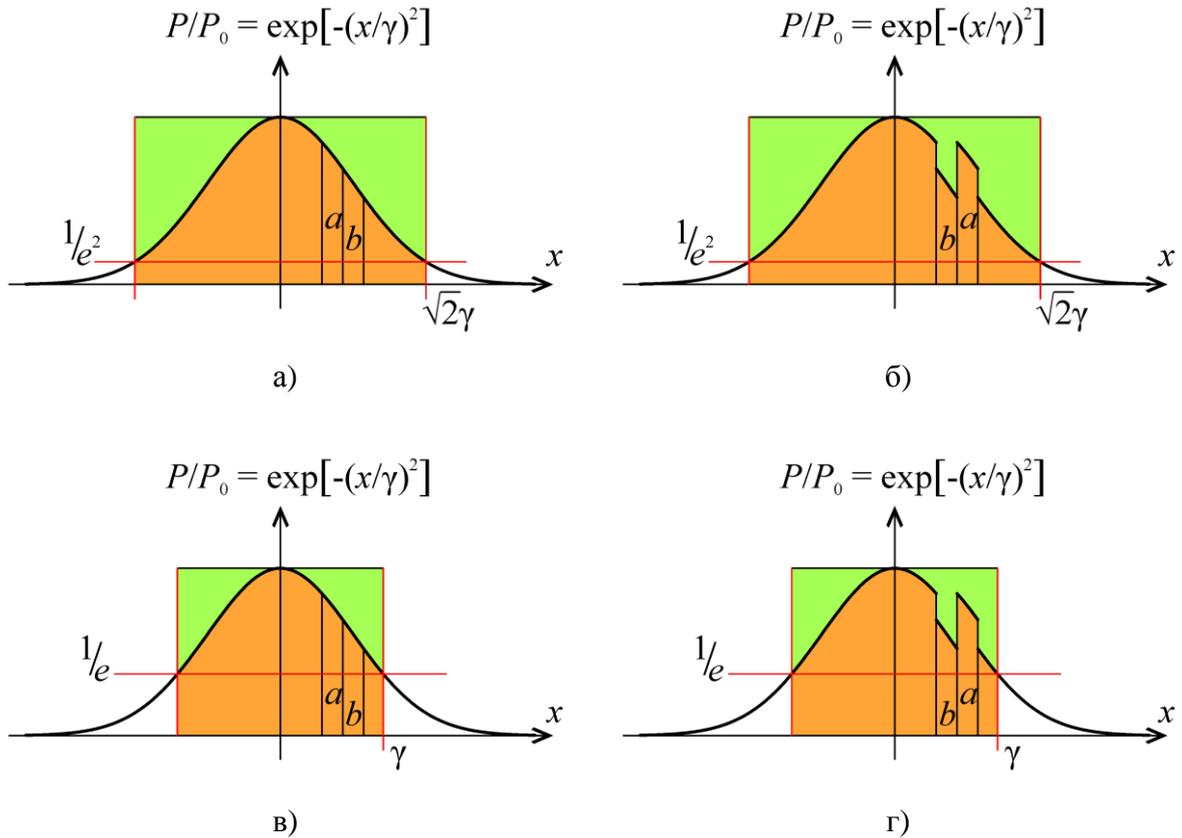


Рисунок 3.16 – Ограничения диапазона возможных состояний сигнала, формируемого голограммой, при её записи гауссовыми пучками:

- а) ширина голограммы по уровню  $1/e^2$ ; в) ширина голограммы по уровню  $1/e$ ;  
 б) и г) голограммы с изменением положения их отдельных участков – участка  $a$  и участка  $b$ , по сравнению с исходными голограммами а) и в)

Однако, как было отмечено в [1.72], большинство сложных по форме пучков, имеющих многофакторное (хотя и не гауссово по полю) распределение яркости, в силу ЦПТ, могут приближаться к гауссовой статистике распределения яркости. Это означает, что для голограмм, записанных такими пучками, тоже можно ожидать подобного проявления формфактора, чему и посвящён настоящий параграф.

### 3.2.1. Статистика сложных изображений

Для численного эксперимента было выбрано типичное портретное изображение, с разрешением  $200 \times 200$ , пригодное для размещения на документах, удостоверяющих личность. Оно было сделано фотоаппаратом Canon EOS 350D в режиме автоматического выбора экспозиции по времени. Более высокого разрешения, как будет видно далее, эти численные эксперименты не требовали. Затем полученное изображение было преобразовано графическим редактором в изображение в градациях серого (рисунок 3.17а), распределение яркости которого приведено на рисунке 3.17б.

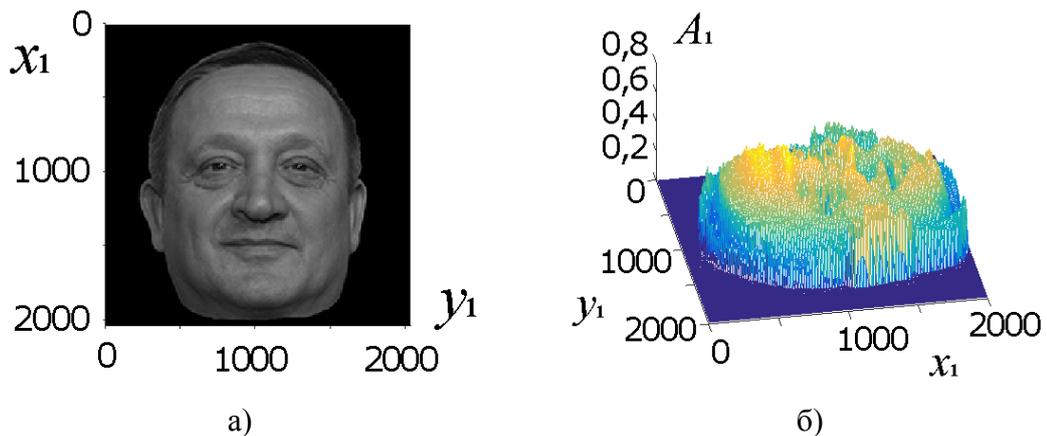


Рисунок 3.17 – а) изображение в серых тонах;

б) 3D развёртка динамического диапазона яркостей  $A_1$  составляющих его точек

Можно видеть, что распределение яркости на рисунке 3.17б носит, как будто, случайный характер. Однако, его весовая функция яркости близка к гауссовому распределению (см. рисунок 3.18).

Типовым оператором «histogram» в среде MATLAB были построены гистограммы изображения (рисунок 3.17б), приведённые на рисунках 3.18а,б.

На гистограмме (рисунок 3.18а) видно, что в кадре изображения (рисунок 3.17а) много пустого места, не занятого изображением, где яркость равна нулю. Убирая этот пик из статистического распределения, можно более подробно видеть картину распределения яркостей по полю изображения портрета

на рисунке 3.18б. Среднее отклонение от показанной на том же графике гауссовой кривой составляет 18 %.

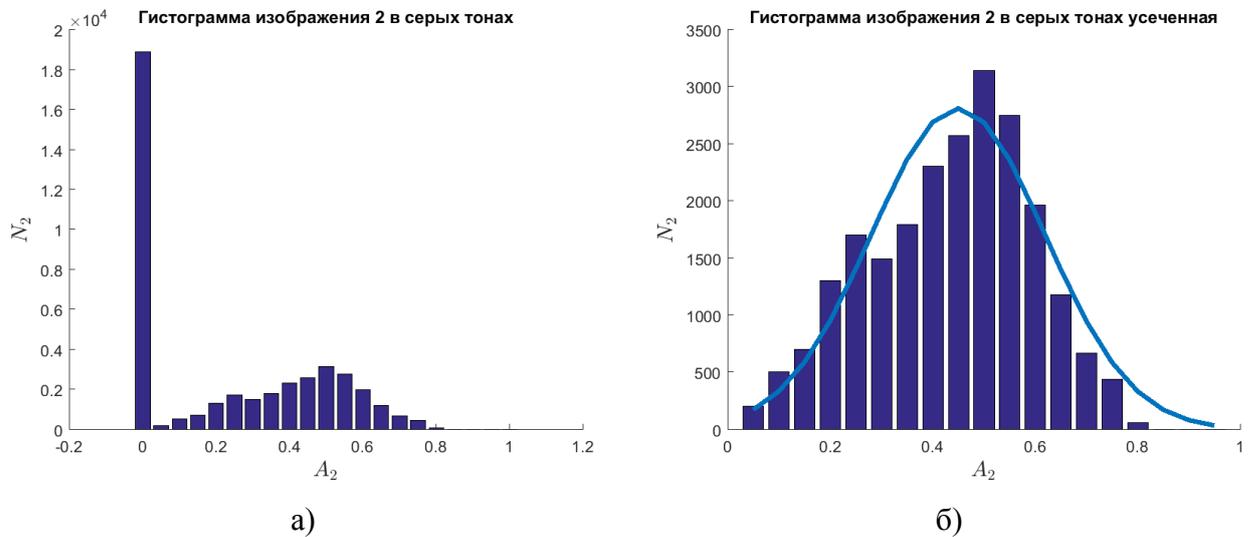
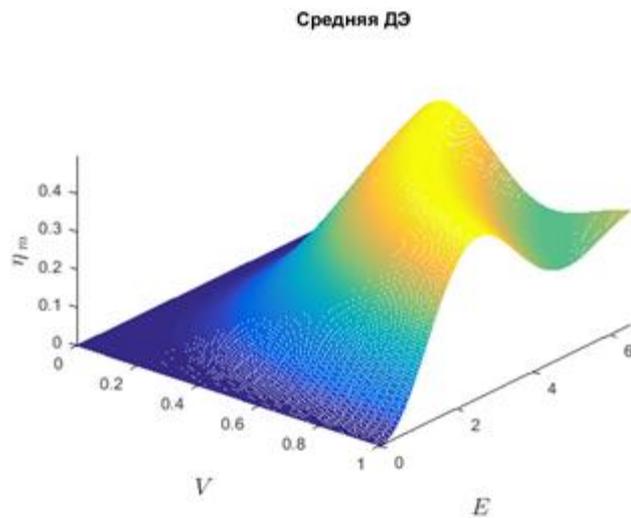


Рисунок 3.18 – Гистограммы распределения яркости: а) для исходного портрета из рисунка 3.16а; б) для портрета из рисунка 3.17а с отсечённым нулевым фоном

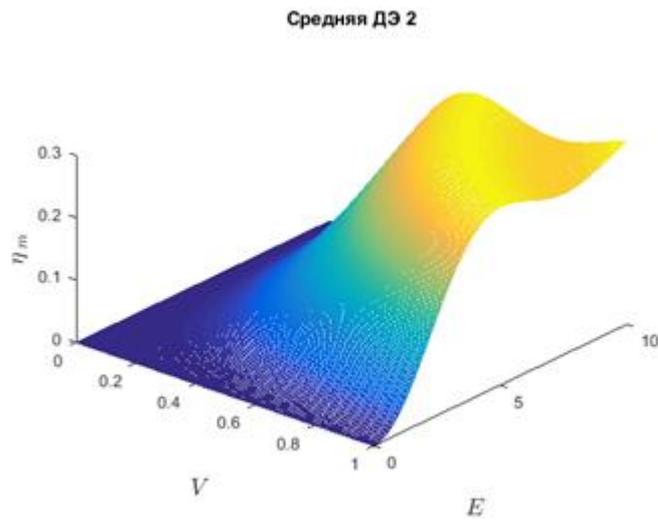
Если внимательно исследовать развёртку динамического диапазона точек изображения на рисунке 3.17б, можно обнаружить, что самые яркие точки не дотягивают до  $A_1 = 1$ , остаются ниже уровня 0,8, а самые тёмные образуют, как бы, общую «полочку» в районе  $A_1 = 0,05$ . Пропорциональное растяжение динамического диапазона всего изображения так, чтобы самые яркие точки приближались к  $A_1 = 1$ , а пиксели фона были удалены (для этого динамический диапазон  $A_1$  внутри 0,05–0,8 был растянут от 0,0 до 1,0) не привело к существенному отклонению полученных гистограмм от гауссовой кривой. В этом смысле степень похожести гистограммы портрета на гауссову кривую можно считать некоторым инвариантом относительно указанных изменений динамического диапазона. Поэтому в дальнейшем мы будем обращаться к исходному изображению (рисунок 3.17а,б) со статистическим распределением яркости (рисунок 3.18б).

Вычисленная по формуле (3.18) средняя ДЭ для портретного изображения (рисунок 3.17а,б) и средняя ДЭ для гауссового пучка, аналогичного приведённому на рисунке 3.11 показаны, соответственно, на рисунке 3.19а и 3.19б. Здесь и далее

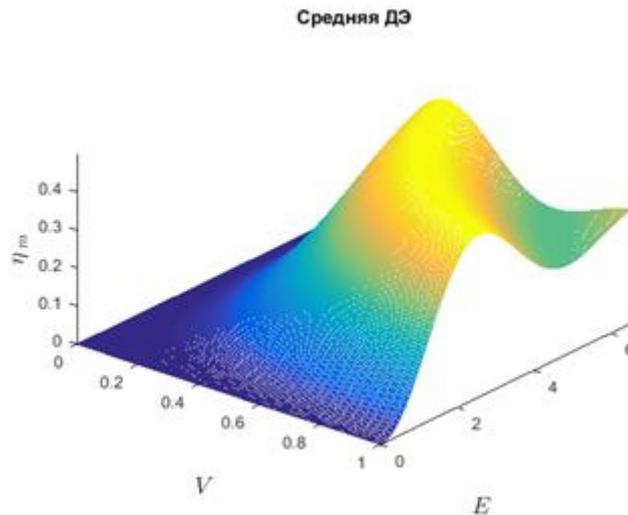
мы берём для вычислений по (3.18) линейный фотоотклик среды ( $\beta=1$ ), чтобы не усложнять анализ численных расчётов излишним количеством анализируемых параметров. Далее, в параграфе 3.4, мы приведём результаты, полученные с учётом нелинейности фотоотклика среды, но это заслуживает отдельного, более подробного изложения.



а)



б)



в)

Рисунок 3.19 – Зависимость  $\eta'(E, V)$  для изображения на рисунке 3.17а:

а) исходного портрета и б) гауссова пучка;

в) усечённого по уровню  $P/P_0$  гауссова пучка в диапазоне  $P/P_0 = (0,2 - 1,0) A$

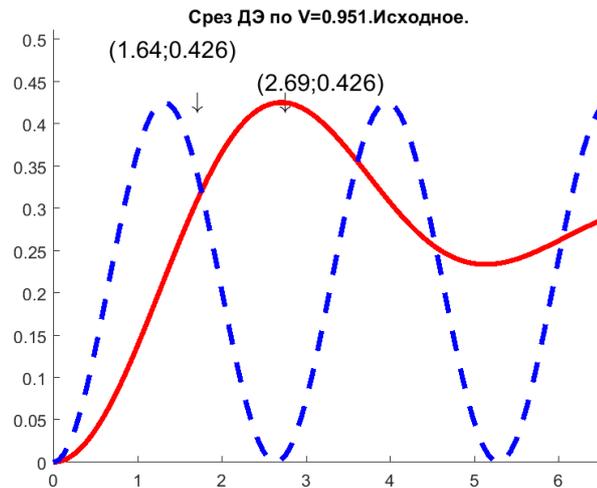
При сравнении рисунков 3.19а и 3.19б видно, что в первом случае  $\eta'(E, V)$  растёт и стагнирует на  $\Phi \approx 0,6$ , далее видны небольшие колебания при росте экспозиции (и видности) после достижения  $\eta'(E, V)$  первого максимума, а во втором, для гауссова пучка  $\eta'(E, V)$  возрастает аналогично, хотя и с небольшими отличиями. В [1.137] такое поведение графика  $\eta'(E, V)$  было объяснено ростом вклада удалённых от центра частей гауссова пучка, когда локальные значения аргумента под синусом (3.15) на всё более периферийных участках голограммы перерастают  $\pi$ .

Для реальных изображений, ( $\eta'$  на рисунке 3.19а), как видно по изображению, приведённому на рисунке 3.17а,б, такого изменения интенсивности по полю, как в гауссовых пучках, нет. Однако, внутренняя структура пучка, формирующего изображение (рисунок 3.17) такова, что аналогично рисунку 3.16б,в, взаимоперемещение отдельных ярких и не ярких участков изображения не приводит к их количественному изменению, а статистически, согласно ЦПТ, их яркость распределена по гауссу.

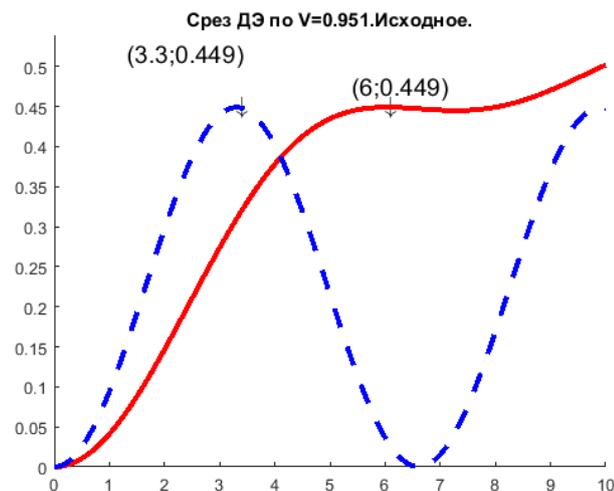
Некоторые отличия графиков из рисунка 3.19а и 3.19б, можно предположить, являются следствием неточного совпадения гистограммы

(рисунок 3.18б) с гауссом. Действительно, если гауссову кривую чуть подрезать снизу, то график ДЭ (рисунок 3.19в) становится ближе к изображённому на рисунке 3.19а.

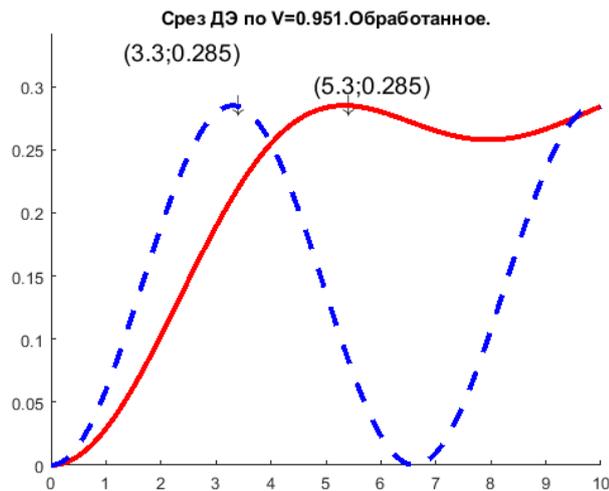
Далее, продолжим анализ в более удобном виде двумерных сечений этих графиков. На рисунке 3.20 приведены зависимости  $\eta'$  от  $E$  как сечения графиков из рисунка 3.19 плоскостью, параллельной  $V$  для значений видности, близкой единице ( $V=0,951$ ). В силу симметричной зависимости  $\eta'$  как от  $E$ , так и от  $V$ , для случая линейного фотоотклика, этого будет достаточно для нахождения значений формфактора  $\Psi$  и  $\Phi$  – максимально достижимой ДЭ.



а)



б)



в)

Рисунок 3.20 – Сплошная линия – зависимость  $\eta'$  от экспозиции  $E$  при  $V=0,951$ : а) для исходного изображения (портрета на рисунке 3.17а); б) для гауссова пучка; в) для усечённого гауссова пучка с модифицированным динамическим диапазоном ( $P/P_0=\{0,2-1,0\}$ ). Пунктирная линия – зависимость от тех же параметров идеальной голограммы, сформированной равномерным по полю сигналом [1.14], уменьшенная по ординате для удобства представления до значения  $\Phi$  – первого максимума  $\eta'(E)$

На рисунке 3.20 приведены значения координат первых максимумов графиков  $\eta'(E)$ . Видно, что на рисунке 3.20а ДЭ голограммы под влиянием формфактора достигает максимального значения  $\Phi_1=42,6\%$  при экспозиции  $E$  в  $2,69/1,64=1,64$  раза большей, чем в идеальной [2.3] голограмме, что соответствует значению  $\Psi_1=1/1,64=0,61$  для формулы (3.19). Таким же образом рассчитанные значения для гауссовых пучков из рисунка 3.20б получаются равными  $\Phi_2=45\%$  и  $\Psi_2=0,55$ . Значения, хоть и близкие к  $\Phi_1$  и  $\Psi_1$ , но отличающиеся по  $\Psi$  на  $9,8\%$ , а по  $\Phi$  – на  $5,3\%$ .

В случае усечённого снизу гауссова пучка  $(0,2-1,0)$ , величина  $\Psi_3=0,62$ , т. е. становится, практически, равной,  $\Psi_1$ , а  $\Phi_3$  падает до  $28,5\%$ . Уменьшение максимально достижимой ДЭ  $\Phi_3$  объясняется просто уменьшением эффективной площади, занимаемой усечённым гауссовым пучком на голограмме. Пропорциональным увеличением диаметра усечённого гаусса примерно на  $15\%$  было получено увеличение  $\Phi_2$  до  $44\%$ .

Таким образом, можно утверждать, что сделанное в начале параграфа предположение о том, что сложные изображения, имеющие в силу ЦПТ статистически гауссово распределение яркостей, также имеют формфактор, близкий к формфактору гауссовых пучков. Уточняя этот результат, можно сказать, что формфактор портретных изображений всё же ближе к формфактору усечённого снизу гаусса.

### 3.2.2. Повторяемость полученных результатов

Для проверки репрезентативности полученных результатов были проанализированы по описанной выше методике портреты группы из 31 человека (рисунок 3.21). Среди них были женщины и мужчины, снимавшиеся в очках и без очков, со вспышкой и без неё. По этой группе были вычислены средние значения формфактора  $\Psi=0,6157$  и дисперсии распределения яркости  $D=0,3197$ .

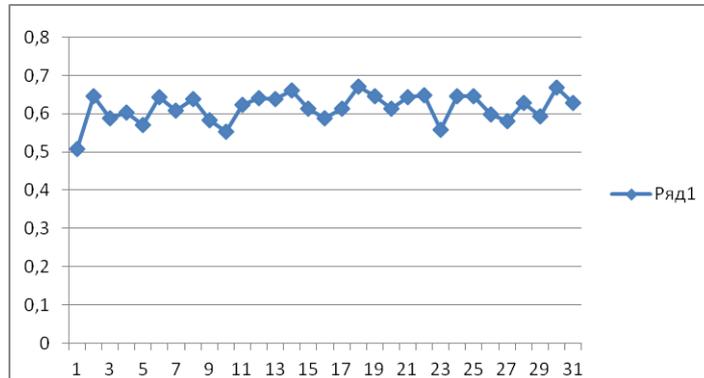


Рисунок 3.21 – Среднее значение формфактора для 31 портрета:  
по оси абсцисс – порядковый номер исследуемого портрета,  
по оси ординат – величина формфактора  $\Psi$

Среднеквадратичное отклонение формфактора при этом составляло 6,087 %, а дисперсии – 32,867 %. Максимальное отклонение формфактора от среднего значения по группе составило  $\Psi_{max} = 0,1$ ; а  $D_{max} = 0,16$ . Таким образом, можно сделать вывод о том, что практическое применение формфактора при определении оптимальных условий записи (экспозиции и видности) для сложных

многофакторных изображений, имеющих близкое к гауссовому статистическое распределение яркости, можно проводить по формуле Когельника [1.66], но с учётом формфактора, вычисленного для (3.19) по (3.18), который равен формфактору гауссовых пучков [1.135, 1.137].

Для определения репрезентативности полученного результата исследовалась сходимость дисперсии при увеличении числа портретов в выборке, начиная от 5 портретов и до 31. На рисунке 3.22 приведены графики сходимости доверительного интервала при вычислении дисперсии значений формфактора (рисунок 3.21), начиная с дисперсии по 5 портретам и заканчивая дисперсией формфактора по 31 портрету. Видна хорошая сходимость к среднему значению, что указывает на репрезентативность приведённой выборки из 31 портрета.

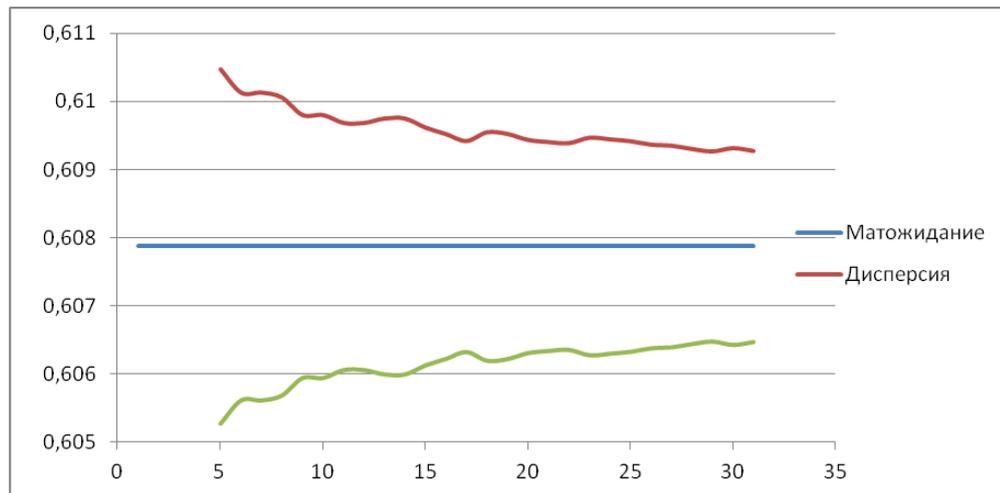


Рисунок 3.22 – Сходимость дисперсии при увеличении количества обработанных портретов: прямая на уровне 0,608 – среднее значение формфактора для 31 портрета; сверху и снизу – кривые отклонения от среднего значения на величину дисперсии по 5 и более измерениям (до 31)

Поскольку отклонение от гауссовой статистики по группе из 31 человека было 32 %, а отклонения в формфакторе были 6,1 %. (при этом сама средняя величина формфактора на случайной группе из 31 человека была 0,608), то можно сделать вывод, что даже отклонения от гауссова статистического распределения не дают существенного изменения формфактора. Именно поэтому можно использовать полученное ранее значение формфактора для гауссовых пучков при

записи на голограмму реальных портретных изображений. Это исследование ещё раз подтверждает, что формфактор устойчив к статистическим отклонениям.

### ***Выводы параграфа 3.2***

Полученные в настоящем параграфе результаты говорят о том, что, действительно, сложные голографические изображения, формирующиеся с помощью пучков, неоднородность по полю которых является следствием наложения влияния многих факторов (отражение, поглощение, дифракция и другие виды рассеяния излучения), создающих реальную картину окружающей среды, обладают статистическим распределением яркости интерференционной картины близким к гауссовому. Оптимальная экспозиция для таких голограмм, с учётом видности интерференционной картины, может быть рассчитана с помощью формфактора.

Степень точности таких расчётов определяется:

Во-первых, близостью статистики распределения яркости описанных с помощью формфактора изображений к эталонной статистике, используемой в расчёте. В нашем случае отличие гистограмм изображения и ближайшей к ним гауссовой кривой составляло 18 %, а отличие в величине формфактора между ними ( $\Psi_1$  и  $\Psi_2$ ) не превышало 10 %. Также при правильном подборе описывающей изображение статистики (усечённый на 20 % снизу гаусс), отличия в формфакторе между  $\Psi_1$  и  $\Psi_3$  составляли всего 1,6 %. Такой точности вполне достаточно для практического выбора экспозиции при известной величине видности записывающей голограмму интерференционной картины и определении предельных значений информационной ёмкости голограмм по приведённым оценкам их энтропии.

Во-вторых, степень точности расчётов определяется пропорциональной долей сигнала с определённой статистикой в общем кадре. Так, ограничивая гаусс снизу отсечением его значений, лежащих в диапазоне яркостей от нуля до 20 %,

мы, тем самым, уменьшили вклад бесконечно широких, хотя и низких, «крыльев» гаусса, изменили статистику распределения яркости. Это приблизило величину формфактора для голограммы гауссова пучка к соответствующей величине формфактора голограммы изображения, но, одновременно, уменьшило его эффективный размер в площади кадра, что привело к некоторому снижению средней ДЭ.

Для приближённого вычисления энтропии по (3.23) и увеличения оптимальной экспозиции обратно пропорционально  $\Psi$ , характеристика формфактора голограммы сложных изображений, на примере портрета, будет выглядеть в виде вектора, как предложено в (3.22), следующим образом:

$$(\Phi; \Psi) = (0,42; 0,6). \quad (3.26)$$

Следовательно, оценка максимальной удельной энтропии голограммы портретного изображения с учётом (3.23) и глубиной изображения  $\eta' = \eta_c / \eta_{iu} = 256$  дискрет будет, согласно (3.22), равна:

$$h \approx -\log_2(1/\eta' \cdot \Phi) = \log_2(\eta') + \log_2(\Phi) = 6,7. \quad (3.27)$$

### **Параграф 3.3. Формфактор голограмм сфокусированных изображений и голограмм Фурье и Френеля**

Как было показано в предыдущем параграфе 3.2, на величину достижимой дифракционной эффективности, а также на величину энтропии голограммы, влияет статистика распределения интенсивности восстановленного голограммой сигнала.

Для наиболее интересного случая ярких, Брэгговских голограмм можно показать, что модификация записываемого на голограмму объектного пучка, вызываемая записью расфокусированного или удалённого от поверхности голограммы объекта, не приводит к существенным изменениям формфактора и

достигаемой средней ДЭ. Полученные результаты позволяют утверждать, что формфактор более консервативен к изменению записываемого изображения, чем его статистическое распределения яркости, этим формфактор напоминает известные интегралы движения.

Как при записи голограммы гауссовыми пучками, так и при записи пучками, которые мы называем сложными, имея ввиду близость распределения локальных значений ДЭ к гауссову статистическому распределению яркости, согласно ЦПТ, на величины среднего значения ДЭ и энтропии влияет формфактор голограммы.

Выше было показано, что при записи голограмм гауссовыми пучками, за счёт перекрёстного влияния двух нелинейностей (гауссова распределения яркости по полю голограммы и синусоидальной, когельниковской зависимости локальной ДЭ от экспозиции) возникает ограничение на максимально достижимую ДЭ голограмм, согласно (3.18) и (3.19). Одновременно скорость достижения этого максимального значения замедляется, и оптимальная экспозиция увеличивается. Причём, при устранении одной из этих двух нелинейностей эффект формфактора сводится к нулю, и величина достижимой ДЭ описывается классическим выражением, аналогичным (3.19), при  $\Psi=\Phi=1$ , полученном Когельником для плоской волны [1.66]. Степень приближения к этому классическому выражению определяется степенью приближения одной из двух указанных нелинейностей к прямолинейному, равномерному распределению и определяется величиной значений  $\Psi$  и  $\Phi$ .

В численном эксперименте, аналогично [3.4], экспозиция  $E$  по (3.18) и (3.19) приводится в нормированных единицах так, что  $E=1$  изменяет фотоотклик голографического материала, приводя к росту аргумента под синусом, равному одному радиану. Таким образом, экспозиция  $E=\pi/2$ , при  $\beta=1$  приводит к  $\eta=100\%$  при видности  $V=1$  в соответствии с выражением, найденным Когельником (3.14), в которое вырождается (3.17) при  $\Delta n=f(EV)=EV$ . В настоящем параграфе также рассматривается случай линейного фотоотклика голографического материала,

полагая везде далее  $\beta(E)=1$ . Случай нелинейности фотоотклика будет рассмотрен в следующем параграфе.

### 3.3.1. Численный эксперимент

На рисунке 3.23а, приведена зависимость  $\eta'(E, V)$ , рассчитанная для приведённых выше параметров по (3.18) при экспозиции гауссовым пучком. Для сравнения, на рисунке 3.23б приведён график зависимости от нормированной экспозиции  $E$  классической Когельниковской ДЭ (пунктирная кривая) и  $\eta'(E)$ , рассчитанной по (3.18) для гауссовых пучков при  $V=1$ . Видно, что график  $\eta'(E, V)$  на рисунке 3.23а растёт нелинейно. Он похож на представленные в предыдущих двух параграфах 3.1 и 3.2 и показан в изометрии по двум параметрам – экспозиции и видности. На рисунке 3.23 лучше видна область стагнации  $\eta'(E, V)$ , которую мы использовали для приближённого вычисления энтропии.

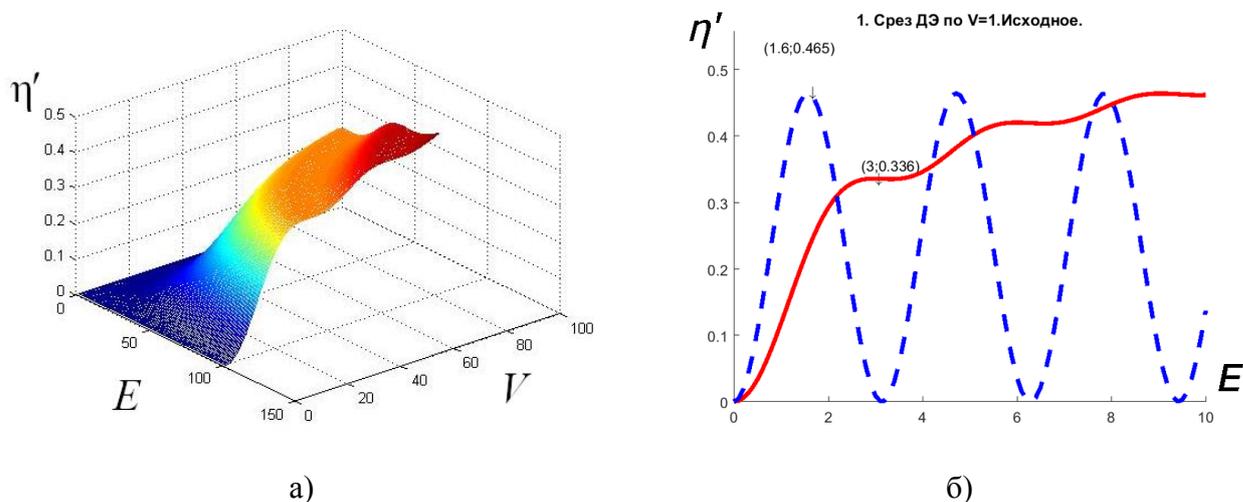


Рисунок 3.23 – а) зависимость  $\eta'$  от экспозиции  $E$  и видности  $V$ ;

б) графики среза из а) при  $V=1$  – сплошная кривая и когельниковское значение дифракционной эффективности для равномерного пучка (пунктирная кривая), уменьшенная примерно в 2 раза по амплитуде до максимальных значений  $\eta'$  для удобства сравнения положений максимумов соответствующих кривых. Полученный формфактор  $\Psi_1=1,6/3,0=0,53$

Для гауссовых пучков, в случае линейного фотоотклика (рисунок 3.23б) формфактор  $\Psi_1=1,6/3,0=0,53$ . Изменяя форму пучка, можно влиять на статистику

распределения яркости записываемого на голограмму изображения. При этом допустимы только такие изменения, которые не приводят к нарушению структуры записываемого на голограмму сигнала (изображения). К ним могут относиться: расфокусировка, удаление объекта, изменение видности по полю и даже по объёму регистрируемого изображения.

На рисунке 3.24в приведены рассчитанные по (3.18) графики  $\eta'(E)$  при  $V=1$  для голограммы портретного изображения. Видно (рисунок 3.24б), что статистическое распределение яркости портретного изображения близко к гауссовому, его отклонение от гауссового составляет всего 17,9 %, что объясняет практическое совпадение полученного из рисунка 3.24в формфактора  $\Psi_2=1,56/2,93=0,53$  с формфактором  $\Psi$  гауссовых пучков.

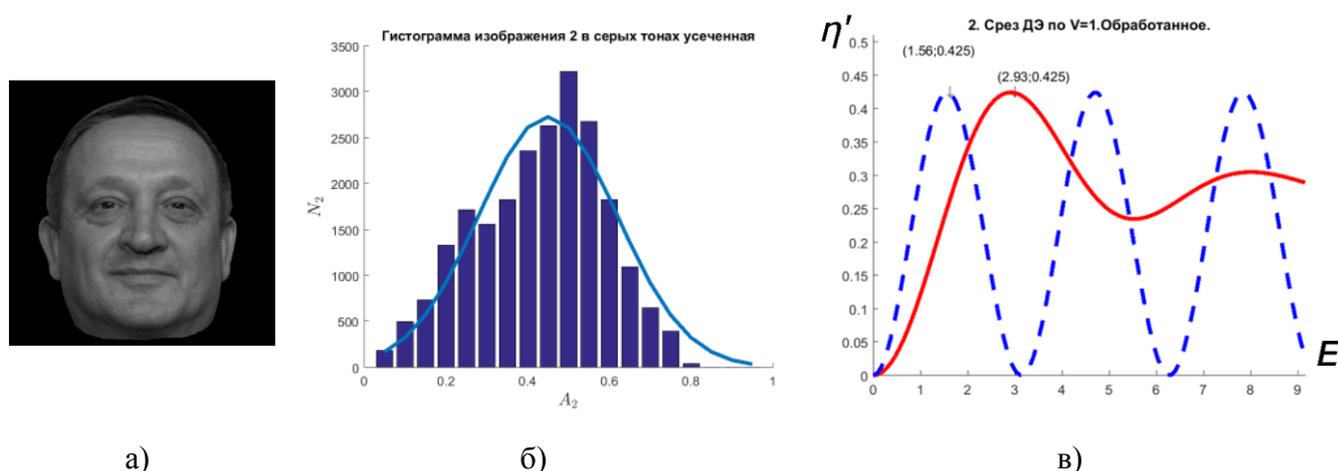


Рисунок 3.24 – а) портретное изображение; б) гистограмма статистического распределения яркости портретного изображения, дисперсия отклонения от гауссового пучка 17,9 %; в) дифракционная эффективность голограммы портретного изображения (сплошная кривая) и дифракционная эффективность равномерной по полю когельниковской голограммы, уменьшенная по амплитуде для удобства сравнения (пунктирная кривая).

Полученный формфактор  $\Psi_2=1,56/2,93=0,53$

Далее, на рисунке 3.25, приведён случай записи расфокусированного изображения, при котором детали изображения (рисунок 3.25а) размываются и статистическое распределение яркости (рисунок 3.25б) меньше похоже на гауссово, его отклонение от гауссового составляет уже 27,5 %. Как видно из

рисунка 3.25в, величина формфактора при такой расфокусировке несколько растёт ( $\Psi_3=1,54/2,45=0,63$ ).

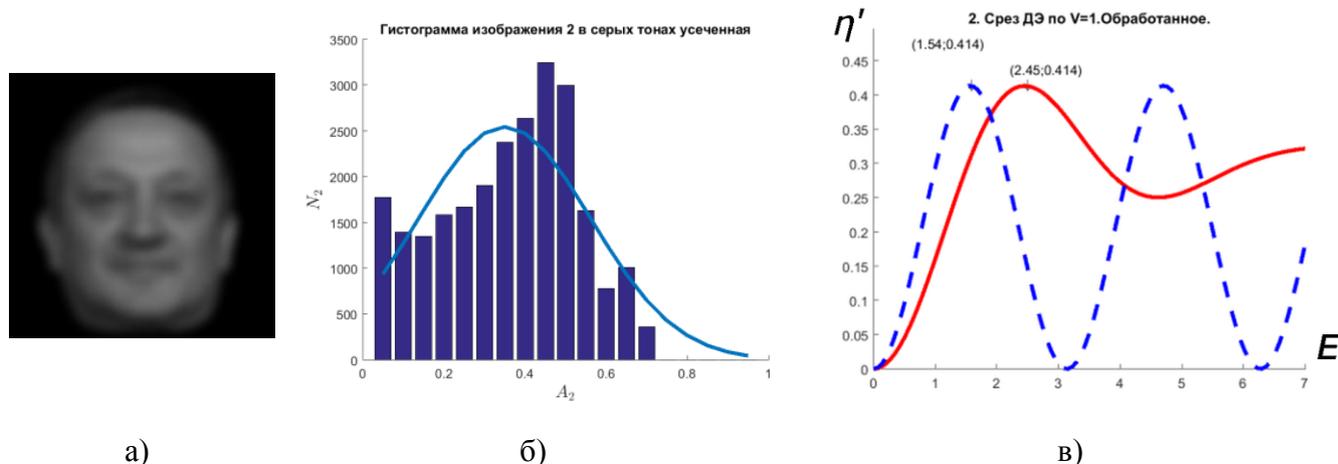


Рисунок 3.25 – а) портретное изображение, расфокусированное на 1 % ;  
 б) гистограмма статистического распределения яркости слабо расфокусированного портретного изображения, дисперсия отклонения от гауссова пучка 27,5 % ;  
 в) дифракционная эффективность голограммы слабо расфокусированного портретного изображения (сплошная кривая) и дифракционная эффективность равномерной по полю, когельниковской голограммы, уменьшенная по амплитуде для удобства сравнения (пунктирная кривая). Полученный формфактор  $\Psi_3=1,54/2,45=0,63$

Следует отметить, что при большей в 2,5 раза расфокусировке (рисунок 3.26) статистическое распределение яркости (рисунок 3.26б) ещё больше искажается (его отклонение от гаусса уже 45,2 %), но несмотря на это, величина формфактора ( $\Psi_4=1,54/2,48=0,62$ ) остаётся практически неизменной.

Это объясняется тем, что при вычислении формфактора значительное влияние оказывает синусоидальная нелинейность в (3.19), на аргумент которой и влияют локальные значения яркости в отличие от их линейного, пропорционального учёта в статистическом распределении яркости. Таким образом, можно сделать вывод, что формфактор, как некоторый аналог интеграла движения, является более стабильным к дефокусировкам, чем статистическое распределение яркости.

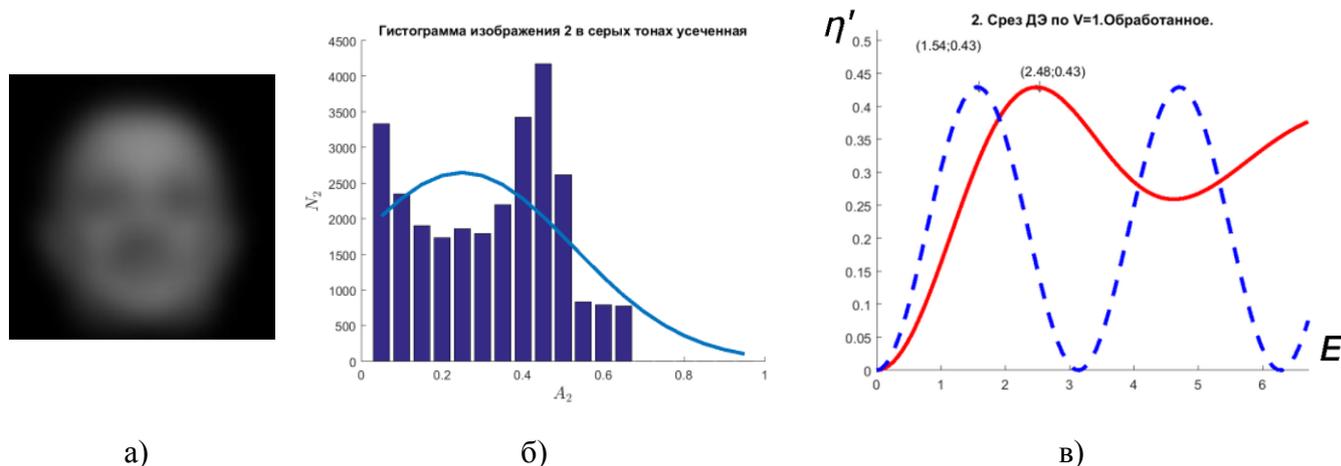


Рисунок 3.26 – а) портретное изображение, расфокусированное на 10 %;  
 б) гистограмма статистического распределения яркости значительно расфокусированного портретного изображения, дисперсия отклонения от гауссового пучка 45,2 %;  
 в) дифракционная эффективность голограммы такого расфокусированного портретного изображения (сплошная кривая) и дифракционная эффективность равномерной по полю, когельниковской голограммы, уменьшенная по амплитуде для удобства сравнения (пунктирная кривая). Полученный формфактор  $\Psi_4=1,54/2,48=0,62$

Другим случаем изменения распределения яркости объектного пучка в голографии является удаление объекта от плоскости голограммы, на поверхность которой в этом случае попадает не само изображение объекта голографирования, а его преобразование Френеля. На рисунках 3.27, 3.28 приведены изображения, соответствующие преобразованиям Френеля в ближней и дальней зонах дифракции (расстояния до голограммы отличаются в 1,5 раза).

Видно, что гистограмма яркости уже сильно отличается от гауссовой формы, а величина формфактора остаётся близкой к формфактору исходного изображения.

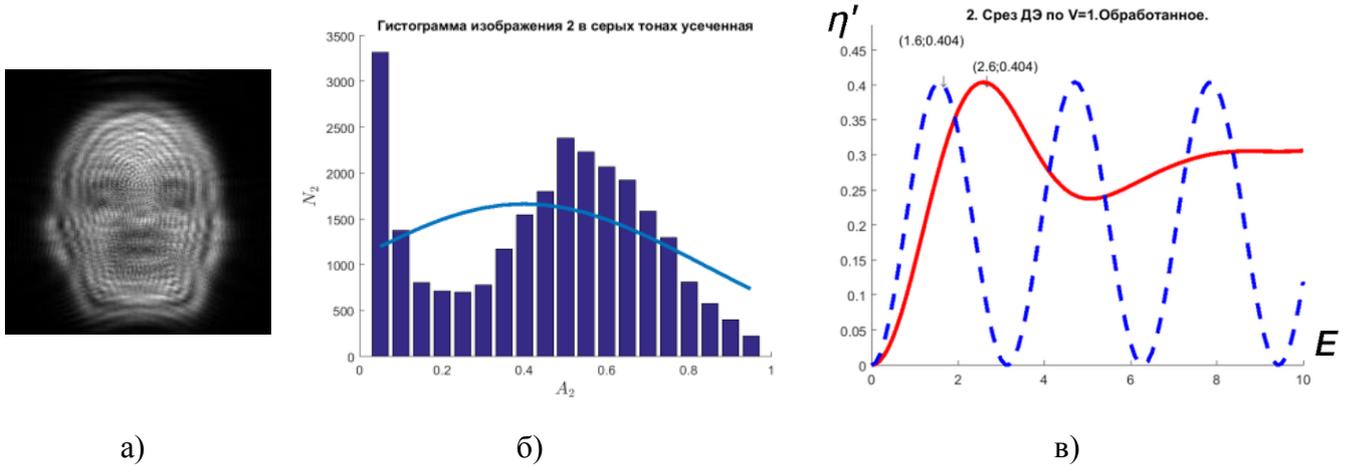


Рисунок 3.27 – а) изображение в ближней зоне дифракции; б) соответствующая ему гистограмма распределения яркости, дисперсия отклонения от гаусса 47,9 %; в) графики средней дифракционной эффективности по (3.18) при  $V=1$  – сплошная кривая и когельниковское значение дифракционной эффективности по (3.16) при  $f(EV)=EV$  для равномерного пучка (пунктирная кривая). Полученный формфактор  $\Psi_5=1,6/2,6=0,61$

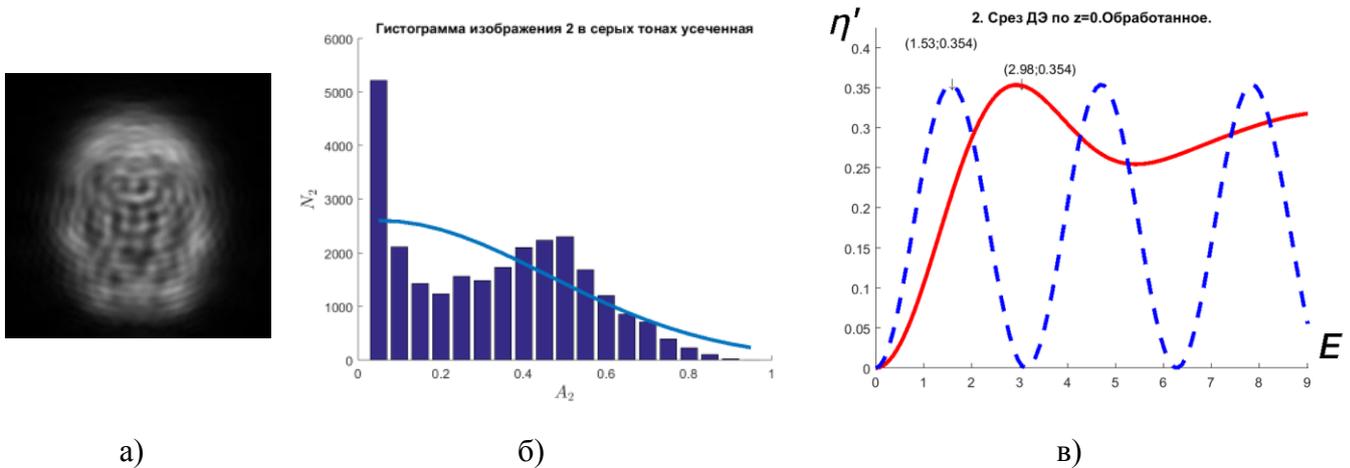


Рисунок 3.28 – а) изображение в дальней зоне дифракции; б) соответствующая ему гистограмма распределения яркости, дисперсия отклонения от гаусса 48,4 %; в) графики средней дифракционной эффективности по (3.18) при  $V=1$  – сплошная кривая и когельниковское значение дифракционной эффективности по (3.16) при  $f(EV)=EV$  для равномерного пучка (пунктирная кривая). Полученный формфактор  $\Psi_5=1,53/2,98=0,51$

Причём, с удалением от объекта голографирования, сначала формфактор возрастает почти на 20 % (рисунок 3.27), а затем снова приходит почти к прежнему значению (рисунок 3.24, 3.28).

### ***Выводы параграфа 3.3***

Как при записи голограммы гауссовыми пучками, так и при записи пучками, которые мы называем сложными, дефокусировка записываемого на голограмму изображения, а также его дифракционное размытие слабо влияют на величину максимально достижимой ДЭ, а, следовательно и энтропии голограммы.

Можно считать, что все вышеприведённые методы модификации записываемых на голограмму изображений не дают существенного изменения средней ДЭ голограмм, а также практически не влияют на величину оптимальной экспозиции, что ещё раз подтверждает устойчивый характер параметра, названного в параграфе 3.1 формфактором. Таким образом, можно считать, что формфактор как для голограмм гауссовых пучков, так и для голограмм сложных, многофакторных изображений, имеет некоторое сходство с «интегралом движения», оставаясь практически постоянным при существенных искажениях записываемого на голограмму изображения.

Для приближённого вычисления энтропии по (3.22) и увеличения оптимальной экспозиции пропорционально  $\Psi$ , характеристика формфактора голограммы сложных изображений, на примере портретных голограмм, записанных в зоне дифракции Френеля, будет выглядеть в виде вектора, как предложено в (3.24), следующим образом:

$$(\Phi; \Psi) = (0, 40; 0, 61), \quad (3.28)$$

а в зоне дифракции Фраунгофера:

$$(\Phi; \Psi) = (0, 35; 0, 51). \quad (3.29)$$

Следовательно, приближённо максимальная удельная энтропия цифровой голограммы с учётом (3.23) и глубиной портретного изображения  $\eta_c/\eta_u=256$  дискрет, будет, согласно (3.22), для зоны дифракции Френеля равна:

$$h \approx -\log_2 \left( \frac{\eta_c}{\eta_{us}} \cdot \Phi \right) = \log_2 \left( \frac{\eta_c}{\eta_{us}} \right) + \log_2 (\Phi) = 6,7, \quad (3.30)$$

а для зоны дифракции Фраунгофера:

$$h \approx -\log_2 \left( \frac{\eta_c}{\eta_{us}} \cdot \Phi \right) = \log_2 \left( \frac{\eta_c}{\eta_{us}} \right) + \log_2 (\Phi) = 6,5, \quad (3.31)$$

что очень близко по величине.

Объяснение стагнации формфактора и энтропии при дефокусировке и дифракции следует рассматривать как сохранение количества информации в дефокусированном и в дифрагированном пучках.

### **Параграф 3.4. Проявление формфактора при нелинейности фотоотклика голографического материала**

При записи голограмм большое внимание уделяется методам увеличения их ДЭ. Принято считать, что она определяется величиной динамического диапазона фотоотклика голографических материалов, на чём и были сосредоточены работы по их созданию [1.52, 1.73, 1.74].

Однако, как было показано выше [3.4, 3.5], использование большого динамического диапазона голографической среды для увеличения ДЭ не всегда возможно, поскольку ДЭ ограничивается влиянием формфактора голограммы. В [1.135, 1.137] для гауссовых пучков были получены ограничения на максимально достижимую  $\eta'(E, V)$ , в зависимости от экспозиции  $E$  и видности интерференционной картины  $V$  объектного и опорного пучков для линейного фотоотклика.

Однако, в (3.18) функция  $f$  описывает в общем случае нелинейную зависимость фотоотклика (для фазовых материалов это фотоиндуцированное изменение показателя преломления) от экспозиции  $E$  и видности  $V$ . В настоящем

параграфе  $f(E, V)$  взята в простом виде как произведение нелинейного фотоотклика  $\beta(E)$  из [1.135, 1.137, 3.5] с постоянной по полю голограммы видностью  $V$  и с экспозицией голограммы  $E$ , производимой гауссовыми пучками:

$$f(E, V) = \beta(E) \cdot E \cdot V. \quad (3.32)$$

Здесь в (3.32) и далее, аналогично [1.135, 1.137], экспозиция  $E$  приводится в нормированных единицах так, что  $E = 1$  изменяет фотоотклик голографического материала, приводя в случае линейного фотоотклика  $\beta(E) = 1$  к росту аргумента под синусом (3.19), равному одному радиану. Таким образом, экспозиция  $\beta(E)E = \pi/2$ , при  $V = 1$  приводит к  $\eta = 100\%$  в соответствии с формулой Когельника [1.66], в которую вырождается (3.19) при  $\Psi f(EV) = EV$ .

Случаи линейной зависимости  $\beta(E)$  подробно рассмотрены в предыдущих параграфах настоящей главы и в [1.135, 1.137]. В настоящем параграфе мы обращаем внимание на случай нелинейного отклика (3.33). Такой отклик, как показано в [3.4, 3.5], наиболее соответствует различным фотополимерам [1.52, 1.73, 1.74] и экспериментально наблюдаемому авторами фотоотклику [1.71] в фазовом объёмном голографическом материале Реоксан [1.52], равно как и многим другим фазовым объёмным голографическим материалам.

$$\beta(E)E = E_0 \left[ 1 - \exp\left(-\alpha \frac{E}{E_0}\right) \right], \quad (3.33)$$

$$\Delta n = \beta(E) \cdot E \cdot V. \quad (3.34)$$

При таком нелинейном фотоотклике для  $E_0 = 1$  и  $\alpha = 0,027$  показатель преломления  $\Delta n \sim \beta(E) \cdot E \cdot V$  голографической дифракционной решётки (рисунок 3.29) растёт с экспозицией очень близко к аналогичной зависимости, наблюдаемой экспериментально в материале Реоксан [1.52, 1.73, 1.74].

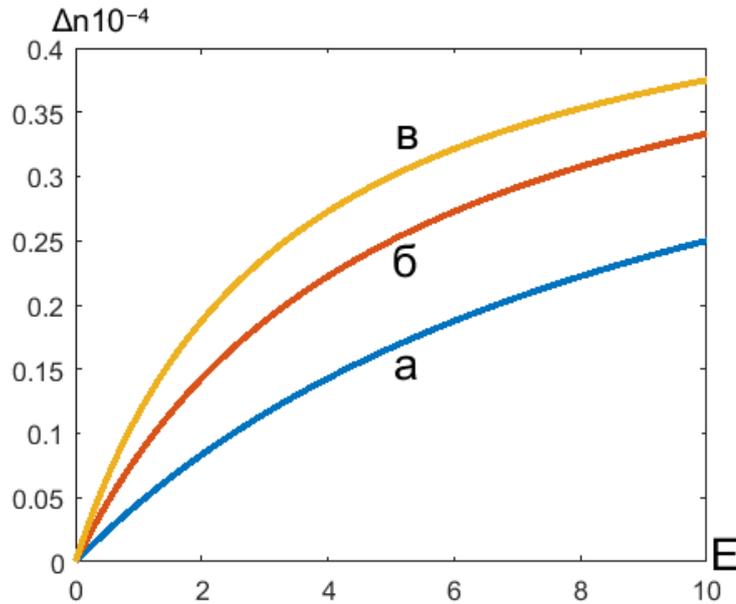


Рисунок 3.29 – Зависимость фотоиндуцированного показателя преломления  $\Delta n$  от нормированной экспозиции  $E$  для рассмотренной ниже видности  $V = 0,95$  при  $E_0=1$  и  $\alpha=0,027$ (а);  $0,038$ (б);  $0,044$ (в)

### 3.4.1. Численный эксперимент

На графиках рисунков 3.30–3.33 показаны зависимости средней  $\eta'(E)$  голограмм гауссовых пучков, рассчитанные по (3.18). Они приведены в виде сплошной линии. На них наложены пунктирные графики  $\eta(E)$ , рассчитанные по (3.19) для случая  $\Psi\beta(E)EV = EV$ ,  $\Psi = 1$ , т. е. классической аналоговой голограммы, рассчитанной по формуле Когельника [1.66]. Пунктирные графики уменьшены по амплитуде (ось ординат) так, чтобы их максимумы были равны максимумам сплошных кривых  $\Phi$  на участке экспозиций от  $E = 0$  до  $E = 10$ . Это сделано для удобства сравнения. Видно, что первые локальные максимумы  $\eta'(E)$  смещены вправо от максимумов  $\eta(E)$ . Отношение величины экспозиции, при которой  $\eta(E)$  достигает максимума к величине экспозиции, при которой  $\eta'(E)$  максимальна, наряду с величиной максимально достижимой  $\eta'$  характеризует формфактор голограммы. Форма голограммы, в данном случае гауссова, приводит к не одновременному достижению в различных участках голографической среды условий  $\beta(E) \cdot E \cdot V = \pi/2$ .

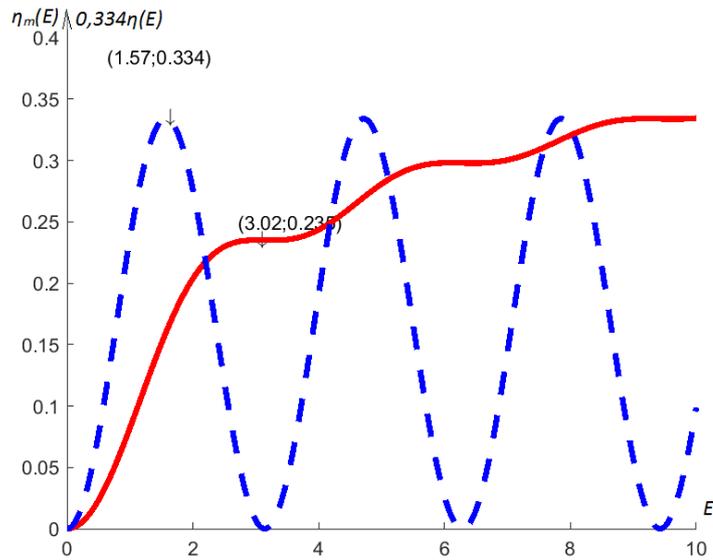


Рисунок 3.30 – Зависимость  $\eta'(E)$  – сплошная кривая и нормированная на её максимум  $\eta(E)$  – пунктирная кривая для линейного отклика  $\alpha_1 = 0$  в случае гауссовых пучков

Формфактор  $\Psi$  и максимальное значение ДЭ, в этом случае, будут равны  $\Psi \approx 0,52$ ,  $\Phi \approx 0,23$ .

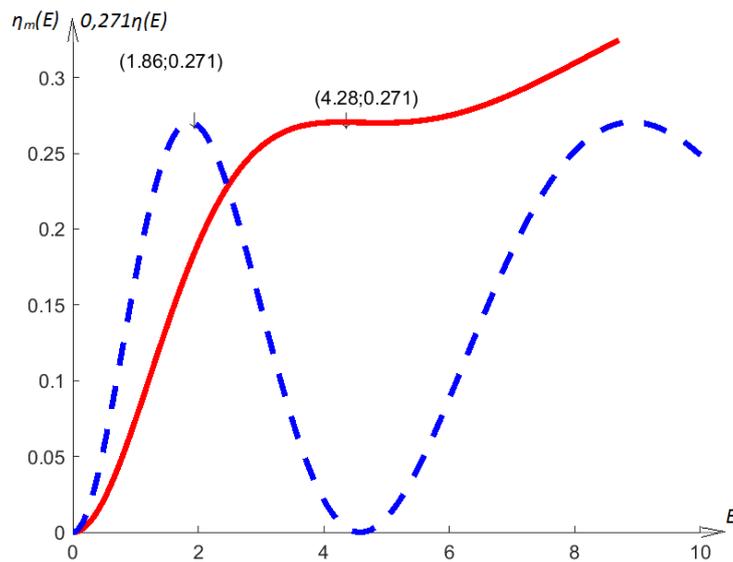


Рисунок 3.31 – Зависимость  $\eta'(E)$  – сплошная кривая и нормированная на её максимум  $\eta(E)$  – пунктирная кривая для нелинейного отклика  $\alpha_1 = 0,027$  в случае гауссовых пучков

Формфактор  $\Psi$  при этом несколько уменьшается, а максимальное значение ДЭ немного возрастает ( $\Psi \approx 0,43$ ,  $\Phi \approx 0,27$ ).

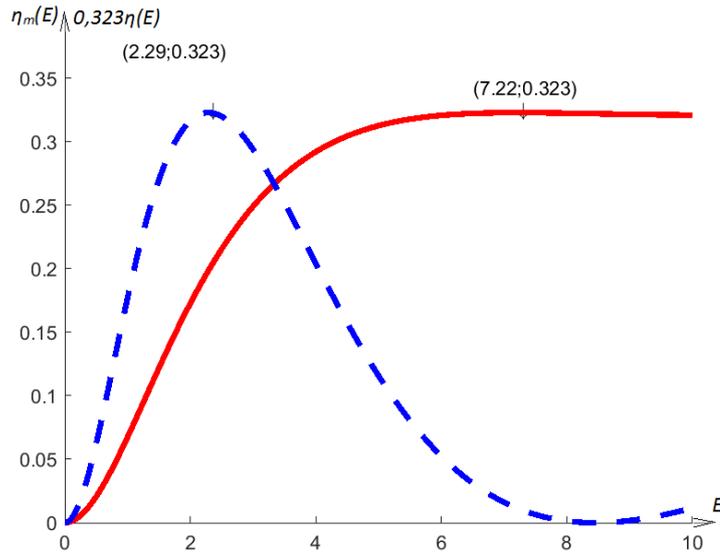


Рисунок 3.32 – Зависимость  $\eta'(E)$  – сплошная кривая и нормированная на её максимум  $\eta(E)$  – пунктирная кривая для нелинейного отклика  $\alpha = 0,044$  в случае гауссовых пучков

Формфактор  $\Psi$  при этом ещё уменьшается, а максимальное значение ДЭ снова растёт ( $\Psi \approx 0,32$ ,  $\Phi \approx 0,32$ ).

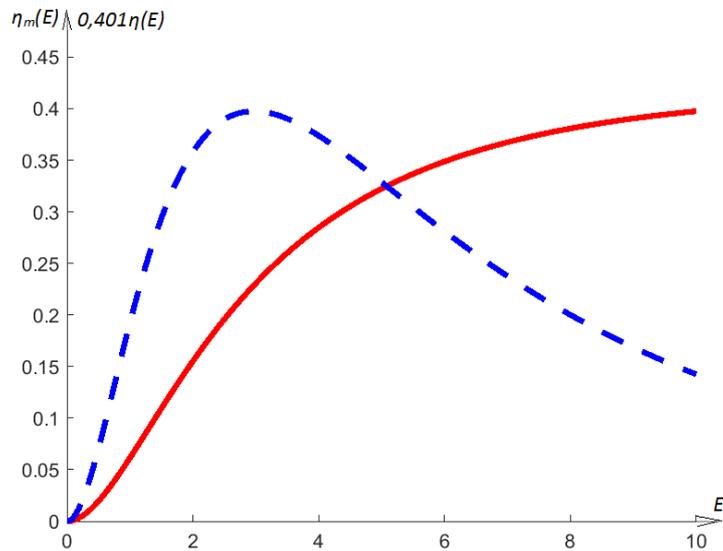


Рисунок 3.33 – Зависимость  $\eta'(E)$  – сплошная кривая и нормированная на её максимум  $\eta(E)$  – пунктирная кривая для нелинейного отклика  $\alpha_1 = 0,057$ , и гауссовых пучков

Здесь видны те же тенденции: формфактор  $\Psi$  снова уменьшается, а максимальное значение ДЭ снова немного возрастает ( $\Psi \approx 0,25$ ,  $\Phi \approx 0,39$ ).

Из сравнения графиков рисунков 3.30–3.33 видно, что при нелинейном отклике голографического материала максимум ДЭ достигается гораздо позже, что означает большее расходование динамического диапазона фотоматериала, необходимое для оптимальной экспозиции. Это известный минус, но есть и плюс, который проявляется именно за счёт наличия неоднородности яркости записывающих голограмму пучков, т. е. из-за наличия формфактора. А именно: после достижения максимума ДЭ наиболее яркими частями записывающих пучков, согласно (3.19), их локальная ДЭ падает [3.4, 3.5, 1.137]. Однако падает не так быстро, как рассмотрено в [1.135, 1.137], ввиду замедления реакции фотоматериала на экспозицию в силу нелинейности фотоотклика. Таким образом, средняя ДЭ (3.18) становится выше, чем в случае линейного фотоотклика.

Примечание: на рисунках 3.30–3.32 максимумы находятся в пределах изменения приведённых экспозиций и поэтому были вычислены программно, а на рисунке 3.33 оценены вручную, что не меняет характера полученных зависимостей.

### ***Выводы параграфа 3.4***

Как говорилось выше, рисунок 3.31 соответствует нелинейности фотоотклика, близкой к нелинейности реального голографического материала Реоксан и соответствующая величина максимума ДЭ на 15 % выше, чем для случая линейного фотоотклика. Следует отметить, что для достижения этой ДЭ требуется в 1,42 раза большая экспозиция, а, значит, и используется пропорционально больший динамический диапазон фотоотклика голографического материала.

Одновременно с увеличением максимально достижимой ДЭ, рост параметра  $\Phi$  увеличивает и максимально достижимую энтропию голограмм (3.22).

### Параграф 3.5. Формфактор и временная когерентность лазерного излучения

В этом параграфе продолжено исследование формфактора голограмм с распространением полученных ранее результатов на временную когерентность записывающего голограмму лазера. Для этого используется классическое определение степени когерентности, из которого выделяется временная компонента и её влияние на видность интерференционной картины, формирующей голограмму. Показано, что аналогично пространственному формфактору, существуют частотные ограничения на максимально достижимую дифракционную эффективность голограмм, которые проявляются через длину когерентности излучения лазера.

В предыдущих параграфах главы 3 и в [1.135, 1.137, 3.4] были сформулированы требования к записывающему голограмму излучению и найден параметр, ограничивающий максимально достижимую ДЭ, названный формфактором. Однако в этих работах рассматривалась только поперечная (в сечении пучка) неравномерность экспозиции и видности интерференционной структуры, формируемой при записи голограммы. Изменения видности такой интерференционной структуры вдоль продольной координаты, определяемые технической шириной линии излучения, также влияют на характеристики голограммы.

Для оценки влияния ширины линии излучения на предельно достижимые характеристики голограмм используем приведённые в [1.135, 1.137] классические выражения для локального значения видности интерференционных полос (3.7, 3.9). Они используются в [1.135, 1.137] при определении средней ДЭ голограммы по её полю. Если учесть, что кроме пространственной когерентности (при  $\tau=0$ ), выражение (3.7) описывает и временную когерентность (при  $p_1=p_2$ ), то следует [1.137] в выражении (3.18) для средней  $\eta'$  заменить  $V(x, y)$  на  $V(x, y, z)$  [1.140], см. (3.35):

$$\eta' = \left( \frac{1}{s} \right) \int \sin^2 \{ \beta(E) E(x, y) V(x, y, z) \} dx dy. \quad (3.35)$$

Нас будет интересовать зависимость  $\eta'(z)$ , т. е. изменение ДЭ вдоль глубины отображаемого пространства, поскольку видность изменяется вдоль  $z$  в силу ограниченности технической ширины линии излучения используемого лазера. Поэтому разные дифракционные решётки, составляющие голограмму, вносят разный вклад в восстановление голограммой по-разному удалённых частей объекта.

Строго говоря,  $z=0$  соответствует поверхности с нулевой разностью хода между объектным и опорным пучками. Не вдаваясь в подробности разных схем голографирования, здесь будем считать эту поверхность расположенной в плоскости голограммы, поскольку для больших длин когерентности этого, практически, всегда можно добиться. Также без ограничения общности, в приводимых ниже расчётах будем рассматривать случай основной моды генерации лазера  $TEM_{00}$  и считать  $V$  не меняющейся по полю  $(x, y)$ , а только вдоль  $(z)$ :

$$V(z) = V_0 \exp(-z/l_{\text{ког.}}). \quad (3.36)$$

Здесь  $V_0$  – видность записываемой голограмму интерференционной картины, образованной объектным и опорным пучками в плоскости голограммы, а  $z$  – глубина записываемого изображения, нормированная к длине когерентности излучения лазера  $l_{\text{ког.}}$ . Таким образом, длина когерентности излучения лазера, используемого для записи голограмм, здесь определена как расстояние вдоль глубины голографируемого пространства, на котором  $V(z)$  спадает от единицы до  $1/e$ .

Экспозиция голограммы производится по-прежнему гауссовыми пучками  $E(x, y)$ , а  $\beta(E)$  также имеет насыщение при больших экспозициях, как в параграфе 3.4 и в [1.135, 3.4, 3.29]. В этом случае выражение (3.35) переходит в (3.37):

$$\eta' = \left(\frac{1}{s}\right) \int \sin^2 \{ \beta(E) E(x, y) V(z) \} dx dy . \quad (3.37)$$

Полученное в параграфе 3.1 [1.135, 1.137] выражение для ДЭ с учётом формфактора  $\Psi$  при этом трансформируется в (3.38) с  $\Phi$ , зависящим от  $z$ :

$$\eta'(z) = \Phi(z) \sin^2 \{ \Psi(z) E_{opt.} \} , \quad (3.38)$$

здесь  $E_{opt.}$  – оптимальная экспозиция в центре голограммы при  $z=0$ , и  $V(0)=1$ . Величина формфактора  $\Psi$ , при которой ДЭ достигает первого максимума, равного  $\Phi$ , вычисляется по (3.39):

$$\Psi(z) = \pi/2 E_{opt.} . \quad (3.39)$$

Здесь и далее, аналогично предыдущим параграфам главы 3 и в соответствии [1.135, 1.137], экспозиция  $E$  приводится в нормированных единицах так, что  $E=1$  изменяет фотоотклик голографического материала, приводя к набегу фазы, равному одному радиану. Таким образом, для равномерно по площади экспонирующих голограммы пучков, экспозиция  $E=\pi/2$ , при  $\beta=V=1$  приводит к  $\eta=100\%$  в соответствии с формулой Когельника [1.66]. Полученные ниже значения формфактора указывают на то, какая часть динамического диапазона фотоотклика будет эффективно использована. Так, согласно (3.38), если при записи голограммы плоского зеркала, расположенного вплотную к фотоматериалу, равномерными по площади голограммы пучками для достижения максимальной дифракционной эффективности используется диапазон фотоотклика  $\Delta n$ , то голограмма гауссовых пучков использует для достижения максимума  $\Delta n/\Psi$ , что реально увеличивает требования к диапазону изменения фотоотклика голографического материала.

### 3.5.1. Численный эксперимент

В численных примерах расчёта  $\eta'(z)$  по (3.37) приводятся два варианта: линейный  $\{\beta=1\}$  для «идеального» голографического материала и нелинейный (3.33), что при  $\alpha=0,027$  хорошо аппроксимирует нелинейность (3.33) фотоотклика голографического материала Реоксан.

Значение средней ДЭ голограммы  $\eta'$  для гауссовых пучков (рисунок 3.34) получается аналогично [1.135, 1.137] прямым численным интегрированием (3.37). Асимметрия по осям  $E$  и  $z$  связана с падением видности (3.36) при удалении вдоль  $z$ . Причём на рисунке 3.34а она заметно сильнее, чем на рисунке 3.34б. Это связано с подавлением второго и последующих максимумов в подынтегральном выражении (3.37) нелинейной зависимостью  $\beta(E)$ . Интересно, что максимальные значения  $\eta'(E, z)$  в приведённых на рисунке 3.34 диапазонах  $E$  и  $z$  в случае нелинейного фотоотклика голографического материала достигают существенно больших (почти на 20 %) значений, чем в случае линейного фотоотклика, что также согласуется с результатами, полученными в предыдущем параграфе 3.4.

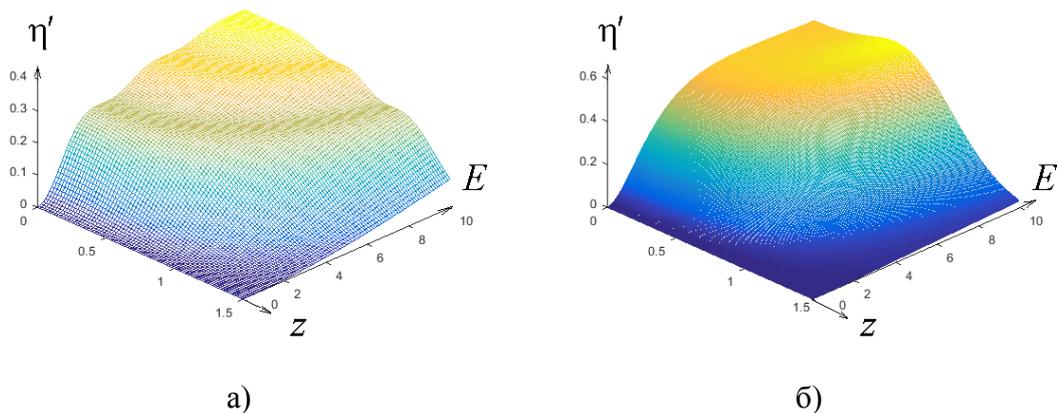


Рисунок 3.34 – Двумерный график зависимости средней ДЭ  $\eta'$  от нормированной величины экспозиции  $E$  гауссовых пучков и нормированной на  $l_{\text{ког}}$  глубины  $z$ , записываемого на голограмму изображения: а) при линейном фотоотклике  $\beta = \text{const}$  и б) при нелинейном

Беря на рисунке 3.34 сечения  $\eta'(E)$  для разных  $(z)$ , получаем графики зависимости средней по полю голограммы  $(x, y)$  ДЭ (рисунок 3.35), аналогично [1.135, 1.140]. Из сравнения рисунка 3.35а и 3.35б видно, как нелинейность

фотоотклика голографического материала ( $\beta \neq \text{const}$ ) подавляет проявление вторичные (и далее больших порядков) максимумы  $\eta'(E)$ , стагнируя рост ДЭ и, практически, не давая определить момент окончания экспозиции по моменту достижения максимума  $\eta'(E)$ . Это затрудняет определение оптимальной экспозиции голограммы по положению максимума  $\eta'(E)$  так, как это положено в основу ТУ [1.81] на голографический материал в соответствии с формулой Когельника [1.66].

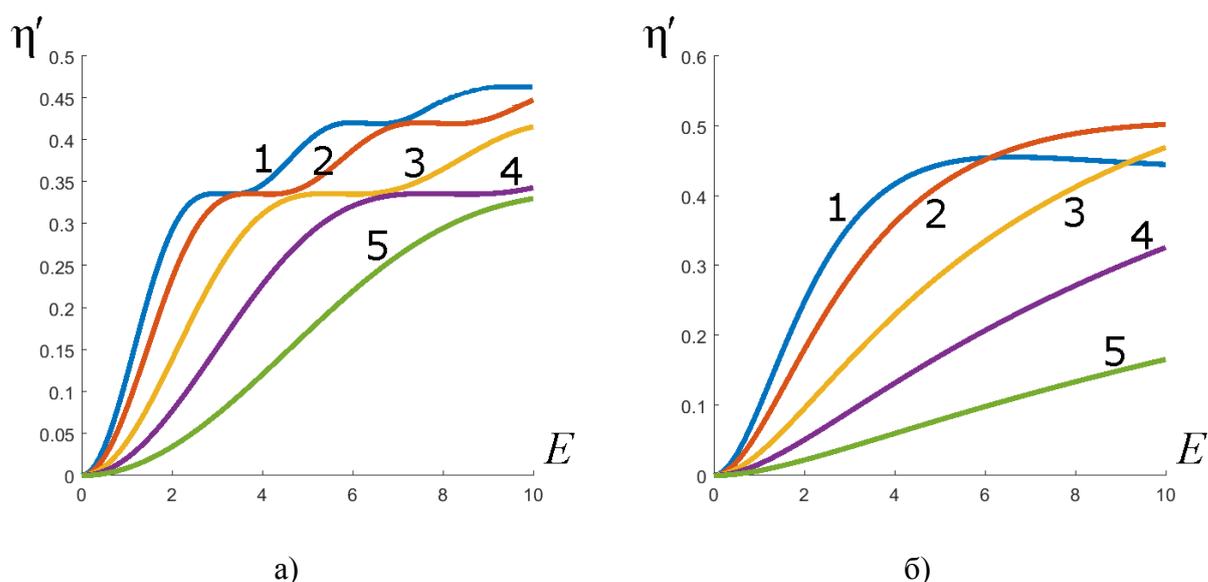


Рисунок 3.35 – Графики средней по сечению  $(x, y)$  ДЭ  $\eta'(E)$  в зависимости от нормированной величины экспозиции для голограммы, записанной гауссовыми пучками:

а) для линейного фотоотклика и б) для нелинейного

(1 – при  $z/l_{\text{ког}}=0$ ; 2 –  $z/l_{\text{ког}}=0,5$ ; 3 –  $z/l_{\text{ког}}=0,8$ ; 4 –  $z/l_{\text{ког}}=1,0$  и 5 –  $z/l_{\text{ког}}=1,2$ )

На рисунке 3.35а видно, что при  $z=0$  средняя по полю голограммы ДЭ  $\eta'(E)$  достигает первого максимума при  $E_{\text{опт.}}=2,8$ , что полностью соответствует полученным в [1.135, 1.140] результатам, поскольку при  $V=1$  и  $\beta=1$  согласно (3.38),  $E_{\text{опт.}}=(\pi/2\Psi)=(\pi/(2 \cdot 0,56)) \approx 2,8$ . Формфактор  $\Psi=0,56$ , сдвигающий оптимальную экспозицию в сторону увеличения  $E$ , аналогичен полученному в параграфе 3.1. Однако далее, с ростом  $(z)$ , значения оптимальной экспозиции  $E_{\text{опт.}}$ , при которой ДЭ  $\eta'(E)$  достигает первого максимума, всё увеличиваются, уменьшая  $\Psi$ .

Действительно на расстоянии  $z/l_{\text{коз.}}=1$  первый максимум появляется для линейного фотоотклика (рисунок 3.35а) уже при  $E \approx 6,5$ , что приводит к значительно большему влиянию формфактора, уменьшившемуся до  $\Psi \approx 0,24$ . А для нелинейного фотоотклика (рисунок 3.35б) при тех же  $z/l_{\text{коз.}}=1$  оптимальная экспозиция  $E$  увеличивается более чем до 10, что соответствует  $\Psi \approx 0,15$ .

Также на рисунке 3.36а для каждого  $z$  есть свой участок, где  $\eta'(z/l_{\text{коз.}})$  выходит на область стагнации. Этот участок всегда следует за первым максимумом, что препятствует установлению оптимального значения экспозиции. На рисунке 3.36б эта область стагнации превращается в слабо спадающий участок кривой, также затрудняющий поиск оптимальной экспозиции из-за этого слишком слабого падения  $\eta'(z/l_{\text{коз.}})$ .

Таким образом, записывая голограммы с высокой эффективностью восстановленного изображения на удалении от плоскости нулевой разности хода объектного и опорного пучков, где величина формфактора снижается, мы вынуждены допускать значительную переэкспозицию тех голографических решёток, которые отвечают за эффективность в  $z = 0$ , где формфактор максимален. Это вызывает существенный рост шумов дифракции на случайно образованных в процессе записи решётках. В [1.140] даны рекомендации не достигать экспозиции  $E \sim \pi$ , что связано с почти квадратичным ростом слабых «шумовых» решёток на начальном этапе записи в то время, как голографические решётки, отвечающие за изображение, уже приходят к насыщению.

Также беря из массива (рисунок 3.34) для разных  $E$  сечения  $\eta'(z)$ , получаем графики зависимости ДЭ соответствующих голографических решёток, отвечающих в голограмме за восстановление удалённых от неё на  $z$  участков восстановленного изображения, что можно называть ДЭ глубины восстанавливаемого объекта или восстанавливаемого пространства (рисунок 3.36).

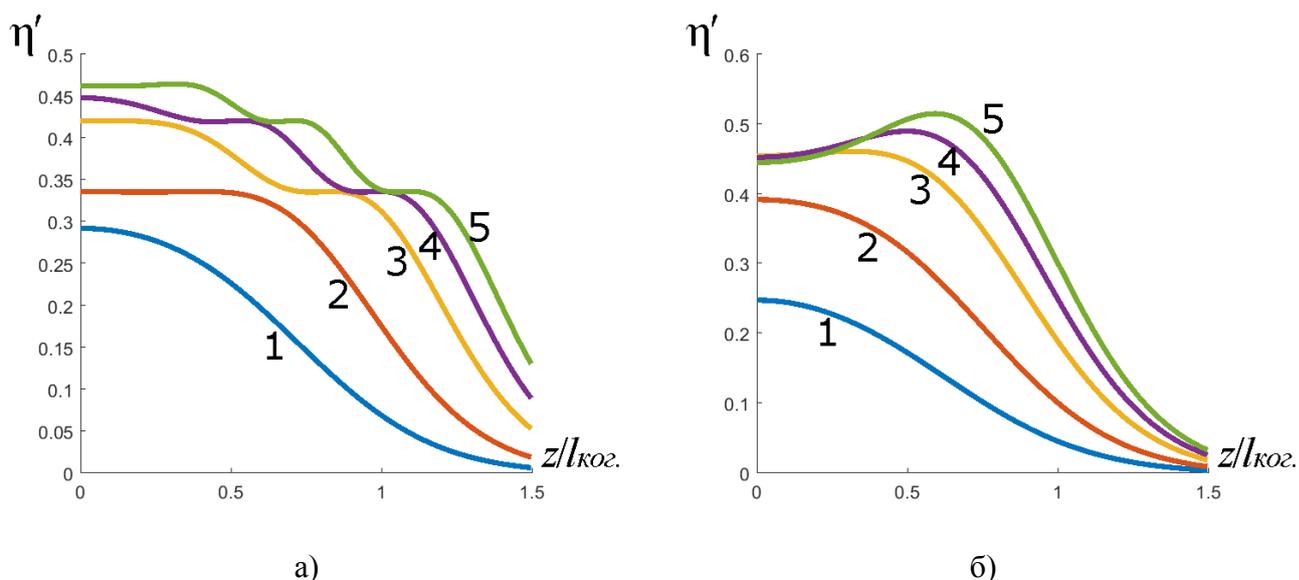


Рисунок 3.36 – Графики средней по сечению  $(x, y)$  ДЭ  $\eta'(z)$  по глубине записываемого изображения для голограммы, записанной гауссовыми пучками а) для линейного фотоотклика и б) нелинейного при нормированной величине экспозиции  
(1 –  $E=2$ ; 2 –  $E=3,5$ ; 3 –  $E=6$ ; 4 –  $E=8$  и 5 –  $E=10$ )

Видно, что при малых экспозициях ( $E=2$ ), когда аргумент под синусом в (3.37) меньше  $\pi/2$ ,  $\eta'(z)$  спадает вдоль  $z$  почти по гауссу и растёт с экспозицией  $E$ . При больших значениях экспозиции сначала происходит насыщение, подобное рассмотренному в [1.135], но затем (рисунок 3.36а) достигнутый максимум перестаёт расти и сдвигается вдоль  $z$  в сторону удаления от голограммы. Это говорит о том, что яркость восстановленного голограммой объекта сначала достигает максимума в близко к голограмме расположенной области, а затем подрастает яркость и более удалённых по  $z$  частей изображения. Практическое значение имеет тот факт, что максимум  $\eta'(z)$  стагнируется вблизи некоторой константы  $\eta'$ , которая с увеличением экспозиции движется в сторону возрастания  $z$ . Второй и третий максимумы ведут себя также.

Одновременно вблизи голограммы экспозиция при большой видности уже приводит к росту аргумента под синусом в (3.37), который может превышать рекомендуемое значение  $E \sim \pi$ . Интересно, что в случае нелинейного отклика фотоматериала (рисунок 3.36б),  $\eta'(z=0)$  уже не растёт с увеличением  $E$ , как на рисунке 3.36а, а даже немного спадает по сравнению с максимумом, находящимся

на некотором удалении по  $z$ . Это вызвано влиянием нелинейности фотоотклика, а именно: когда дифракционные решётки, отвечающие за восстановление удалённой части объекта, обеспечивают максимум дифракционной эффективности, решётки для  $z=0$ , хотя уже и переросли первый максимум и могли бы, как на рисунке 3.35а, давать вклад во второй, но подавляются нелинейностью и не обеспечивают появление второго максимума (рисунок 3.35б). Как видно (для линейного фотоотклика при  $E \leq 3,5$ , а для нелинейного при  $E \leq 6$ ), область стагнации, на которую выходит  $\eta'(z)$  лежит примерно от  $z=0$  до  $z=0,5$ . Это говорит о том, что при записи глубоких объектов можно рекомендовать придерживаться экспозиций, не превышающих  $E=3,5$  и при этом получать практически одинаковую ДЭ по всей глубине от  $z=0$  до  $z=(1/2) l_{\text{коз}}$ , одновременно не давая значительно вырасти шумовым решёткам. Именно эффект стагнации ДЭ облегчает оценки энтропии таких голограмм.

Формфактор, необходимый для расчётов по (3.38), при этом значительно снижается  $\Psi \approx 0,44$  для линейного фотоотклика и  $\Psi \approx 0,26$  для нелинейного.

Исследуя  $\eta'(z, E)$ , видим, что из полученных графиков затруднительно традиционными методами (по максимуму  $\eta'$ ) на практике определять оптимальную экспозицию из-за больших участков слабо меняющихся  $\eta'(z, E)$ . Более того, при реальных измерениях ДЭ голограмм обычно не выделяют ближнюю и дальнюю зоны восстановленного голограммой изображения, а меряют среднее по глубине значение  $\eta'$ , что приводит к ещё большим затруднениям при выборе оптимальной экспозиции. Ниже приведены (рисунок 3.37а,б) графики таких усреднённых значений  $\eta'$ , посчитанных (3.39), как среднее значение массива  $\eta'(z', E)$ , взятого из рисунка 3.34 в пределах от  $z=0$  и до конкретных  $z=z'$  в выбранном диапазоне экспозиций  $E$ :

$$\eta''(z') = \int_0^{z'} \eta'(z) dz. \quad (3.40)$$

Графики рисунка 3.37 снова подтверждают, что в случае нелинейного фотоотклика голографического материала абсолютный максимум в заданных

пределах  $z$  и  $E$  заметно больше (почти на 20 %), чем в случае линейного фотоотклика. Однако ещё более важным является сравнительно плоская поверхность того и другого двумерного массива значений  $\eta''(z', E)$ , что убедительно подтверждает вышеприведённое утверждение, что на практике, при выборе оптимальной экспозиции, нельзя полагаться на поиски её максимума, а лучше наблюдать за тем, чтобы не допустить появления заметных голографических шумов (дифракции на посторонних решётках, не относящихся к объекту голографирования).

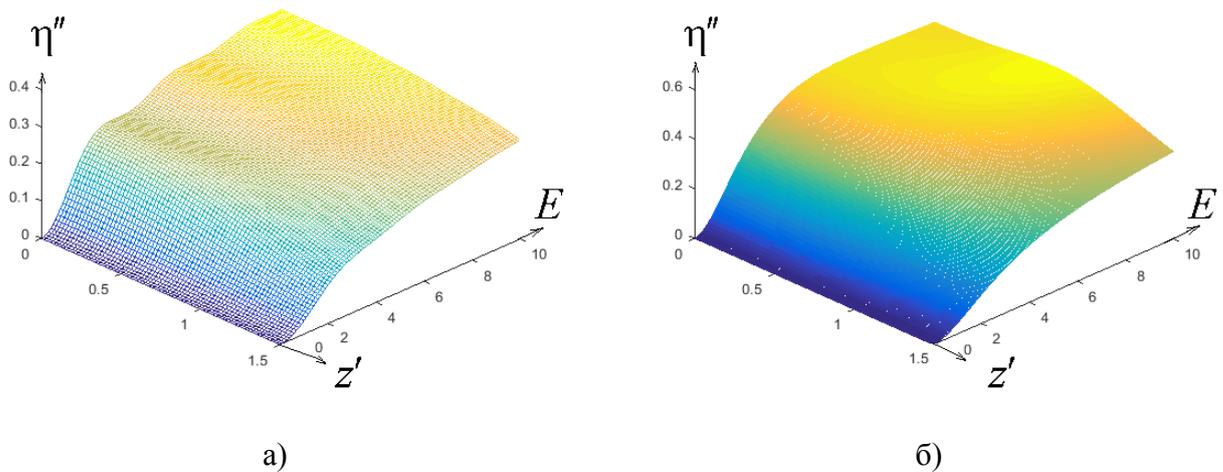


Рисунок 3.37 – Графики  $\eta''(z', E)$ , от нормированной величины экспозиции и нормированной на  $l_{\text{ког.}}$  глубины отображаемого голограммой пространства:  
а) соответствует линейному фотоотклику; б) нелинейному

Кроме того, из графиков рисунка 3.37 видно, что что средняя ДЭ стабилизируется около некоторого значения  $\Phi$ , в зависимости от степени нелинейности фотоотклика находящегося в тех же пределах  $\Phi = 0,4 \div 0,6$ , что и полученные в предыдущих параграфах настоящей главы для пространственной нелинейности экспозиции. Это означает, что также, как и в параграфе 3.1, можно приближённо вычислять энтропию голограммы по формулам (3.21, 3.22). Нелинейная зависимость видности от глубины голографируемой 3D картины также уменьшает энтропию голограммы, поскольку при сохранении уровня шумов число возможных различных состояний сигнала в каждом пикселе голограммы пропорционально уменьшается.

### ***Выводы параграфа 3.5***

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

1) Ранее введённое в параграфе 3.1, показанное в [1.135, 3.4, 3.29] понятие формфактор применимо и для случая исследования влияния временной когерентности (выражающейся через длину когерентности) излучения записывающего голограмму лазера [1.140]. При этом величина формфактора зависит от глубины голографируемого пространства и спадает с удалением от поверхности нулевой разности фаз объектного и опорного пучка, но, как показано для гауссовых пучков, не приводит к снижению средней по полю голограммы ДЭ вплоть до удаления от голограммы на половину длины когерентности. Последнее диктует для создания качественных голограмм (имеющих одинаковую по глубине отображаемого пространства ДЭ) необходимость использования в голографии лазеров, имеющих узкий спектр излучения, т. е. значительную длину когерентности, вдвое превышающую глубину голографируемого пространства.

2) ДЭ, достигая своего первого максимума, не растёт и не уменьшается с ростом экспозиции, а стагнирует на определённом уровне, определяемом сочетанием формфактора и нелинейности фотоотклика голографического материала, а глубина равномерно ярко отображаемого голограммой пространства обратно пропорциональна технической ширине спектра излучения лазера.

3) Отсутствие ярко выраженного максимума ДЭ в зависимости от экспозиции не позволяет определять оптимальную экспозицию  $E_{opt.}[TУ]$  так, как это заложено в ТУ на голографические материалы, а её можно определять корректировкой  $E_{opt.} = E_{opt.}[TУ] / \Psi$ . При этом можно выбирать, какую часть изображения следует сделать ярче, близкую к голограмме ( $\Psi \sim 0,62$ ) или дальнюю

( $\Psi \sim 0,24$ ), но не дальше, чем позволяет техническая ширина спектра лазера, т. е., не на много дальше  $l_{\text{коз.}}/2$ .

4) Показано, что полученные прямым расчётом усреднённые значения  $\eta'(z, E)$  в рассмотренных диапазонах  $E$  и  $z$  для нелинейного фотоотклика голографического материала достигают заметно больших значений, чем в случае линейного фотоотклика. Так проявляется одновременное (перекрёстное) влияние нелинейности и формфактора на максимально достижимую в голограмме ДЭ.

5) Для случая записи голограмм с низкими шумами рассеяния (для чего требуется хороший голографический материал и тщательно отработанная схема записи) на основе полученных в работе результатов можно рекомендовать проводить запись голограмм «глубоких» изображений, вычисляя оптимальную экспозицию по (3.39), где  $\Psi$  на  $z=(l_{\text{коз.}}/2)$  следует выбирать от 0,44 до 0,26 в зависимости от величины нелинейности фотоотклика голографического материала. В этом случае можно получить ДЭ и удельную энтропию сигнала, равномерную по всей глубине восстанавливаемого голограммой изображения.

6) Для выбора голографического материала или для определения требований к материалу при его создании для определения эффективного диапазона фотоотклика голографического материала следует учитывать величину формфактора, поскольку из-за наличия формфактора эффективность использования фотоотклика снижается. Важно, что при этом следует учитывать как пространственный формфактор, так и временной. Для гауссовых пучков вблизи голограммы этот комплексный формфактор позволяет эффективно использовать не более 56 % динамического диапазона фотоотклика, а на удалении, с учётом его нелинейности, только 15 %.

7) Наличие насыщения средней ДЭ (рисунок 3.37), ограничивающей максимальную эффективность также позволяет аналогично (3.30, 3.26) приближённо оценивать энтропию голограмм.

### **Параграф 3.6. Формфактор голограмм в режиме дифракции Рамана – Ната**

В настоящем параграфе 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 решёток, записанных гауссовскими пучками. Значения рассчитанных формфакторов для толстых и тонких гауссовых голограмм даёт основание считать эффект проявления формфактора одинаково применимым и близким по значениям для двух режимов дифракции: Брэгга и Рамана – Ната. Эффект формфактора голограмм был использован при определении динамического диапазона фотоотклика при изучении регистрирующих сред на основе многослойной структуры халькогенидных стеклообразных полупроводников и в азополимерах.

Качество восстановленных голограмм зависит, прежде всего, от яркости восстановленного изображения, определяемого ДЭ голограмм, а их информационная ёмкость от пространственного разрешения и количества разрешимых уровней яркости восстановленного сигнала (3.21, 3.22). Они, в свою очередь, определяются как условиями записи, так и типами голограмм, что, в значительной мере, определяет качество работы голографических приборов и количество обрабатываемой в них информации.

Локальная ДЭ по полю голограмм определяется глубиной модуляции голографической среды, полученной в результате интерференции предметного и опорного пучков. В параграфах 3.1÷3.5 и в работах [1.135–1.138, 3.4, 3.5, 3.30], показана связь величины формфактора и максимально достижимой ДЭ объёмных (по критерию Клейна) голограмм, восстанавливаемых в условиях брэгговской дифракции и предложены методы снижения влияния формфактора и увеличения средней ДЭ голограмм, что также влияет на увеличение энтропии голограммы.

В данном параграфе показана связь величины формфактора и ДЭ голограмм, представляющих собой голографические решётки, полученные в результате взаимодействия двух когерентных плоских волн для тонких фазовых решёток, восстановление на которых происходит в режиме дифракции Рамана – Ната. Таким голограммам характерно наличие многих порядков дифракции [1.62], в отличие от объёмных голограмм, дифракция на которых описывается в режиме Брэгга.

Как отмечено в параграфе 2.2, ДЭ  $m$ -го порядка дифракции ( $\eta_m$ ) для синусоидального фазового профиля голограммы описывается функцией Бесселя [3.31] в виде (2.7, 2.8).

При голографической записи решёток распределение интенсивности излучения, как и в Брэгговских решётках преобразуется в пространственную фазовую модуляцию материала, в частности для ХСП это происходит за счёт изменения поверхностного рельефа, а для азополимеров ещё за счёт вариаций показателя преломления [3.32]. В случае неравномерного распределения интенсивности при экспонировании, глубина фазового профиля решётки будет неравномерной по полю голограммы и изменяется, согласно распределению интенсивности записывающего излучения. Для экспериментального исследования влияния неоднородности освещения на ДЭ в процессе записи рельефных решёток были использованы нерасширенные пучки лазера, интенсивность которых по полю луча хорошо описывается гауссовой функцией. Интерференция таких лучей, аналогично описанному выше, приводит к формированию интерференционной картины с гауссовым распределением глубины модуляции интенсивности. При использовании фоточувствительных регистрирующих сред, таких, как азополимеры и халькогенидные стеклообразные полупроводники, их облучение интерференционной картиной приводит к прямому формированию поверхностного рельефа, соответствующего этой интерференционной картине [3.6, 3.16]. На ней же при восстановлении голограммы происходит дифракция Рамана – Ната, т. о. облучение данных материалов интерференционной картиной

гауссовых пучков приводит к формированию рельефной голографической решётки с гауссовым распределением фазовой глубины профиля.

### ***3.6.1. Моделирование формирования гауссовой решётки и дифракции света***

Дифракция монохроматического света на такой гауссовой рельефной решётке была смоделирована численно [3.17]. Для этого, как и в предыдущих параграфах главы, была смоделирована гауссова решётка с фазовой модуляцией соответствующей функции Гаусса:

$$\Delta\varphi(x, y) = A \exp(-r/l)^2, \quad (3.41)$$

где  $r$  – расстояние от оси решётки ( $r^2 = x^2 + y^2$ ), а  $l$  принято называть шириной или эффективным радиусом гауссова пучка, по убыванию в  $e$  раз:

$$\Delta\varphi(l) = A/e. \quad (3.42)$$

На рисунке 3.38 схематически показана пространственная форма решётки (вдоль координаты  $x$ ) с гауссовым распределением амплитуды фазовой модуляции при эффективном радиусе решётки  $l = 1$ . Как будет показано далее, на величину и кинетику ДЭ влияет и диаметр считывающего излучения. На рисунке 3.38 также обозначены считывающие пучки с относительными радиусами от  $0,1 l$  до  $1,0 l$ .

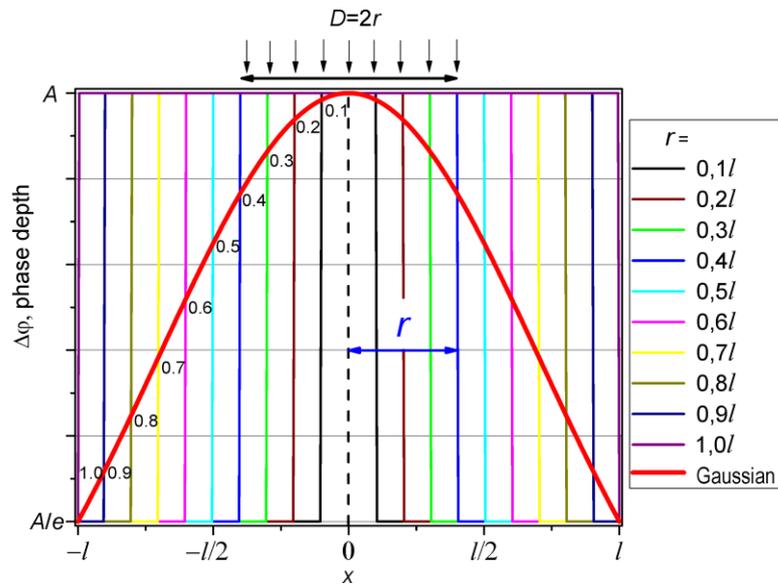


Рисунок 3.38 – Гауссовое распределение амплитуды фазовой глубины решётки при эффективном радиусе решётки равном  $l=A/e$ , и различных относительных радиусах считывающего пучка (от  $0,1 l$  до  $1,0 l$ )

Расчёт локальной ДЭ для гауссовых решёток проводили по формуле (2.7), где  $J_m$  – функция Бесселя первого рода  $m$ -го порядка,  $\Delta\varphi$  – амплитуда фазовой модуляции. Ввиду того, что пространственная фазовая модуляция материала определяется распределением интенсивности излучения, неравномерность экспозиции по полю  $E(x, y)$  приводит к неравномерной фазовой модуляции  $\Delta\varphi(x, y)$ . Фазовая модуляция  $\Delta\varphi(x, y)$  определяется соотношением:

$$\Delta\varphi(x, y) \approx \beta(E) \cdot E(x, y), \quad (3.43)$$

где  $E(x, y)$  – экспозиция, то выражение ДЭ (2.7), в случае линейного фотоотклика, когда  $\beta = \text{const} = 1$  принимает вид:

$$\eta_m(x, y) = J_m^2(E(x, y)). \quad (3.44)$$

Средняя ДЭ порядка  $m$  будет равна:

$$\eta'_m = \left(\frac{1}{s}\right) \iint J_m^2(E(x, y)) dx dy, \quad (3.45)$$

где  $s$  – эффективная площадь голограммы.

Для линейной скорости модуляции фазового рельефа была рассчитана ДЭ для решёток с гауссовым распределением экспозиции. При этом изменяли значение радиуса считывающего луча, что равносильно изменению площади считываемого участка голограммы. На рисунке 3.39 показана кинетика изменения ДЭ гауссовой решётки для разных радиусов считывающего луча  $r$  (от 0,1 до 1,0 к эффективному радиусу голограммы  $l$ ).

Здесь экспозиция  $E$  приводится в нормированных единицах так, что  $E=1$  изменяет фотоотклик голографического материала, приводя к росту аргумента под функцией Бесселя, равному одному радиану.

Величина формфактора  $\Psi$  определяет запаздывание по экспозиции достижения первого максимума ДЭ, по сравнению с равномерной решёткой, и определяется по формуле:

$$\Psi = E_{r_0} / E_r, \quad (3.46)$$

где  $E_{r_0}$  – требуемая экспозиция для достижения максимума ДЭ в первом порядке равномерной (плоской) решётки ( $r_0=0,0 \cdot l$ ),  $E_r$  – требуемая экспозиция для достижения максимума ДЭ в первом порядке гауссовской решётки.

Как видно, в этом случае кривая ДЭ описывается классическим выражением ДЭ тонких решёток, определяемая как квадрат функции Бесселя. При всех других диаметрах считывающего луча неравномерность экспозиции по полю приобретает доминирующее значение. Для всех этих случаев был рассчитан формфактор  $\Psi$ , как отношение экспозиции при достижении максимума ДЭ равномерной решётки, к экспозиции при достижении максимума ДЭ гауссовой решётки.

В таблице 3.1 приведены значения найденного формфактора для разных радиусов считывающего пучка.

Таблица 3.1 – Значения найденного формфактора  $\Psi$  для разных радиусов считывающего пучка  $r_e$  случае поверхностных решёток, работающих в режиме дифракции Рамана – Ната

$r$	0,0 l	0,1 l	0,2 l	0,3 l	0,4 l	0,5 l	0,6 l	0,7 l	0,8 l	0,9 l	1,0 l
$E_r$	1,88	1,88	1,88	1,88	1,98	2,07	2,17	2,26	2,45	2,54	2,79
$\Psi$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,95	0,91	0,87	0,83	0,77	0,74	0,67

Аналогичные расчёты были проведены и для случая объёмных Брэгговских решёток, для которых ДЭ из (3.19) в этом случае определяется как:

$$\eta' = \Phi \sin^2 \{ \Psi f(E) \}. \quad (3.47)$$

В таблице 3.2 приведены для этого случая значения найденного формфактора для разных диаметров считывающего пучка.

Таблица 3.2 – Значения найденного формфактора  $\Psi$  для разных радиусов считывающего пучка  $r$  в случае брэгговских решёток

$r$	0,0 l	0,1 l	0,2 l	0,3 l	0,4 l	0,5 l	0,6 l	0,7 l	0,8 l	0,9 l	1,0 l
$E_r$	1,60	1,60	1,60	1,60	1,70	1,79	1,88	1,98	2,07	2,17	2,26
$\Psi$	1,00	1,00	1,00	1,00	0,94	0,89	0,85	0,81	0,77	0,74	0,71

Видно, что величина формфактора близка для обоих типов дифракции – Брэгга и Рамана – Ната.

На рисунке 3.39а показана кинетика изменения ДЭ решётки Рамана – Ната, при увеличении экспозиции для разных радиусов считывающего пучка (см. рисунок 3.38), а на рисунке 3.39б для объёмной гауссовой решётки.

Видно, что величина первого максимума в обоих случаях сдвигается в сторону увеличения экспозиции примерно одинаково.

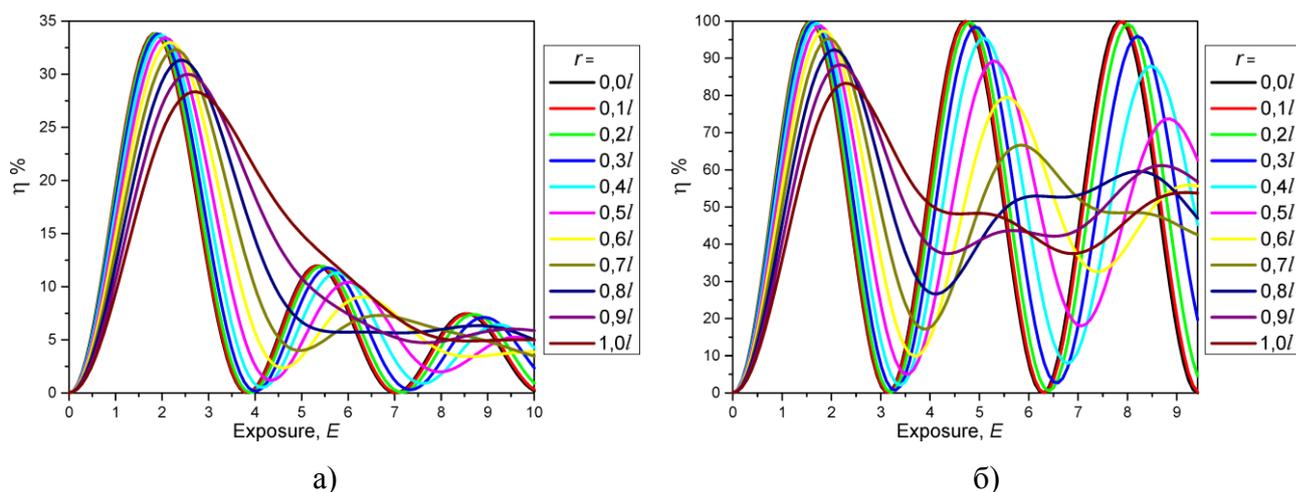


Рисунок 3.39 – Кинетика изменения ДЭ в первом порядке дифракции на гауссовой решётке при увеличении экспозиции для разных диаметров считывающего пучка (от  $r=0,1 l$  до  $1,0 l$ ):

а) для дифракции Рамана – Ната; б) для дифракции Брэгга

Аналогичные расчёты были проведены и для случая считывающего пучка  $r > l$ . На рисунке 3.40 схематически показана пространственная форма решётки (вдоль координаты  $x$ ) с гауссовым распределением амплитуды фазовой модуляции и считывающие пучки с относительными радиусами от  $1 l$  до  $10 l$  ( $r=1 l, 2 l, 3 l, 5 l$  и  $10 l$ ).

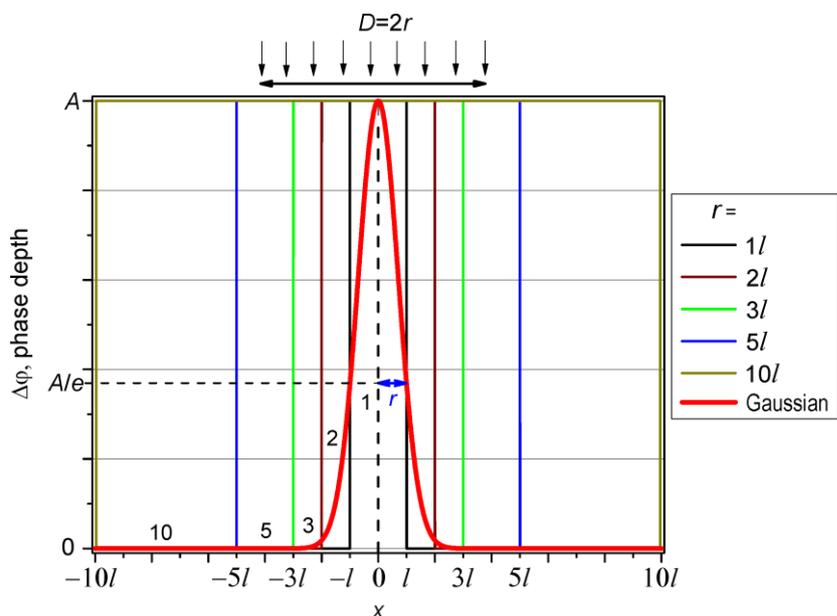


Рисунок 3.40 – Гауссовое распределение амплитуды фазовой глубины решётки и различные относительные радиусы считывающего пучка от  $1l$  до  $10l$

В таблице 3.3 приведены значения найденного формфактора при дифракции Рамана – Ната для разных радиусов считывающего пучка.

Таблица 3.3 – Значения рассчитанного формфактора  $\Psi$  для разных радиусов считывающего пучка, при дифракции Рамана – Ната на тонких решётках

№	1	2	3	4	5	6
$E_r$	1,88	1,73	1,33	1,33	1,33	1,33
$\Psi$	1,00	0,67	0,56	0,56	0,56	0,56
$r$	0l	1l	2l	3l	5l	10l

В таблице 3.4 приведены значения найденного формфактора при дифракции Брэгга для разных радиусов считывающего пучка  $r$ .

Таблица 3.4 – Значения найденного формфактора  $\Psi$  для разных радиусов считывающего пучка  $R$ , для дифракции на объёмной Брэгговской решётке

№	1	2	3	4	5	6
$E_r$	1,60	2,26	2,90	2,90	2,90	2,90
$\Psi$	1,00	0,71	0,55	0,55	0,55	0,55
$r$	~0l	1l	2l	3l	5l	10l

Сравнение полученных зависимостей формфактора для тонких и объёмных решёток приведены на рисунке 3.41.

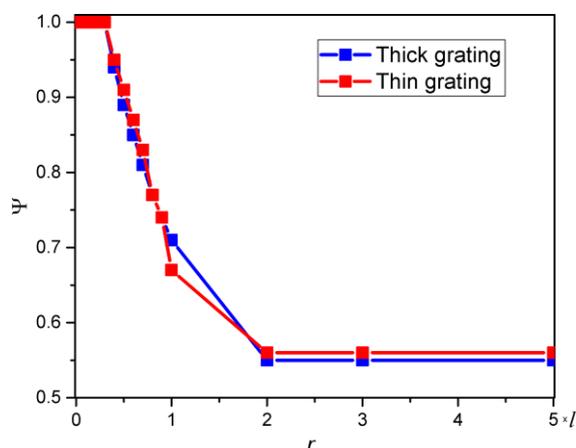


Рисунок 3.41 – Зависимость формфактора  $\Psi$  от радиуса считывающего пучка  $r$  для объёмной и тонкой решётки

Практическое совпадение значений формфактора для объёмных и тонких голограмм с разными (Брэгга и Рамана – Ната) механизмами дифракции позволяет предположить единую природу зависимости ДЭ от неравномерности экспозиции. Это подтверждается очевидной близостью значений формфактора при одинаковом изменении диаметров восстанавливающего пучка. На рисунке 3.41 уверенно просматривается гауссова зависимость  $\Psi(l)$  как для случаев дифракции гауссовых пучков на тонких фазовых решётках, описываемых дифракцией Рамана – Ната, так и для случаев объёмных фазовых решёток, описываемых дифракцией Брэгга.

### ***3.6.2. Экспериментальная проверка результатов. Голографическая запись и восстановление гауссовых решёток***

Совместно с Институтом прикладной физики Молдавской АН, на их оборудовании [1.139] были записаны голографические решётки с периодом 5,0 мкм (200 лин/мм) с помощью двух сходящихся пучков ( $\lambda=532$  нм) по схеме Лейта – Упатниекса. Для записи использовались нерасширенные пучки с гауссовым распределением интенсивности по полю. Запись проводилась на многослойных структурах на основе халькогенидного стеклообразного полупроводника  $As_2S_3-Se$  (толщиной 2940 нм). Экспонирование многослойной структуры формируемой интерференционной картины приводит к формированию поверхностного рельефа, т. е. к формированию рельефно-фазовой дифракционной решётки. ДЭ измерялась в первом дифракционном порядке на пропускание с помощью красного лазера ( $\lambda=650$  нм,  $P=1$  мВт) при перпендикулярном падении считывающего луча. Интенсивность в минус первом и в нулевом дифракционных порядках регистрировалась с помощью кремниевых фотодиодов ФД-24к и системой электронного усиления сигналов на линейном участке характеристики. Радиус записывающих лучей равной интенсивности составлял около 1,0 мм, при

этом диаметр считывающего луча варьировался с помощью фокусирующей линзы в пределах 0,1 – 4,0 мм.

На рисунке 3.42 приведена схема записи рельефно-фазовых решёток, на которой проводилась запись гауссовых пучков на ХСП.

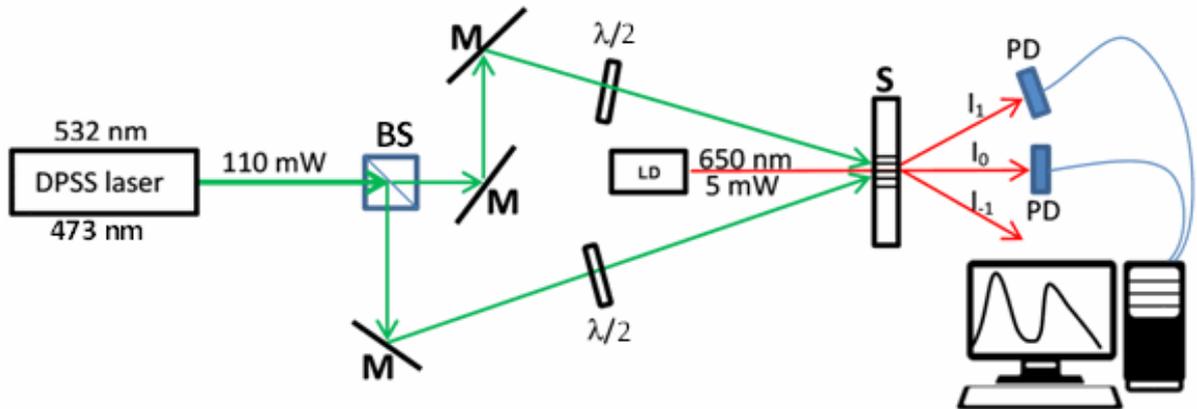


Рисунок 3.42 – Голографическая схема записи рельефно-фазовых решёток.

DPSS laser – одномодовый ( $TEM_{00}$ ) твердотельный лазер с диодной накачкой, BS – поляризационный светоделительный кубик, M – зеркала,  $\lambda/2$  – полуволновые фазовые пластинки, LD – лазерный диод, S – регистрирующая среда, PD – кремниевые фотодиоды

Экспонирование проводилось в области чувствительности используемой регистрирующей среды на длине волны 532 нм. Углы схождения лучей в 6,1 градуса были выбраны для получения интерференционной картины с периодом 5,0 мкм. Полуволновые фазовые пластинки были выставлены таким образом, чтобы интерферирующие лучи имели линейную поляризацию под углом  $+45^\circ$  и  $-45^\circ$  к плоскости падения лучей.

На рисунке 3.43 показаны голограммы гауссовых пучков, записанные на ХСП. С ростом экспозиции видно увеличение площади, занимаемой голограммой и появляющиеся один за другим тёмные концентрические круги, аналогичные приведённым на рисунке 3.11. Они соответствуют нулям ДЭ на кривых кинетики записи голограмм.

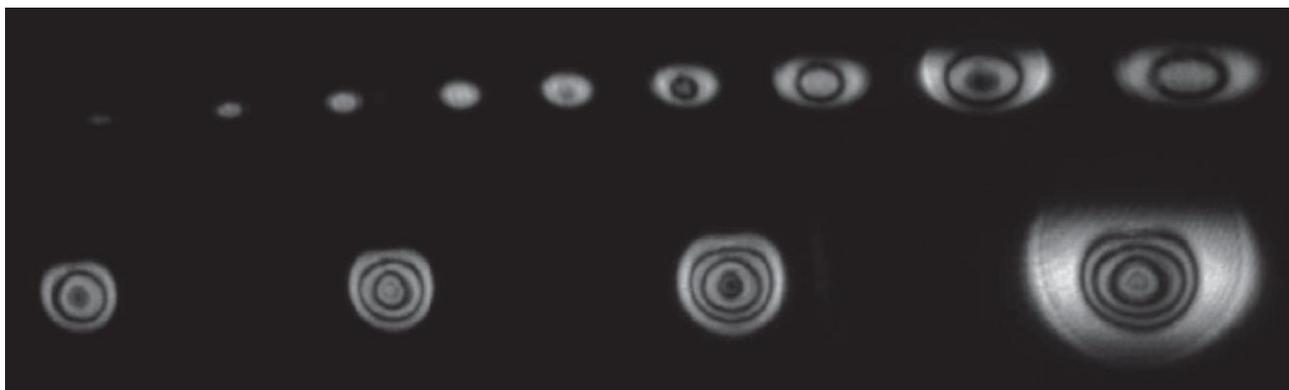


Рисунок 3.43 – Яркость восстановленного голограммой гауссовых пучков с ростом её экспозиции гауссовыми пучками. Хорошо видны кольца нулевой яркости, соответствующие набору фазы  $\Delta\phi$ , соответствующему нулям функции Бесселя (3.44)

На рисунке 3.44 представлена экспериментально определённая кинетика изменения ДЭ решёток при одинаковых условиях записи и при различных диаметрах считывающего луча (см. таблицу 3.5). Также на рисунке 3.44 указана экспозиция при достижении максимума ДЭ для различных радиусов считывающего пучка.

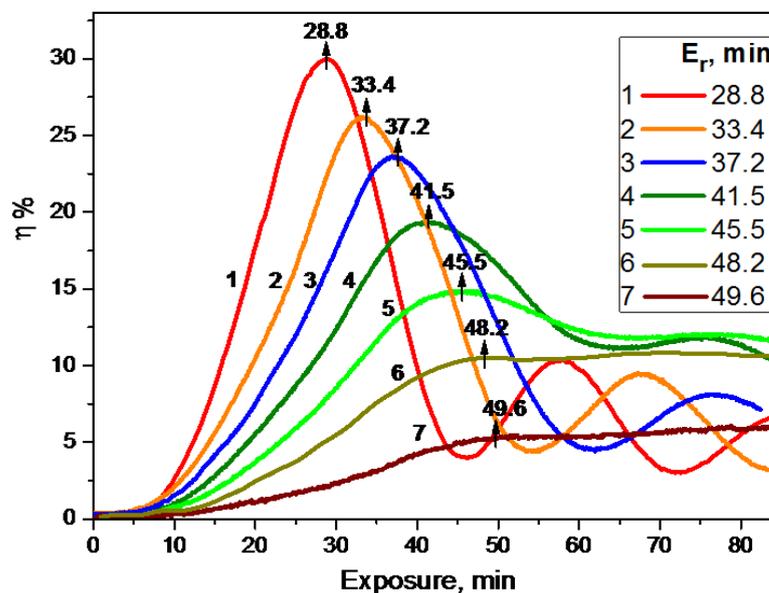


Рисунок 3.44 – Кинетика изменения ДЭ плоской гауссовой решётки при увеличении экспозиции для разных радиусов считывающего пучка (от 1 – максимально узкого, до 5 – покрывающего почти всю решётку, и далее до 7 – шире неё),  $E_r$  – экспозиция при достижении максимума ДЭ для различных радиусов считывающего пучка

Видно, что при узких считывающих пучках, восстанавливающих только центр голограммы, ДЭ ведёт себя также, как предсказано теорией Рамана – Ната. Это и понятно – неравномерности локальных ДЭ по полю голограммы нет. Она для восстанавливающего пучка равномерна по полю. Для пучка (4) получена классическая зависимость ДЭ при участии эффекта формфактора. Далее, с уширением восстанавливающего пучка ДЭ слабеет, поскольку он частично проходит мимо голограммы.

Таблица 3.5 – Значения экспериментально найденного формфактора  $\Psi$  для разных радиусов считывающего пучка  $R$

№	1	2	3	4	5	6	7
$E_r$	28,8	33,4	37,2	41,5	45,5	48,0	49,6
$\Psi$	1.00	0,86	0,77	0,69	0,63	0,59	0,58
$r$	0,0l	0,6l	0,8l	1,0l	1,5l	2,0l	3,0l

На рисунке 3.45 показаны в сравнении расчётные кривые кинетики ДЭ гауссовой решётки (а) и полученные экспериментально (б) при радиусах считывающего пучка от  $r=0,0l$  до  $r=3l$ . В экспериментальных графиках  $r=0,0l$  – условное обозначение для случая, когда  $r \ll l$ , когда измеряемое значение  $r$  было меньше точности измерения. Из полученных графиков видно, что этой точности было достаточно, чтобы полученные экспериментальные значения ДЭ хорошо совпадали с рассчитанными теоретически.

Экспериментально полученные результаты кинетики изменения ДЭ подтверждают расчётные, приведённые выше (рисунок 3.39а). Небольшое ослабление ДЭ в экспериментах, по сравнению с расчётными значениями объясняется собственным поглощением материала ХСП и оптическим рассеянием, присутствующим в эксперименте.

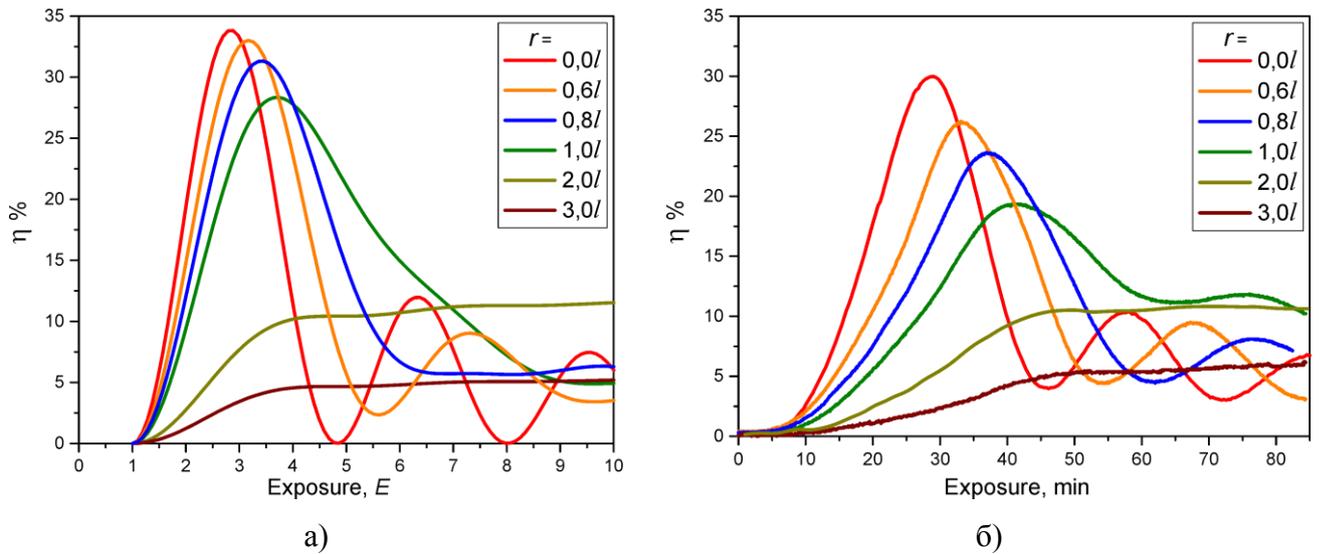


Рисунок 3.45 – Рассчитанные кривые кинетики ДЭ гауссовой решётки (а) и экспериментально-полученные (б) при радиусах считывающего пучка от  $r=0,0l$  до  $r=3,0l$

Найденное экспериментально значение формфактора  $\Psi$  тонкой гауссовой решётки, определяемое по формуле  $\Psi = E_{r0}/E_r$ , где  $E_{r0}$  – требуемая экспозиция для достижения максимума ДЭ в первом порядке равномерной (плоской) решётки (или в случае использования узкого считывающего луча с радиусом  $r = \{0,1 \div 0,3\}l$ ), а  $E_r$  – требуемая экспозиция для достижения максимума ДЭ в первом порядке гауссовской решётки, было определено по экспериментально полученной кинетике роста ДЭ гауссовой решётки, показанной на рисунке 3.46.

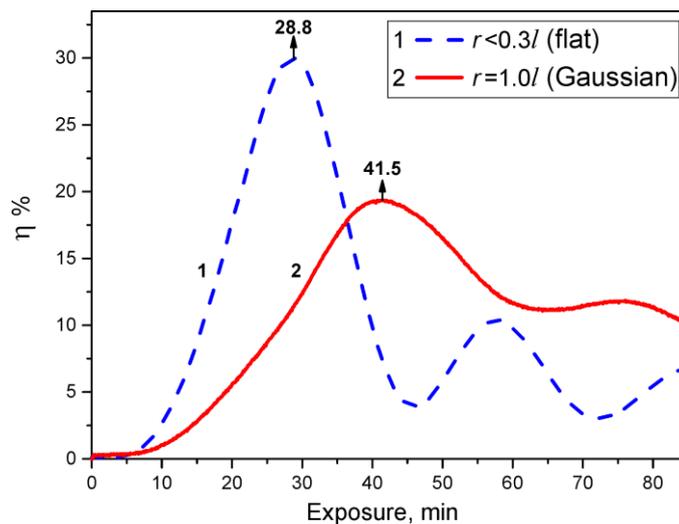


Рисунок 3.46 – Экспериментально-полученная кинетика ДЭ гауссовой решётки при радиусе считывающего луча  $r < 0,3 l$  (график 1) и при радиусе считывающего луча  $r = 1,0 l$  (график 2). На максимумах кинетики ДЭ показана экспозиция, требуемая для достижения первого максимума

Экспериментально полученный на голографическом материале ХСП формфактор  $\Psi = E_{r0}/E_r$  тонкой решётки в режиме дифракции Рамана – Ната при записи гауссовыми пучками составляет  $\Psi = 28,8/41,5 = 0,69$ .

На рисунке 3.47 на кривой нулевого порядка дифракции  $\eta_0(m=0)$  показаны точки появления локальных минимумов (колец – рисунок 3.43) всех других порядков ( $m>0$ ), которые могут наблюдаться в эксперименте.

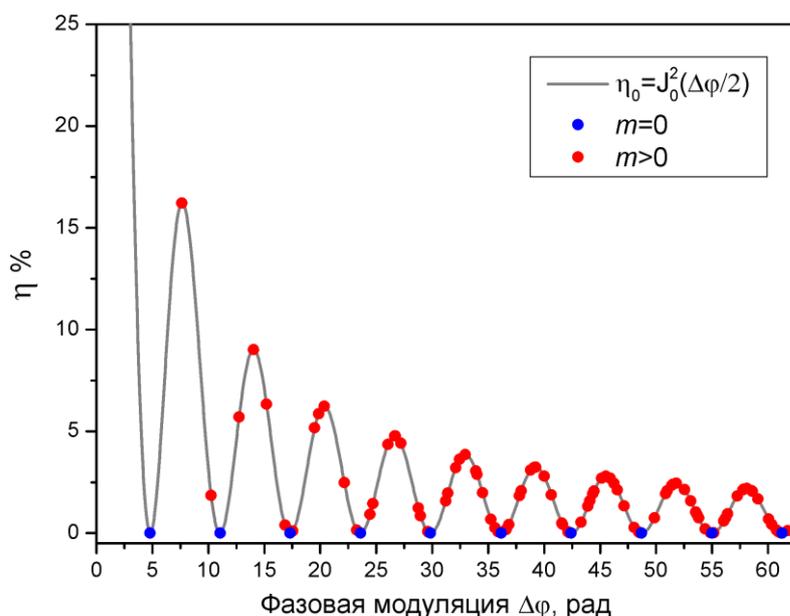


Рисунок 3.47 – Точки появления колец в картине дифракции разных ( $m>0$ ) порядков дифракции

Видно, что с ростом экспозиции расстояния между соседними точками на кривой с локальными минимумами в соответствующих порядках (кольцах) уменьшается. Была построена таблица, по которой каждому локальному минимуму было поставлено в соответствие значение фотоиндуцированного изменения фотоотклика голографического материала  $\Delta\phi$ . По этой таблице проводились измерения  $\Delta\phi$  от экспозиции голографического материала. Точность измерений достигала (см. правый край графика на рисунке 3.47) 0,41 радиана, что сравнимо с определением  $\Delta\phi$  на интерференционном микроскопе. Таким образом, был предложен и запатентован дифракционный способ измерения кинетики фотоиндуцированного отклика голографического материала непосредственно во время записи на нём голограмм [3.19].

### ***Выводы параграфа 3.6***

Экспериментально подтверждено проявление формфактора в регистрирующей среде на основе многослойной структуры халькогенидных стеклообразных полупроводников и в азополимерах.

Сравнение величины формфактора для тонких гауссовых голограмм, работающих в режиме дифракции Рамана – Ната и объёмных по критерию Клейна, работающих в режиме дифракции Брэгга, проведённое для случаев восстановления пучками разного диаметра, показывает их практическое совпадение, что указывает на одинаковую природу формфактора для обоих случаев дифракции.

Найден и численно определён эффект формфактора при записи гауссовыми пучками голограмм, описываемых дифракцией Рамана – Ната.

Получено хорошее совпадение расчётной и определённой экспериментально кинетики роста ДЭ для голограмм, записанных на халькогенидных стеклообразных полупроводниках и азополимерах.

Получено хорошее совпадение величины формфактора, найденного экспериментально для голограмм, записанных на халькогенидных стеклообразных полупроводниках, и определённого теоретически, для случаев восстановления голограммы пучками разного диаметра.

Для гауссовых голограмм Рамана – Ната, записанных на халькогенидных стеклообразных полупроводниках, с шириной голограммы, ограниченной по уровню спада ДЭ в  $1/e$ , значение формфактора составляет 0,69.

При восстановлении широкими пучками с радиусом  $r=l$  и больше, ограничение максимально достижимой ДЭ приходит в насыщение и составляет  $\Phi = 0,18$ .

Следовательно, удельная энтропия таких голограмм может быть оценена, согласно (3.22) и (3.23), как (3.48):

$$h \approx -\log_2 \left( \frac{\eta_c}{\eta_{uu}} \cdot \Phi \right) = \log_2 \left( \frac{\eta_c}{\eta_{uu}} \right) + \log_2 (\Phi) = 5,5. \quad (3.48)$$

Значения рассчитанных формфакторов для толстых и тонких гауссовых голограмм даёт основание считать эффект проявления формфактора более универсальным, имеющим одинаковую природу, одинаково применимым и близким по значениям для двух видов дифракции, дифракции Брэгга и дифракции Рамана – Ната.

По полученным в параграфе результатам был получен патент на дифракционный способ измерения кинетики фотоотклика голографического материала путём измерений количества возникающих колец в нескольких порядках дифракции одновременно. Эффект формфактора голограмм был использован при определении кинетики и величины динамического диапазона фотоотклика при изучении регистрирующих сред на основе многослойной структуры халькогенидных стеклообразных полупроводников.

Полученный с помощью формфактора коэффициент увеличения оптимальной экспозиции позволяет добиться регистрации голограмм с максимальным значением ДЭ и максимальной информационной ёмкостью, что определяет качество работы голографических приборов.

Таким образом, на голограммы, работающие в режиме дифракции Рамана – Ната распространяются все свойства формфактора, полученные ранее для голограмм, работающих в режиме дифракции Брэгга, причём коэффициенты увеличения оптимальной экспозиции  $\Psi$  для получения максимальной ДЭ у них близки, а величина максимально достижимой экспозиции  $\Phi$  у голограмм с дифракцией Рамана – Ната примерно втрое меньше, чем в случае дифракции Брэгга, что в ещё большей степени ограничивает энтропию получаемых голограмм. На рисунках 3.45 видны равномерные участки стагнации ДЭ, которые позволяют также, как и участки стагнации на рисунке 3.12, приблизительно оценивать величину энтропии.

Показанные на рисунке 3.43 изображения восстановленных гауссовых пучков могут быть использованы для определения фотоотклика голографического материала, определяемого по количеству колец (нулевых значений ДЭ) при переходе фазы в (3.44) через нули функции Бесселя соответствующих порядков. Это было положено в методику оперативного измерения кинетики ДЭ и фотоотклика голографического материала в патенте RU 2734093 C1 [3.19].

### Выводы главы 3

Наряду с ограничениями ДЭ объёмных фазовых голограмм, приводящими к динамическому искривлению голографических интерференционных полос и резонансу спекл-поля, записывающего голограмму, существуют ограничения, связанные с нелинейным взаимодействием статистики распределения яркости по полю голограмм и ДЭ. Они существуют как у голограмм с дифракцией Брэгговского типа, так и у голограмм с дифракцией Рамана – Ната, ограничивая среднюю ДЭ и увеличивая оптимальную экспозицию, проявляясь как формфактор голограмм. Он используется для измерений кинетики ДЭ разрабатываемых голографических материалов.

Указанные ограничения распространяются как на голограммы, записанные гауссовыми пучками, так и на голограммы, записывающие сложные изображения, как например, портрет человека, которые в силу ЦПТ также имеют гауссову статистику распределения яркости и формируют сложным образом изменяющиеся по полю голограммы значения локальной ДЭ, но формируют среднюю ДЭ голограммы, аналогично гауссовым пучкам, ограничивая их энтропию.

Описанный в главе эффект, обусловленный формой голограммы (фактор формы – формфактор), при наличии третьей нелинейности – нелинейности фотоотклика голографического материала или фотоприёмной матрицы, приводит не к уменьшению достижимого максимума ДЭ голограммы в целом, а к его

возрастанию, по сравнению со случаем линейного фотоотклика, что вызвано более низкими из-за нелинейности фотоотклика скоростями спадания локальных значений ДЭ, переваливших свой локальный максимум.

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

Указанные эффекты ограничения ДЭ и энтропии голограмм не зависят от конкретного материала, на котором записывается голограмма, проявляясь только как физические свойства материала (дифракция Брэгга или дифракция Рамана – Ната), значит, могут проявляться как в классических аналоговых голограммах, так и в цифровых, и компьютерных голограммах, моделирующих соответствующий режим дифракции, ограничивая их ДЭ и энтропию.

Численные оценки энтропии голограмм, работающих в режиме дифракции Рамана – Ната, показывают, что их информационная ёмкость может быть ощутимо меньше, чем у голограмм с дифракцией Брэгга. Это надо учитывать, поскольку наиболее часто проводимые сегодня исследования динамических голографических дисплеев, как показывают обзоры [1.7, 1.127–1.133] основываются как раз на технологии тонких голограмм с дифракцией Рамана – Ната.

## ГЛАВА 4. МЕТОДЫ СИНТЕЗА ГОЛОГРАММ ДЛЯ УДАЛЁННОГО ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ОБЪЁМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

### Параграф 4.1. Основные вопросы синтеза голограмм по карте поверхности (маске) и текстуре объекта голографирования

Как было показано в первой главе, для передачи 3D голографической информации по обычным каналам связи необходимо организовать её существенное сжатие. В параграфе 1.4, на основе анализа современного состояния работ, был сделан вывод о том, что традиционные методы энтропийного кодирования на сегодняшний день далеки от возможности сжатия в  $10^6$  раз. Поэтому в главе 2 был предложен алгоритм передачи 3D голографической информации в виде двух основных модальностей изображения – текстуры поверхности голографируемого объекта (сюжета) и его топографической карты, которые позволяют синтезировать полноценную голограмму на приёмном конце канала связи и восстанавливать с её помощью 3D голографические изображения (параграф 2.1).

Для создания топографической карты 3D поверхности живого голографируемого объекта с требуемой TV частотой кадровой развёртки был выбран метод латерально падающего структурированного света из параллельных полос. На примере вертикальных полос были проведены операции формирования голограммы, которая восстановила изображение, обладающее как горизонтальным, так и вертикальным параллаксом (рисунок 4.1).



а)



б)

Рисунок 4.1 – Проекция восстановленного 3D изображения:

а) горизонтальный параллакс; б) вертикальный параллакс

Исходными данными для такой голограммы служили два 2D массива данных в формате двух кадров Full HD. Первый – обычное цветное RGB фото объекта голографирования (рисунок 4.2а) и второй – фото объекта голографирования с латерально спроецированным на него структурированным светом в виде прямых вертикальных полос (рисунок 4.2б). Последний служит для формирования карты поверхности голографируемого объекта. Следует отметить, что метод структурированного света из параллельных полос и его Фурье анализ сегодня широко используется для различных задач профилометрии, изучении вибраций и деформаций, анализа быстропротекающих процессов, а также для построения карты высот поверхности 3D объектов, что можно видеть, например, из обзора Mitsuo Takeda [4.1]. Мы распространим этот метод на синтез голограмм 3D объекта с целью получения возможности восстановления в видимом диапазоне длин волн действительного (как виртуального, так и физического) изображения 3D объекта с непрерывным параллаксом при высоком качестве пространственного разрешения, сравнимого с современным TV стандарта Full HD и необходимой для решения задач TV и 3D удалённой дополненной реальности частотой кадровой развёртки.

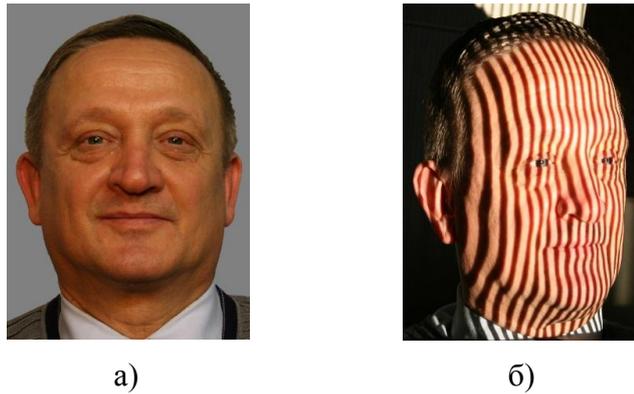


Рисунок 4.2 – Исходные кадры для обработки: а) RGB изображение голографируемой сцены; б) изображение голографируемой сцены с наложением структурированного света на объект голографирования

В общем случае полосы на объекте голографирования могут быть сформированы как интерференционным методом, так и в виде проекции интерференционной картины двух когерентных пучков света и даже простой проекцией слайда с нанесённой любым способом такой структурой. Общность полос первого и второго метода отмечали О. Bryngdahl and A. W. Lohmann [4.2]. Мы обращаем внимание на общность голографических интерференционных полос и паттернов структурированного света из параллельных полос, латерально спроецированных на 3D объект голографирования. Период таких полос ввиду технологии их создания формируется существенно большим, чем в традиционных голограммах, в которых он сравним с длиной волны записи голографической интерференционной решётки. Период представленной на рисунке 4.2б решётки спроецированных на 3D объект вертикальных полос соответствует сантиметровым длинам волн или электромагнитному излучению радиодиапазона. Как уже отмечалось выше, картина структурированного света из параллельных полос не должна отображать мелкую поверхностную структуру перепадов высот голографируемого объекта. Наше восприятие глубины не позволяет видеть мелкие перепады высот, что видно из анализа человеческого восприятия глубины в рамках механизма вергенции и аккомодации [1.105]. Мелкие перепады глубины мы видим, как теневые линии (морщинки) на поверхности объекта (рисунок 4.2а). Таким образом, при передаче карты поверхности голографируемого объекта

необходимо обрабатывать существенно меньше информации, не только меньше, чем в голограмме, но и меньше, чем в полноценном кадре Full HD.

Работает ли дифракционная решётка, сформированная из паттерна латерально освещающих объект голографирования вертикальных полос как голограмма и можно ли с её помощью получить не только горизонтальный, но и вертикальный параллакс? На эти вопросы будет дан ответ в настоящем параграфе.

В процессе обработки информации о 3D кадре сначала выделяются границы паттерна вертикальных полос (рисунок 4.3а). На рисунке 4.3б показан размер кадра, в котором до фотографической плотности сжато изображение (рисунок 4.3б). Из него преобразованием системы координат каждой полосы получается карта высот (рисунок 4.3в).

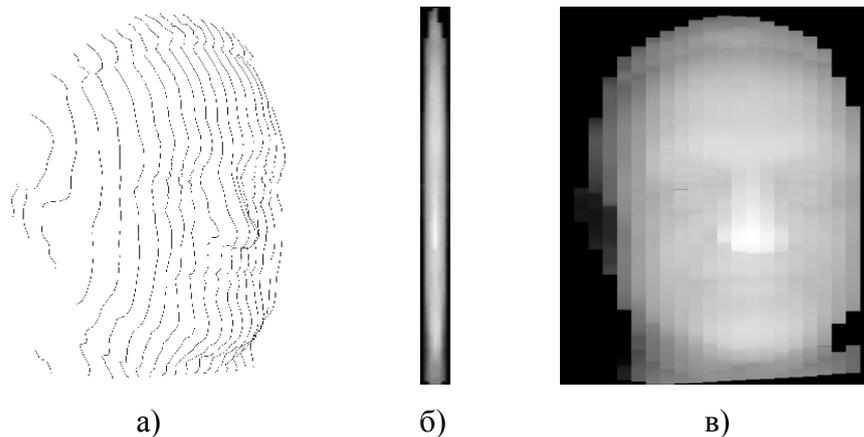


Рисунок 4.3 – Преобразование системы координат каждой полосы (а), (б) в карту глубин (в)

Как было отмечено выше, мелкие перепады высот не видны глазом ни с помощью механизма вергенции, ни с помощью аккомодации. Морщинки на лице мы видим только с помощью механизма пространственного разрешения структуры теневых приповерхностных полос. Поэтому для более плавного представления поверхности можно из структуры в 26 вертикальных полос создавать, практически, любое, достаточно гладкое, изображение 3D поверхности, сохраняя особо мелкие детали только в текстуре. На рисунке 4.4 показана топографическая карта высот, созданная после увеличения количества полос от 26 (рисунок 4.3а) до 750 (рисунок 4.4а) с применением оператора MATLAB «bilinear» (билинейная интерполяция). Получаемое таким образом количество

полос подбирается так, чтобы оно соответствовало количеству полос на традиционной голограмме с теми же углами дифракции, длиной волны света и др., создавая тем самым новую несущую пространственную частоту, равную частоте выбранной голограммы.

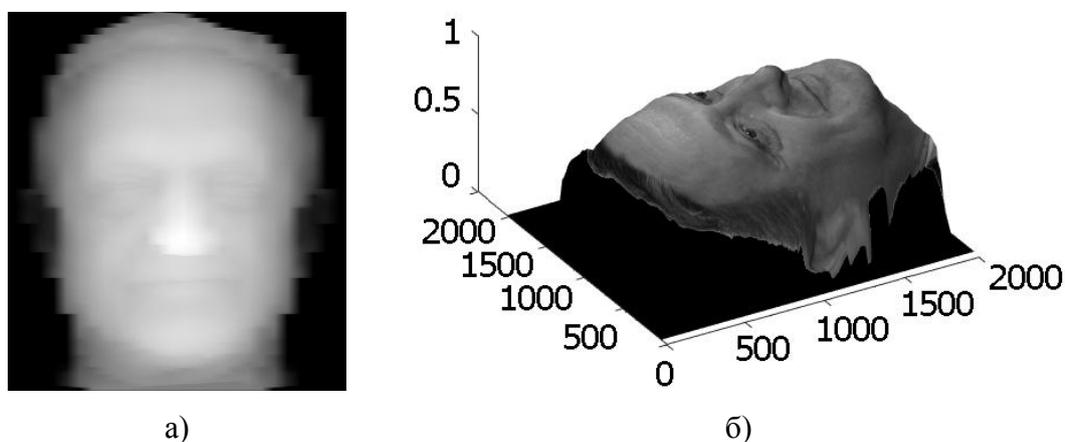


Рисунок 4.4 – а) карта высот, растянутая оператором «bilinear» до размера текстуры и б) наложенная на неё текстура

Синтезированное по массивам, показанным на рисунках 4.2а и 4.3б, 3D изображение, приведённое на рисунке 4.4б, является исходным для прямого цифрового синтеза голограммы с операциями, адекватными распространению когерентного излучения в схеме [1.11] Э. Лейта и Ю. Упатниекса (см. рисунок 2.1). Синтез голограммы проводился для длины волны 0,532 мкм при угле падения опорной волны примерно в  $10^\circ$ , что формировало несущую пространственную гармонику с периодом 3 мкм, которая занимала примерно 3 пикселя в массиве, отображающем голограмму.

Поскольку при обработке 3D информации придётся осуществлять преобразование Фурье или Френеля, для которых существуют алгоритмы быстрого счёта, БПФ и БПФр соответственно, следует учесть их особенности. Главная из них состоит в том, что оба работают с плоскими объектами, изменяющимися по глубине не более, чем на длину волны  $\lambda$ . При выполнении операций с преобразования Фурье и Френеля над глубокими 3D объектами возникает известный эффект свёртывания фазы, вызванной её перескоком через  $2\pi$ , что требует в дальнейшем выполнения обратной операции по её

развёртыванию [2.19]. Алгоритмы развёртывания фазы не просты и особенно чувствительны к разного рода шумам, приводящим к фазовым разрывам [2.20, 2.21], но в виртуальной области – области вычислений, есть другой способ избавиться от такой проблемы фазовых разрывов. Он имеет ряд преимуществ в его простоте и ряд недостатков в части появления некоторых специфических искажений восстанавливаемого объёма 3D изображения, аналогичных продольным абберациям, но вполне годится в задачах сравнения двух волновых фронтов, где их абберации при вычитании друг из друга компенсируются.

Его суть состоит в том, что числа с плавающей запятой даже с одинарной точностью в вычислительных программах имеют до 7 значащих знаков после запятой, не говоря уже об обычной сегодня – двойной точности. Таким образом, представление 3D конфигурации волнового фронта массивом чисел с двойной точностью на много порядков превышает точность, с которой необходимо этот фронт регистрировать, синтезировать и обрабатывать в реальных экспериментальных условиях. Это позволяет перед обработкой фазовой информации о 3D объекте сначала сжать этот объект по глубине до размера, меньше одной или даже половины длины волны, не теряя необходимой точности представления волнового фронта, произвести обработку (в нашем случае сравнение двух фронтов), а затем снова разжать, увеличив глубину изображения до прежнего значения.

Поэтому перед началом работ следует преобразовать массив чисел, формирующих изображение (рисунок 4.4а) к более плоскому так, чтобы максимальная глубина новой карты высот не превышала  $\lambda/2$ , запомнив при этом получившийся коэффициент сжатия  $K$ . Точность передачи цифровым массивом данных объёма при таком сжатии остаётся прежней, для этого даже не надо производить вычисления с двойной точностью. Эта операция порождает массив данных, в которых полосы по всему кадру смещаются менее, чем на одну полосу (рисунок 4.5) и эффект свёртывания фазы исчезает. Далее, для упрощения расчётов, без ограничения общности будем отображать текстуру в одном цвете.

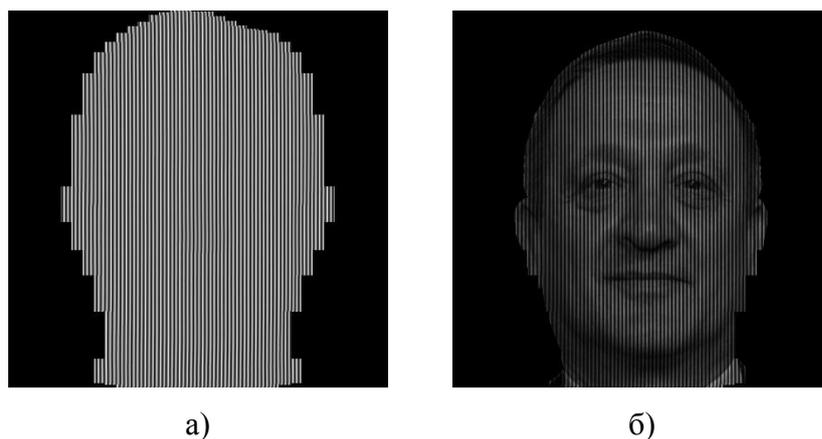


Рисунок 4.5 – Картина паттернов структурированного света из вертикальных полос по карте высот из рисунка 4.4 с периодом 3 пикселя и глубиной, уменьшенной до  $\lambda/2$ : а) вертикальные полосы спроецированы на маску; б) наложенные на маску полосы совмещены с текстурой

Все операции с массивом чисел, определяющим карту высот голографируемого объекта, проводятся так же, как и при исходных глубоких объектах. Только в конце обработки информации 3D объект восстанавливается до своего нормального размера по коэффициенту сжатия  $1/K$ . Процедура сжатия отображена на рисунке 4.6, где справа приведено сечение сжатого по глубине до  $\lambda/2$  массива (рисунок 4.4а). На нём отчётливо виден контур голографируемого объекта (рисунок 4.4б).

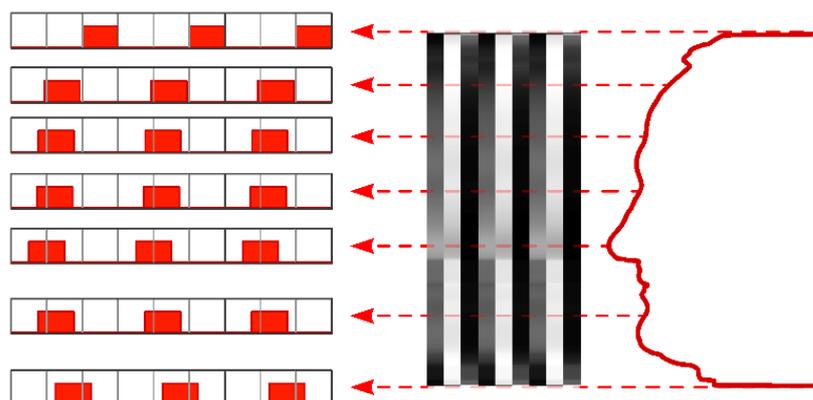


Рисунок 4.6 – Фрагмент картины полос из рисунка 4.5, взяты три центральные полосы по 3 пикселя ширины в каждой

В центре рисунка 4.6 приведены три центральные полосы, шириной по 3 пикселя каждая, из средней части рисунка 4.5а, на которых, выраженное в

дискретной форме, степень чёрного видно сформированное на голограмме смещение веса интерференционного максимума. В левой части рисунка условно красным показано горизонтальное смещение этой интерференционной полосы и её относительный вес в каждом из трёх отведённых для неё вертикальных дискретных столбцов.

Для сравнения дифракционной системы паттернов из полос и дифракционной структуры голографической дифракционной решётки был смоделирован процесс дифракции пучка когерентного излучения как на паттерне полос (рисунок 4.5), так и на полученной по 3D виртуальному объекту (рисунок 4.4б) компьютерной голограмме (рисунок 4.7).

Голограмма была синтезирована по схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса, аналогично голограмме параграфа 2.3 по схеме рисунка 2.21. Для удобства дальнейших вычислений, как и в случае паттерна полос (рисунок 4.5), карта высот была сжата по оптической оси до  $\lambda/2$ .

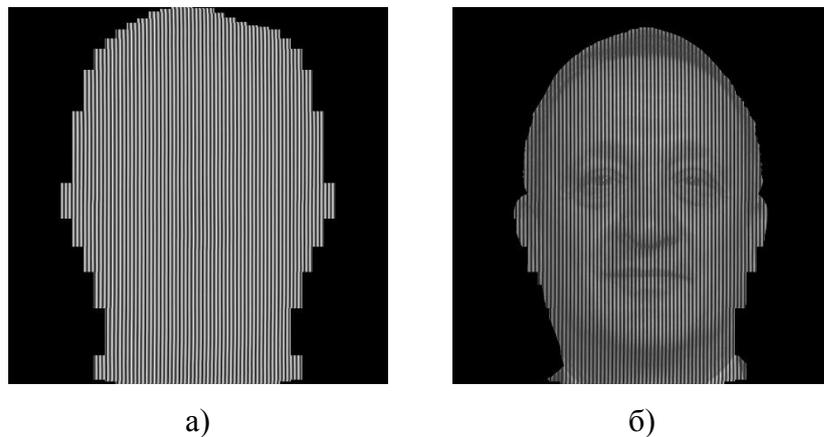


Рисунок 4.7 – Голограмма сфокусированных изображений: а) от объекта – карта поверхности; б) от полного 3D объекта

Далее сравним результаты дифракции плоского пучка на паттерне структурированного света из вертикальных полос (рисунок 4.5) и голограмме (рисунок 4.7).

#### ***4.1.1. Голограмма и паттерны структурированного света***

Схема сравнения дифракции на обычной компьютерной голограмме и на компьютерной модели паттерна полос была следующей: сначала и от голограммы, и от паттернов структурированного света, латерально освещающего 3D объект, вычислялись спектры Фурье. Действительные части каждого из этих спектров, как и мнимые, были практически между собой неотличимы. Это соответствовало картине дифракции на полученных структурах и уже указывало на близость голограммы и паттерна полос. Однако для точного результата далее 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 полос. Далее из полученных спектров объектов соответствующим обратным преобразованием Фурье восстанавливалось исходное 3D изображение без несущей пространственной частоты и полученные 3D изображения сравнивались.

На рисунке 4.8, аналогично рисунку 4.6, показано, что на голограмме каждая интерференционная полоса тоже имеет ширину 3 пикселя для удобства сравнения. Каждая из трёх вертикальных полос представлена тремя вертикальными линиями, каждая шириной в 3 пикселя. Справа – контур 3D объекта, глубиной  $\lambda/2$ , в центре – три центральных интерференционных полосы из рисунка 4.7, шириной по 3 пикселя, где в дискретной форме степенью чёрного показано смещение веса интерференционного максимума. Слева показан горизонтальный сдвиг семи сечений этих полос и их вес в каждом из трёх, отведённых для них, вертикальных дискретных столбцов.

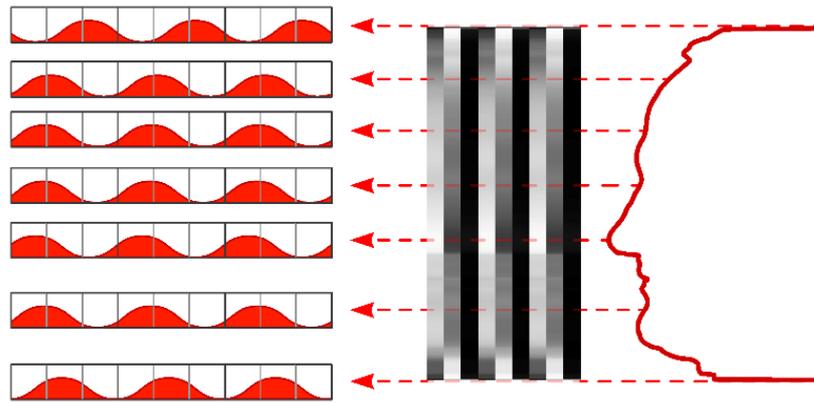


Рисунок 4.8 – Фрагмент голограммы из рисунка 4.7, где взяты три центральные полосы по 3 пикселя ширины в каждой

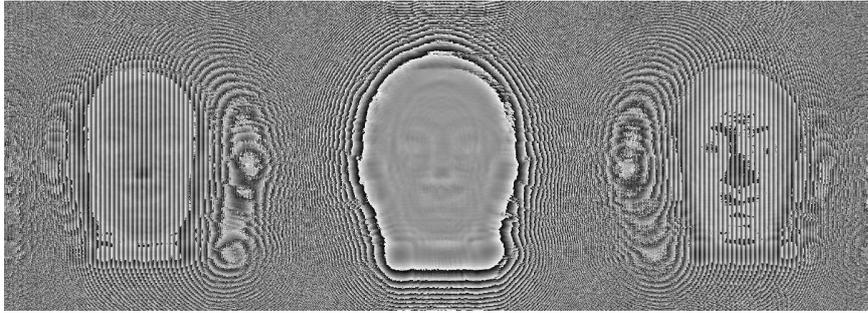
Для сравнения результатов дифракции на структурах из рисунков 4.5 и 4.7 были вычислены преобразования Фурье, описывающее дифракцию Фраунгофера, а также преобразования Френеля от каждой структуры.

В дальнейшем были получены описанные ниже результаты как для случая использования преобразования Френеля, так и для случая преобразования Фурье. Результаты нашего дальнейшего исследования с их помощью оказались близкими. Однако, помня о том, что при передаче информации о 3D объекте в виде части спектра голограммы, теряется разрешающая способность восстановленного изображения [1.176] (параграф 2.4.2), приводим ниже технику с использованием преобразования Френеля. Кроме того, техника с применением численного преобразования Френеля более наглядно иллюстрирует восстановление изображений на конечном расстоянии от голограммы и на таком же расстоянии от паттерна полос.

На рисунке 4.9а,б приведены результаты вычислений интегрального



а)



б)

Рисунок 4.9 – Спектр Френеля от картины паттернов структурированного света рисунок 4.5а:  
а) амплитудная компонента спектра; б) фазовая компонента спектра

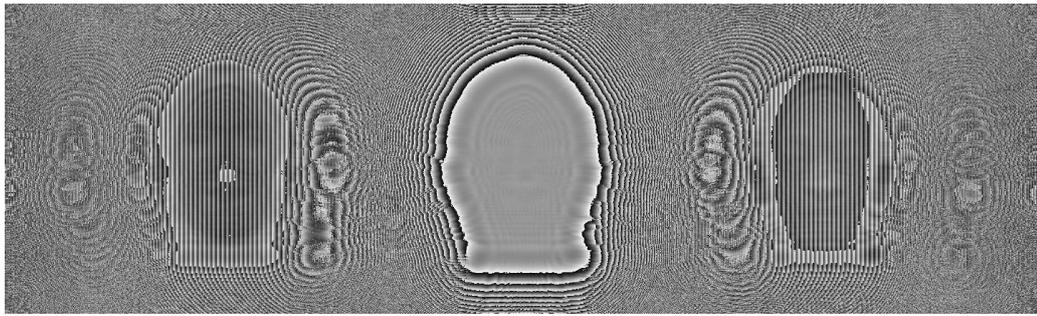
преобразования Френеля от паттернов структурированного света (рисунок 4.5а), где (рисунок 4.9а) соответствует амплитудной компоненте преобразования Френеля, а (рисунок 4.9б) – фазовой.

На рисунке 4.10а,б приведены аналогичные результаты вычислений преобразования Френеля, но теперь уже от голограммы (рисунок 4.7а), где (рисунок 4.10а) соответствует амплитудной компоненте преобразования Френеля, а (рисунок 4.10б) – фазовой.

Видно, что картины дифракции на массиве паттернов структурированного света (рисунок 4.9) и на голограмме (рисунок 4.10) очень похожи. Более детальное исследование структуры полученных голограмм со значительным их увеличением указывают на те же результаты.



а)



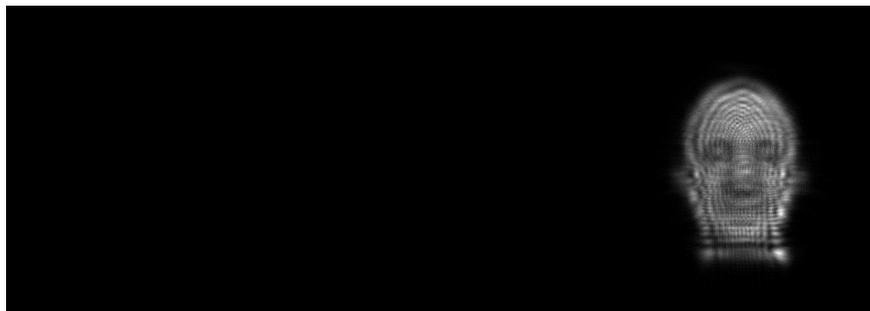
б)

Рисунок 4.10 – Спектр Френеля от голограммы рисунок 4.7а: а) амплитудная компонента спектра; б) фазовая компонента спектра

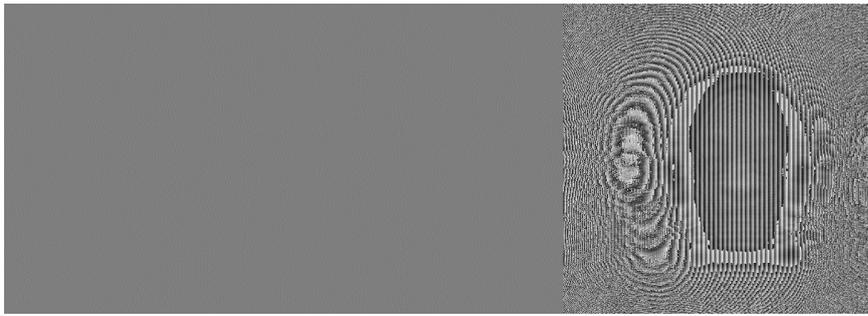
Обе полученные структуры, и голограмма, и спектр Френеля от картины паттернов структурированного света по горизонтали втрое больше, чем по вертикали. Такие размеры голограмм были выбраны для эффективного разделения областей нулевого и плюс-минус первых порядков дифракции, каждый из которых теперь занимает одну треть на рисунках 4.9 и 4.10.

Для синтеза восстановленного голограммой (рисунок 4.10) записанного на ней изображения теперь необходимо выделить дифрагировавший в минус первый порядок дифракции пучок, сформировать из массивов действительных чисел (рисунок 4.10а) и мнимых (рисунок 4.10б) массив комплексных чисел и сделать над ним обратное преобразование Френеля. Таким образом, вычислениями получим восстановленное в плоскости голограммы сфокусированных изображений 3D изображение записанного на ней объекта.

Для этого выделяем 1/3 часть картины дифракции, соответствующую минус первому порядку дифракции на голограмме (рисунок 4.11).



а)



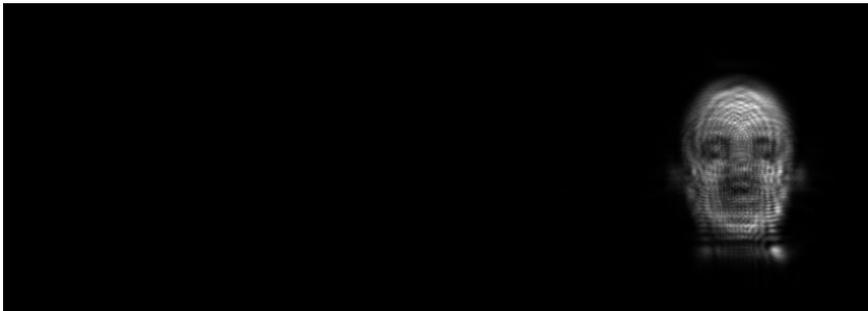
б)

Рисунок 4.11 – Справа отфильтрован спектр минус первого порядка дифракции на голограмме:

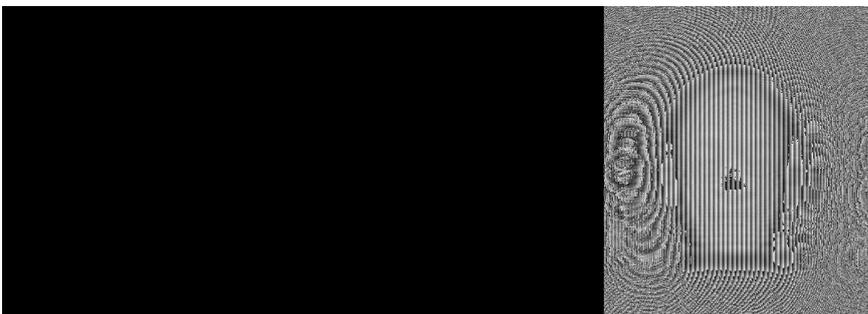
а) его амплитудная компонента; б) фазовая

Затем, для получения восстановленного в плоскости голограммы сфокусированных изображений записанного на ней 3D изображения, вычисляем обратное преобразования Френеля.

Аналогично отфильтровываем спектр минус первого порядка дифракции из спектра Френеля от паттерна структурированного света (рисунок 4.12).



а)



б)

Рисунок 4.12 – Справа отфильтрован спектр минус первого порядка дифракции на спектре

паттернов структурированного света: а) его амплитудная компонента; б) фазовая

Затем, для получения восстановленного в плоскости паттернов структурированного света 3D изображений, таким же образом вычисляем обратное преобразования Френеля.

#### ***4.1.2. Восстановление изображений***

Вычисление обратного преобразования Френеля от получившейся части спектра (рисунок 4.11) даёт нам амплитуду и фазу 3D объекта, записанного ранее на голограмме сфокусированных изображений (рисунок 4.13).

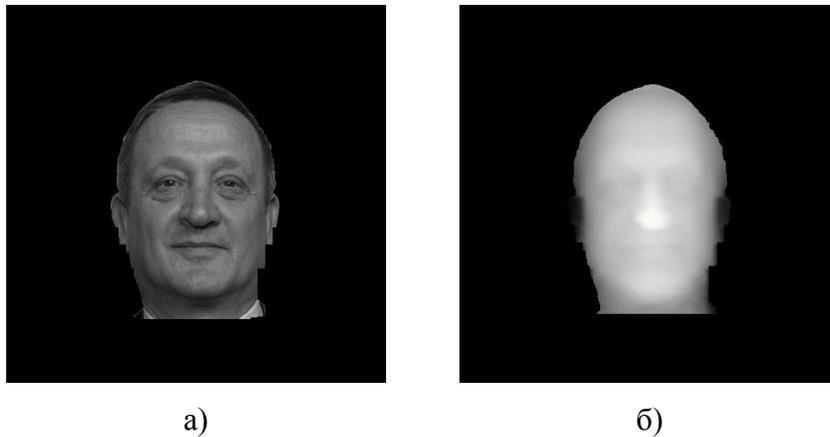


Рисунок 4.13 – Обратное преобразование Френеля от минус первого порядка спектра голограммы сфокусированных изображений 3D объекта рисунок 4.11: а) амплитуда восстановленного изображения; б) фаза восстановленного изображения 3D объекта

Собранные вместе, после умножения глубины объекта на зафиксированный ранее коэффициент сжатия  $1/K$ , они представляют 3D объект, восстановленный компьютерной голограммой (рисунок 4.14).

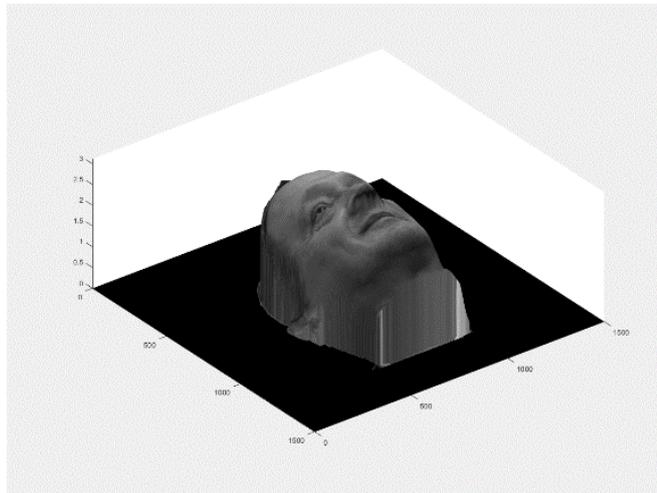


Рисунок 4.14 – Восстановленный голограммой сфокусированных изображений 3D объект

Вычисление обратного преобразования Френеля от выделенной части спектра паттерна структурированного света позволяет получить амплитуду и фазу 3D объекта, восстановленного при дифракции света на этом паттерне (рисунок 4.15).

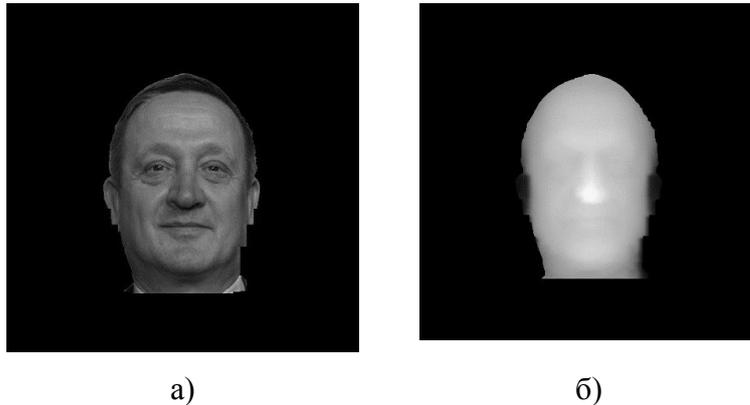


Рисунок 4.15 – Обратное преобразование Френеля от минус первого порядка, образованного дифракцией на паттернах структурированного света рисунок 4.14:

- а) амплитуда восстановленного изображения;
- б) фаза восстановленного изображения 3D объекта

Собранные вместе, после умножения глубины на зафиксированный ранее коэффициент сжатия  $1/K$ , они также представляют 3D объект (рисунок 4.16).

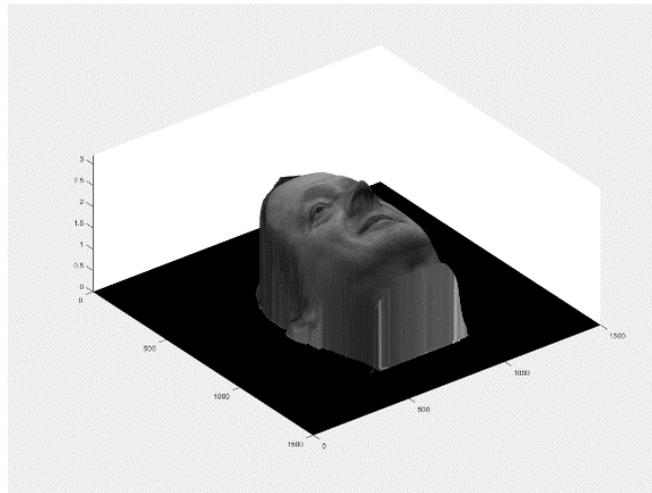


Рисунок 4.16 – 3D объект, восстановленный обратным преобразованием Френеля от спектра минус первого порядка массива паттернов структурированного света (рисунок 4.5)

Сравнивая два 3D изображения, полученные при дифракции на паттернах полос (рисунок 4.16) и при дифракции на голограмме сфокусированных изображений (рисунок 4.14), можно видеть их значительное сходство, что позволяет утверждать, что паттерн созданных полос обладает всеми основными свойствами голограммы. Он восстанавливает при освещении когерентным опорным пучком 3D изображение объекта с непрерывным горизонтальным и вертикальным параллаксом.

На рисунке 4.17 приведена разница карт высот 3D объекта, полученного от голограммы (рисунок 4.13б) и от паттерна структурированного света из вертикальных полос (рисунок 4.15б).

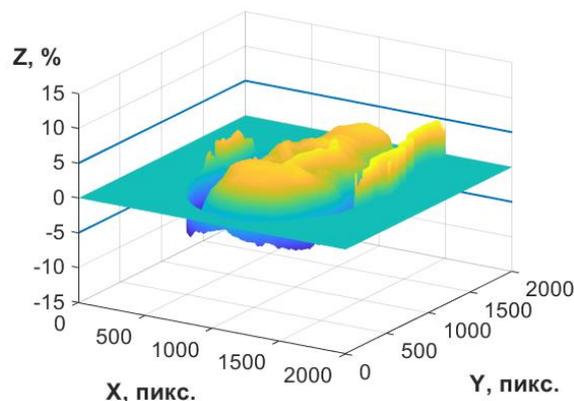


Рисунок 4.17 – Разница карт высот изображения (в процентах к абсолютной глубине объекта), восстановленного голограммой, и изображения, восстановленного паттерном структурированного света из вертикальных полос

Разница восстановленных высот оказалась в пределах плюс-минус 5 %, что является хорошим совпадением. Нагляднее это видно на рисунке совмещённых профилей (рисунок 4.18).

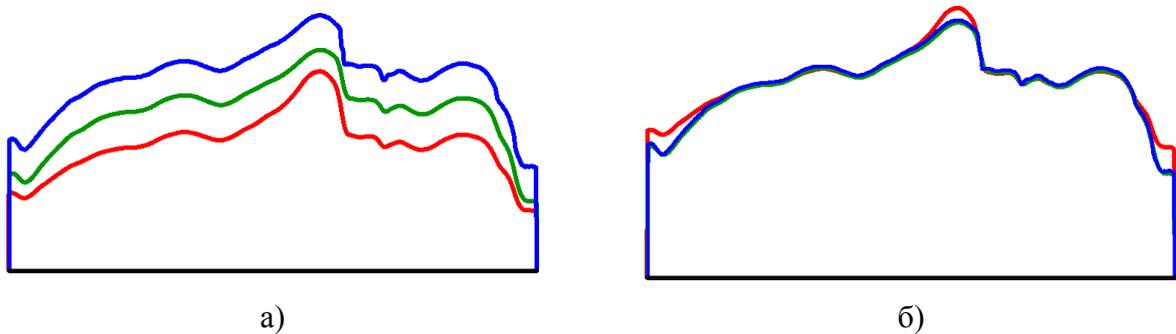


Рисунок 4.18 – Профиль центрального участка карты глубин:  
 синий – профиль исходного объекта (рисунок 4.4а),  
 зелёный – восстановленное голограммой изображение объекта (рисунок 4.13),  
 красный – восстановленный при дифракции на паттерне структурированного света из  
 вертикальных полос (рисунок 4.15):  
 а) для наглядности профили разведены по вертикали; б) профили совмещены

На рисунке 4.18а видны почти полностью повторяющие друг друга профили, разделённые по вертикали друг от друга искусственно, для удобства сравнения, а на рисунке 4.18б профили совмещены. Видно, что они почти совпадают. Небольшие отклонения, возможно, вызваны небольшими искажениями при расчёте волнового фронта, похожими на полевые aberrации, ввиду неточности регистрации первичной картины полос. Однако эти отклонения оказались достаточно малыми. Их природа близка, по смыслу, к полевым aberrациям типа дисторсии «подушка», которая хоть и искажает геометрические размеры изображения, но не влияет на разрешающую способность.

Это и понятно, поскольку косая проекция вертикальных полос на 3D фигуру (рисунок 4.19а) приводит к их деформации, аналогично деформации интерференционных полос при съёмке голограммы (рисунок 4.19б).

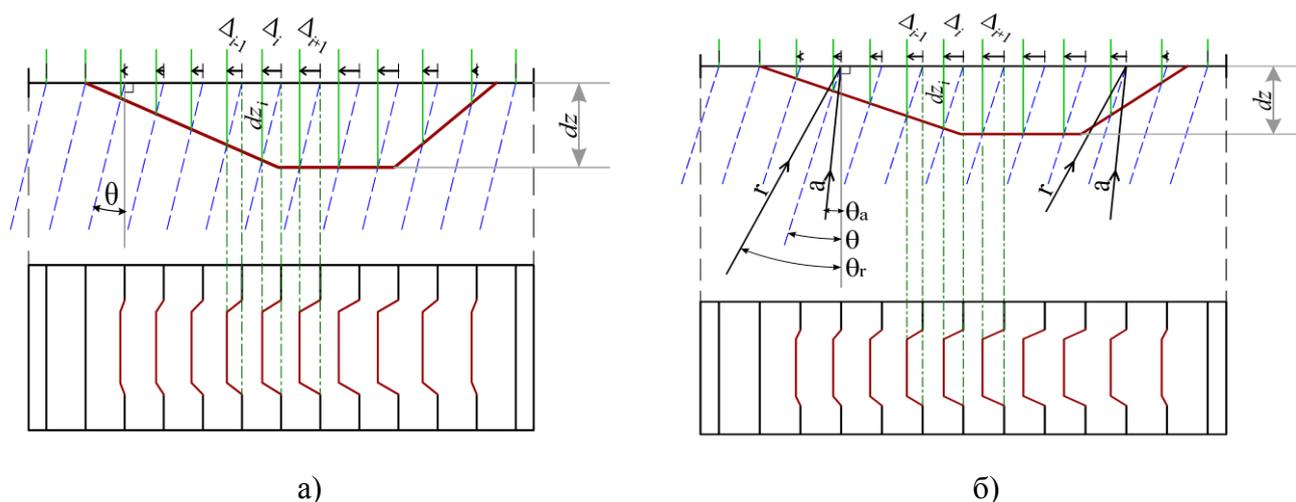


Рисунок 4.19 – Проекция паттернов (а) и интерференционных (б) полос под углом  $\theta$  на 3D объект в виде призмы. Смещение полос  $\Delta_i$  пропорционально локальной толщине 3D объекта на каждом  $i$ -ом участке объекта

Из сравнения рисунков 4.19а и 4.19б можно видеть принципиальную схожесть механизмов искривления интерференционных и паттернов полос, что указывает на то, что дифракция на паттернах полос (рисунков 4.2, 4.3 и 4.5) будет также образовывать восстановленные в минус первом порядке 3D изображения исходного объекта, близкие по форме к восстановленным компьютерными голограммами. В исходном виде такие паттерны полос обычно близки к голограммам радиодиапазона, что определяется их частотой в исходной картине проекции на объект. Однако простыми линейными преобразованиями их частоту можно увеличить, приведя к частоте, эквивалентной несущей в любом диапазоне длин волн, в т. ч. в видимой, ИК, УФ и даже в очень актуальный сегодня ТГц диапазон. Приведённый на рисунке 4.3 паттерн структурированного света из параллельных полос до его преобразований, увеличивающих несущую частоту (рисунок 4.5), можно считать дифракционной структурой, работающей как голограмма, синтезированная в радиодиапазоне электромагнитного спектра.

Сравнивая полученные 3D изображения рисунков 4.14 и 4.16 можно убедиться, что голограмма и паттерн структурированного света из параллельных полос восстанавливают очень схожие, полноценные 3D изображения. На

рисунках 4.20 и 4.21 приведены их изопроекции, показывающие очевидное сходство.



а)



б)

Рисунок 4.20 – Восстановленное голограммой изображение живого 3D объекта:

а) горизонтальный параллакс; б) вертикальный параллакс

Видно, что показанные на рисунке 4.18 небольшие отличия зрительно даже не воспринимаются. Видно, что и на рисунке 4.20, и на рисунке 4.21 одно и то же лицо.

Изображение, восстановленное голограммой, и изображение, восстановленное системой структурированного света из параллельных полос, обладают как горизонтальным, так и вертикальным непрерывным параллаксом.



а)

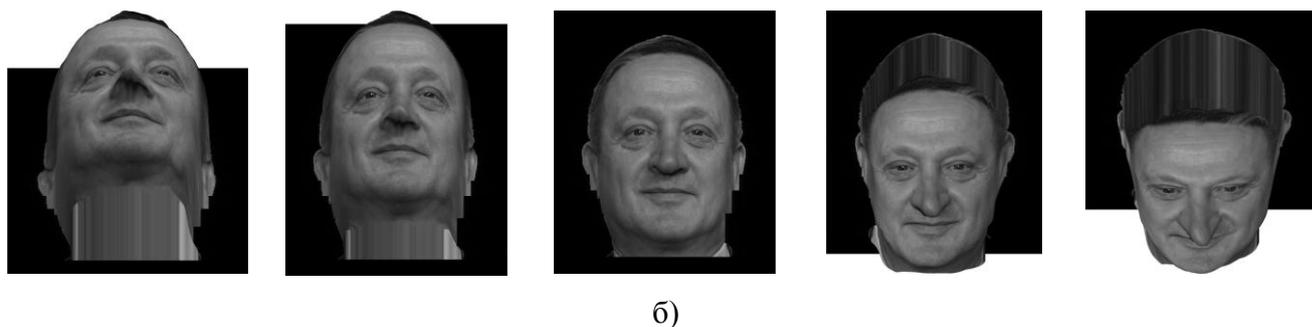


Рисунок 4.21 – Восстановленное паттерном структурированного света из параллельных полос изображение живого 3D объекта: а) горизонтальный параллакс; б) вертикальный параллакс

Степень непрерывности параллакса ограничена только его цифровым представлением и может быть сведена до любого желаемого минимума увеличением массива численно представляющего объект голографирования и голограмму. Небольшое отличие двух восстановленных 3D изображений живого объекта видно в самой высокой части карты высот объекта. В нашем случае, это область носа 3D изображения. Видно, что при восстановлении изображения системой структурированного света из параллельных полос всё-таки есть небольшие отличия, область высоких точек на карте глубин 3D объекта (вблизи носа) восстанавливается немного вытянутой. По-видимому, это следствие возникающих продольных aberrаций, которые в будущем предстоит исследовать более детально.

Обращает на себя внимание тот нетривиальный факт, что система прямых вертикальных полос образует структуру, обладающую не только горизонтальным, но также и вертикальным параллаксом, практически таким же, как и параллельно посчитанная голограмма. Следовательно, выбранный нами ранее способ формирования голограммы 3D объекта может быть существенно упрощён, что очень важно для ускорения процесса компьютерной обработки серий кадров 3D видео и дополненной реальности.

Таким образом, проведены расчёты по двум алгоритмам – синтез голограмм на приёмном конце канала связи и модификация несущей частоты паттерна структурированного света, схематически показанные на рисунке 4.22.

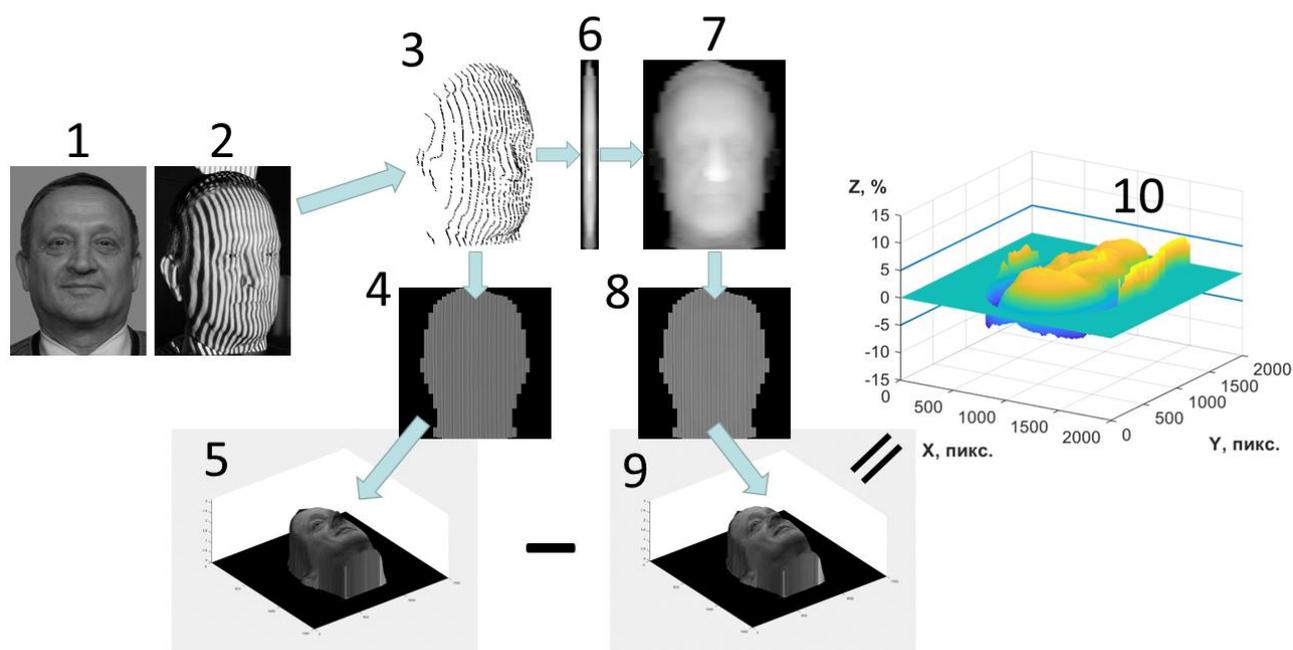


Рисунок 4.22 – Две схемы вычислений для синтеза на приёмном конце канала связи 3D восстановленного изображения с передающего конца канала связи:

традиционный путь моделирования дифракции на паттернах:

- 1 – текстура, 2 – система полос, 3 – паттерны,  
 6 – карта высот, с исходной плотностью полос, 7 – карта высот, 8 – компьютерная голограмма,  
 9 – восстановленное изображение 3D объекта;

другой путь – синтез по паттернам (3) дифракционной структуры с медианным увеличением частоты полос (4). Один из порядков дифракции на дифракционной структуре (4) восстанавливает 3D изображение объекта (5)

Первый путь традиционный. По изопроекции паттернов структурированного света из параллельных полос (2) строится паттерн полос (3), по которому синтезируется сжатая карта высот (6). Затем карта высот (6) разворачивается в полный размер (7) и с использованием текстуры (1) синтезируется голограмма (8), восстанавливающая 3D цифровое изображение объекта (9).

Другой путь восстановления 3D цифрового изображения объекта состоит на первом этапе в умножении количества полос между существующими в (3) до необходимого для дифракции на заданной длине волны в нужный угол (4), что соответствует введению несущей частоты в паттерн (3). Компьютерное

моделирование дифракции на дифракционной структуре паттерна (4) восстанавливает 3D изображение карты высот, которое с нанесением полученной по каналу связи текстуре (1) образует 3D цифровое изображение объекта (5).

Отличие двух восстановленных изображений 3D объектов достаточно мало и им можно на первых порах пренебречь. Оно составляет, по приведённым вычислениям, менее 5 % и, вероятно, может быть объяснено специфическими aberrациями, возникающими при указанных выше преобразованиях. Они требуют дополнительного изучения в случае необходимости увеличения точности, как это происходит при решении метрологических задач. Кроме того, в цифровой голографии для их компенсации можно заранее вводить компенсирующие деформации паттернов структурированного света (3).

Простота, с которой можно изменять несущую частоту такой структуры, позволяет легко перемещаться по всему видимому диапазону электромагнитного излучения (см. рисунок 4.23а–в) и даже за его пределами, включая ИК, УФ, радиодиапазон и др.

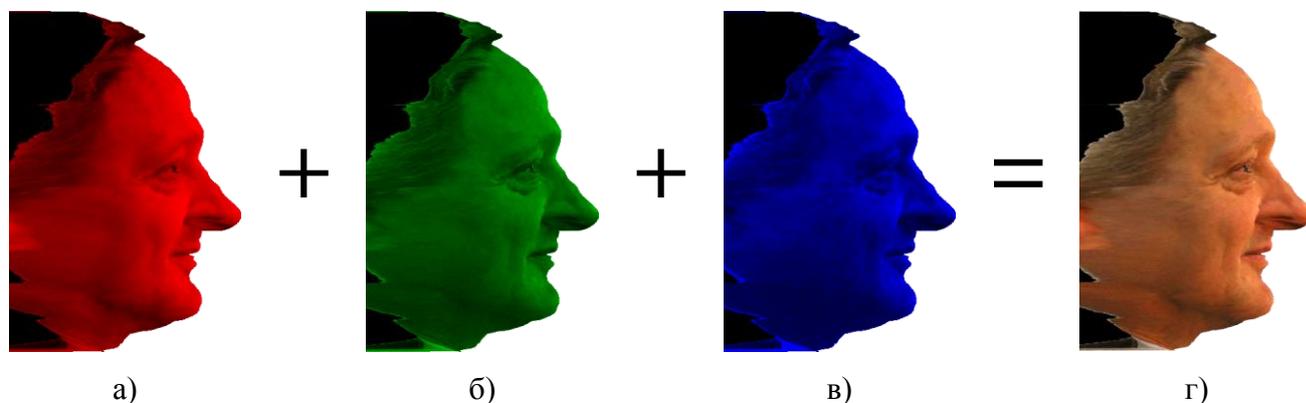


Рисунок 4.23 – Проекция восстановленного 3D объекта, с поворотом на  $90^\circ$  относительно оптической оси съёмки, восстановленного: а) в красном; б) в зелёном; в) синем участках спектра и г) совмещённое изображение в стандарте RGB

Лёгкость проведения операции введения новых спектральных компонент облегчает мультиплексирование и расширяет спектральный диапазон, создавая мультиспектральные 3D изображения. На рисунке 4.24б к трём показанным выше спектральным компонентам (рисунок 4.23г) добавлено 3D изображение в ИК диапазоне, на  $\lambda=9,5$  мкм, приведённое на рисунке 4.24а.

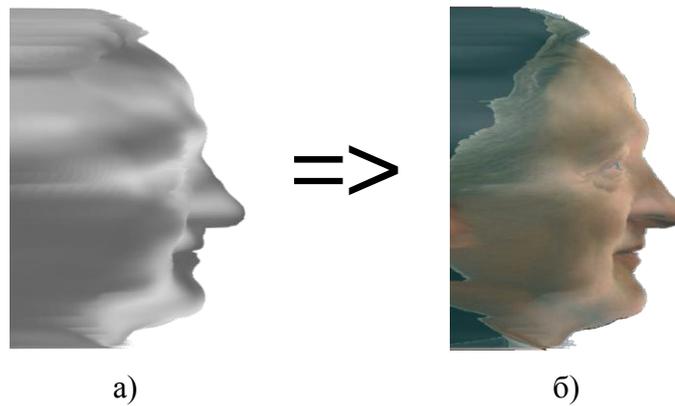


Рисунок 4.24 – Проекция восстановленного 3D объекта, с поворотом на  $90^\circ$  относительно оптической оси съёмки, восстановленного:  
а) в ИК; б) ИК, совмещённое с RGB (рисунок 4.23г)

Предложенная выше технология передачи по каналам связи информации, пригодная для создания мультиспектральных голограмм на приёмном конце канала связи, легко позволяет не только совмещать 3D изображения из разных участков электромагнитного спектра, но и комплексировать 3D сигналы разной физической природы.

### ***Выводы параграфа 4.1***

Показано, что паттерн структурированного света из параллельных полос, при падении на 3D поверхность, после его фотофиксации, образует структуру, аналогичную голографической решётке при записи голограмм. Причём такая структура настолько точно повторяет свойства голограмм, что просто увеличивая их частоту, аналогично увеличению несущей частоты голограммы (параграфы 2.2–2.4), её можно превращать в дифракционную структуру, аналогичную голограмме сфокусированных изображений, восстанавливающую 3D изображение объекта на заранее выбранной длине волны. Важно отметить, что простая система вертикальных полос порождает дифракционную структуру, которая восстанавливает 3D изображение, обладающее как горизонтальным, так и вертикальным параллаксом, т. е. является полноценной голограммой. На

поставленный в начале параграфа вопрос «Работает ли решётка из паттерна латерально освещающих объект голографирования вертикальных полос как голограмма и можно ли с её помощью получить не только горизонтальный, но и вертикальный параллакс 3D изображения объекта?», получен ответ – да, работает как голограмма, восстанавливающая, при дифракции на ней, с соблюдением условий Брэгга, опорного пучка, изображение 3D объекта, имеющее и вертикальный, и горизонтальный непрерывный параллакс.

Предлагаемый для этого метод создания дифракционных структур, подобных голограммам сфокусированных изображений, описанный в этом параграфе, обладает уникальной особенностью, поскольку позволяет создавать дифракционную структуру паттернов без прямого синтеза компьютерной голограммы, которое требует ресурсоёмких интегральных преобразований. Дифракция на такой структуре порождает несколько порядков, один из которых восстанавливает 3D изображение объекта, практически повторяющего изображение, создаваемое голограммой.

Показанную в параграфе технологию передачи информации о 3D объекте для синтеза его компьютерных голограмм можно развивать и далее, комплексируя электромагнитное и акустическое излучение. Например, можно создавать карту глубин акустической локацией, а текстуру регистрировать в любом диапазоне электромагнитного спектра, восстанавливая на приёмном конце канала связи такие 3D изображения в видимом диапазоне.

Использование подобных систем в задачах удалённой хирургии и в решении ряда других прикладных задач трудно переоценить.

#### **Параграф 4.2. Синтез радужной голограммы Стефана Бентона из маски и текстуры голографируемого объекта**

Как было показано в предыдущем параграфе 4.1, синтез голограммы на приёмном конце канала связи может быть осуществлён путём возвращения

устранённой несущей пространственной частоты на приёмном конце канала связи. Это можно сделать двумя путями, как показано на рисунке 4.22. Первый путь, описанный в патенте [1.94], состоит из последовательного выполнения этапов синтеза 1–2–3–6–7–8–9, приведённых на рисунке 4.22. Второй – путём введения несущей частоты в паттерн структурированного света (там же – рисунок 4.22, этапы 1–2–3–4–5). Оба варианта позволяют создать компьютерную голограмму на приёмном конце канала связи. Таким образом, в главе 2 настоящей работы показано как были синтезированы компьютерные голограммы Лейта и Упатниекса, хотя сам метод позволяет синтезировать любые типы голограмм. А в первом параграфе четвёртой главы приведены результаты численных экспериментов, показывающие реализуемость более простого алгоритма синтеза паттернов дифракционных структур, восстанавливающих 3D изображение объекта, аналогично синтезированным классическим образом компьютерным голограммам. Для реализации проектов голографического TV и 3D дополненной реальности необходимо доказать реализуемость классических аналоговых голограмм на основе синтезированных компьютерных или их эквивалента, описанных в предыдущем параграфе 4.1 паттернов структурированного света из латерально освещающих объект прямых полос. Для этого достаточно показать возможность синтеза только одного произвольного 3D голографического кадра, т. е. одной аналоговой голограммы, а затем доказать возможность передачи всей, необходимой для синтеза таких голограмм, информации с требуемой TV частотой кадровой развёртки. Дальнейшее развитие техники голографического TV и 3D дополненной реальности, а именно: разработка и создание голографических мониторов, выходит за границы настоящей работы, хотя и подводит к этим задачам вплотную.

Поскольку переданная описанным в главе 2 и в предыдущем параграфе 4.1 способом 3D голографическая информация, как было показано, обладает свойствами непрерывного горизонтального и вертикального параллакса, тип голограммы, синтезированной на приёмном конце канала связи, в принципе, может быть любым. Практическое создание аналоговых голограмм для

визуализации наиболее распространённых голографических дисплеев по схеме Ю. Н. Денисюка [1.9] затруднительно в процессе преобразования виртуальной голограммы в её материальный аналог. Поэтому при синтезе компьютерной голограммы [4.3] мы ориентировались на синтез голограмм по схеме Э. Лейта и Ю. Упатниекса. Синтез аналоговых голограмм этого типа сегодня возможен, но тоже содержит ряд технологических трудностей реализации поточечной записи больших массивов данных. Кроме того, этот тип голограмм не восстанавливается белым светом. Во-первых, потому, что спектральное размытие точек изображения  $\Delta y_\lambda$ , пропорциональное ширине спектра  $\Delta\lambda$  и расстоянию  $z$  от плоскости голограммы до точки голографируемого изображения, на удалении от голограммы имеет значительную протяжённость (4.1), где  $\theta_R$  – угол наклона опорного пучка:

$$\Delta y_\lambda \approx (\Delta\lambda/\lambda) \cdot z \cdot \theta_R, \quad (4.1)$$

а, во-вторых, угловой размер  $\theta$  источников белого света существенно больше лазерного источника, что также приводит к размытию точек восстановленного изображения  $\Delta y_\theta$  (4.2):

$$\Delta y_\theta \approx \theta \cdot z. \quad (4.2)$$

Для источника белого света ( $\Delta\lambda=\lambda$ ),  $\theta_R=0,1$  радиана с угловым размером светящегося тела  $\theta=1/50$ , удалённого на расстояние наилучшего видения ( $z=250$  мм) эти размытия составляют  $\Delta y_\lambda = 25$  мм и  $\Delta y_\theta = 5$  мм соответственно. Такое размытие не позволяет восстанавливать качественное изображение.

Из выражений (4.1, 4.2) видно, что величины обоих типов размытия пропорциональны расстоянию от изображения до голограммы, поэтому удобно остановиться на, так называемых, голограммах сфокусированного изображения [4.4], поскольку в них оно минимально. Также широко известна технология «радужных» голограмм [4.5], которые тоже могут восстанавливаться белым светом. Кроме того, в «радужных» голограммах уменьшается энтропия за счёт

устранения вертикального параллакса, что приводит к уменьшению количества информации в голограмме, избыток которой так мешает при передаче по каналам связи [2.9].

На Рисунке 4.25 приведена одноступенчатая схема записи радужной голограммы, а на рисунке 4.27 – её вариант для записи плоских цветных изображений.

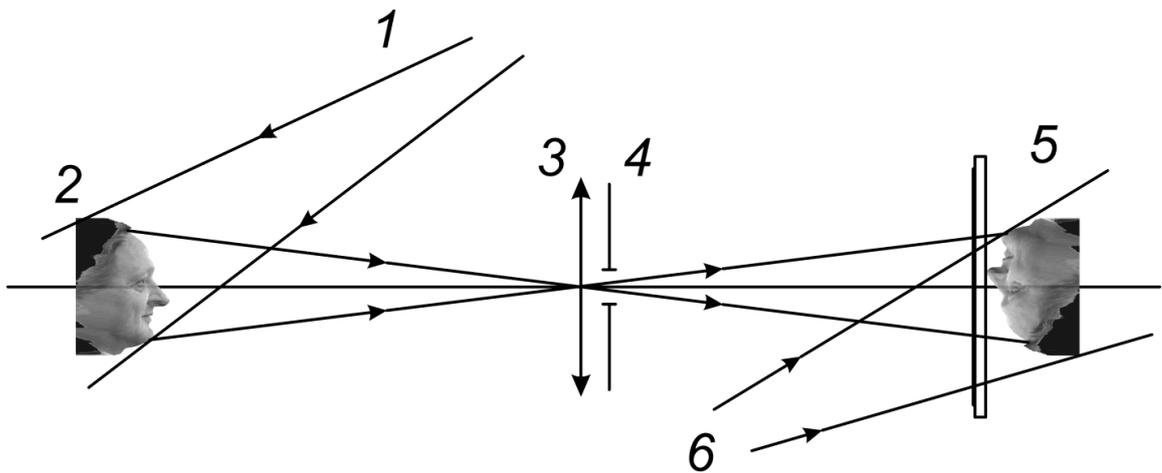


Рисунок 4.25 – Схема одноступенчатой записи радужной голограммы С. Бентона:

- 1 – излучение подсветки объекта, когерентное с опорным пучком 6,  
 2 – объект голографирования, 3 – объектив и 4 – фильтр вертикальных пространственных частот, 5 – голографическая пластинка

Изображение объекта голографирования 2, подсвеченного пучком 1, когерентным с 6, переносится на фотопластинку 5 через фильтр вертикальных пространственных частот 4 так, что, согласно [4.6], образуется радужная голограмма С. Бентона. Её спекл-структура вытянута по вертикальной оси и имеет полный набор горизонтальных пространственных частот (рисунок 4.26).

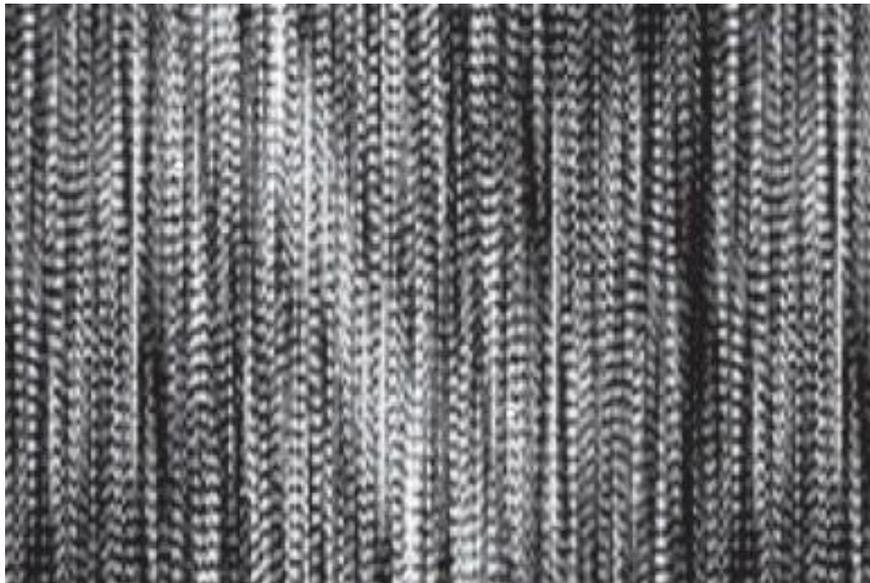


Рисунок 4.26 – Структура вытянутых вертикально спеклов радужных голограмм С. Бентона с ориентированными поперечно под разными углами интерференционными полосами, образованными интерференцией пространственно отфильтрованного объектного и опорного пучка по схеме (рисунок 4.25)

Такая голограмма содержит меньше информации об объекте, поскольку в ней отсутствует вертикальный параллакс и, в белом свете, она восстанавливает одноцветное изображение, переливающееся цветами радуги при вертикальном перемещении глаз наблюдателя. Её внешний вид подсказывает, что такую голограмму можно синтезировать с помощью набора столбцов, состоящих из коротких разнонаправленных отрезков.

Цветное изображение объекта можно получить, например, по схеме рисунка 4.27, где щелевой источник 3 со случайной фазовой маской 2 формирует объектную волну на голограмме 5 с пространственной модуляцией маской 4. Последняя выбирается из разных участков спектра записываемого плоского изображения согласованно с углом Брэгга  $\theta_S$  так, чтобы при восстановлении для каждой из записанных волн угол восстановления был одинаков [4.7].

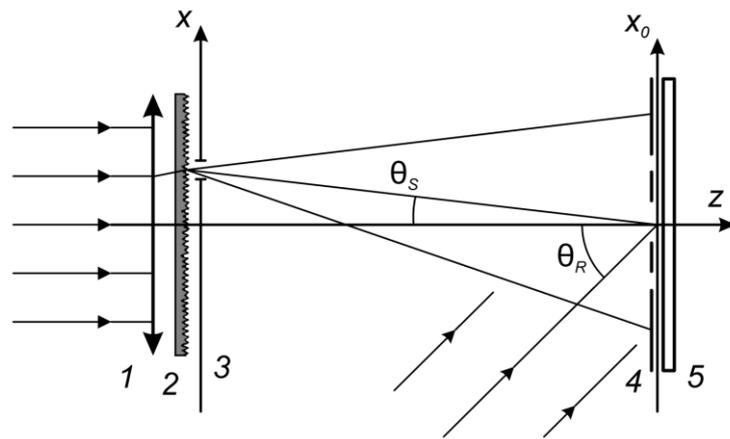


Рисунок 4.27 – Схема записи радужных голограмм сфокусированных изображений. Коллимированный пучок 1 через случайную фазовую маску 2 и горизонтальную щель 3 формирует вместе с транспарантом 4 объектный пучок на голограмму 5

Если в последней схеме записывать несколько плоских изображений, поворачивая между экспозициями фотопластинку относительно вертикальной оси, то при восстановлении каждое изображение будет восстанавливаться под своим углом, обеспечивая эффект параллакса (рисунок 4.28).

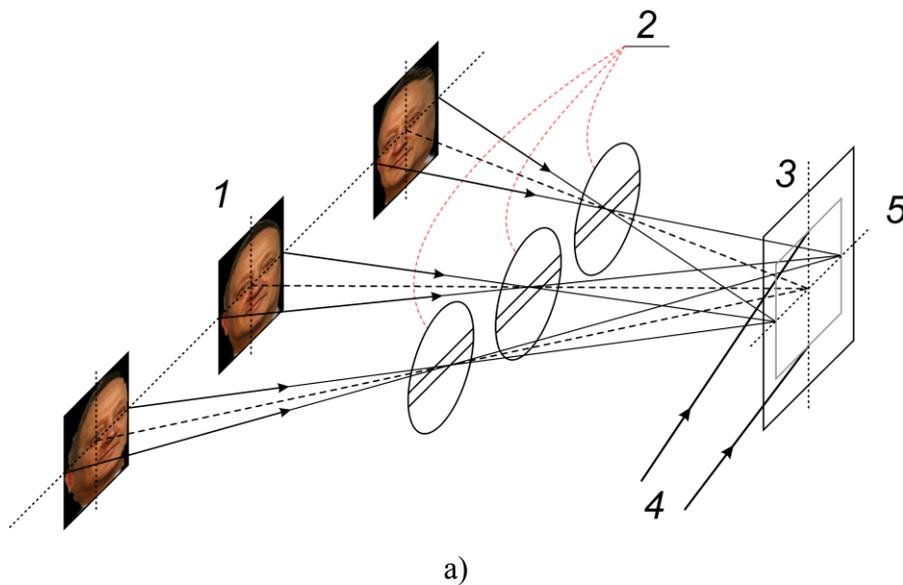


Рисунок 4.28 – а) схема записи голограмм сфокусированных изображений, пришедших из разных направлений, с фильтрацией щелевым фильтром; б) компиляция из 15 ракурсов изображения 3D объекта, полученных из проекций 3D объекта (рисунок 4.16)

Такие голограммы, будучи освещёнными пучком, аналогичным опорному, но с широким спектром, будут восстанавливать изображения, воспринимаемые наблюдателем как изображения, имеющие горизонтальный параллакс, их можно считать одним из возможных вариантов цветных 3D дисплеев.

Известно, что давно ведутся разработки ряда сложных оптико-механических схем, реализующих такие цветные дисплеи на основе радужных голограмм С. Бентона [4.8]. Однако такая запись, как правило, будет обладать малой селективностью по углу для тонких голограмм и малой ДЭ ввиду быстрого исчерпания динамического диапазона фотоотклика. Устранить эти недостатки можно в технологии Dot Matrix, когда фотопластинка разбивается на серию так называемых «голопикселей» [4.9] или «хогелей» [1.141], каждый из которых состоит, в свою очередь, из набора  $j$  участков по числу записываемых ракурсов. При этом на каждый  $j$  участок во всех голопикселях записывается плоское изображение только одного ракурса 3D изображения. При освещении полученной таким образом радужной голограммы сфокусированных изображений получается стереоэффект, обеспечивающий горизонтальный параллакс серии ракурсов цветных изображений исходного 3D объекта. Как отмечено выше, полученные в этом параграфе результаты по созданию аналоговых, материальных голограмм с дискретным параллаксом несколько не ограничивают результаты по синтезу голограмм с непрерывным параллаксом, поскольку основываются на голографировании полноценного 3D объекта, созданного на приёмном конце канала связи.

Ограничения используемой аппаратуры синтеза материальных голограмм, в данном случае, позволяли записывать голограммы с дискретным параллаксом. В следующем в параграфе (4.3) этот недостаток будет устранён.

### 4.2.1. Экспериментальная запись голограмм

Для первой экспериментальной записи аналоговой материальной голограммы была выбрана система KineMax MASTERING SYSTEM (Polish Holographic Systems, Warsaw, Poland) (рисунок 4.29) [4.10], в которой сложный набор оптических элементов был максимально заменён цифровым синтезом соответствующих дифракционных решёток.

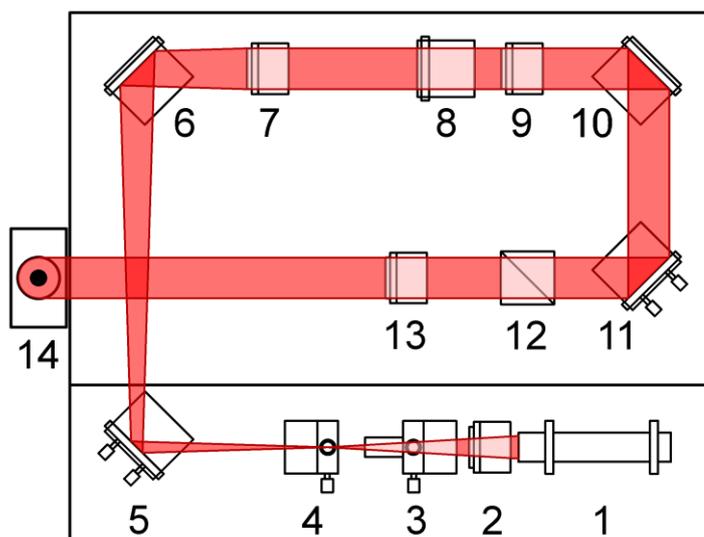


Рисунок 4.29 – Схема KineMax:

- 1 – лазерный модуль с блоком питания 405 нм 50 мВт. и электронным затвором;  
 2 – четвертьволновая пластинка; 3 – микрообъектив; 4 – точечная диафрагма; 5 – юстировочное зеркало; 6 – неподвижное зеркало; 7 – объектив; 8 – жидкокристаллический пространственный модулятор света (ЖК-ПМС) 1024×768 пикселей, рабочее поле 36,864×27,648 мм, период пикселей по горизонтали и вертикали 36 мкм; 9 – объектив; 10 – неподвижное зеркало;  
 11 – регулировочное зеркало; 12 – светоделительный поляризационный кубик;  
 13 – четвертьволновая пластинка; 14 – объектив со встроенной диафрагмой

Под объективом  $O_2$  находится перемещающийся по двум осям предметный столик, куда помещается пластинка с нанесённым на неё фоторезистом. Принципиальная оптическая схема устройства приведена на рисунке 4.30. Система объективов 7, 9 переносит изображение микродиафрагмы 4 в плоскость 14, являющейся задней фокальной плоскостью объектива 9. Оптическая система

9, 15 с уменьшением переносит изображение ЖК-ПМС на соответствующий участок фоторезиста 16. Пластика с фоторезистом перемещается с помощью прецизионного подвижного столика от кадра к кадру на платформе 17.

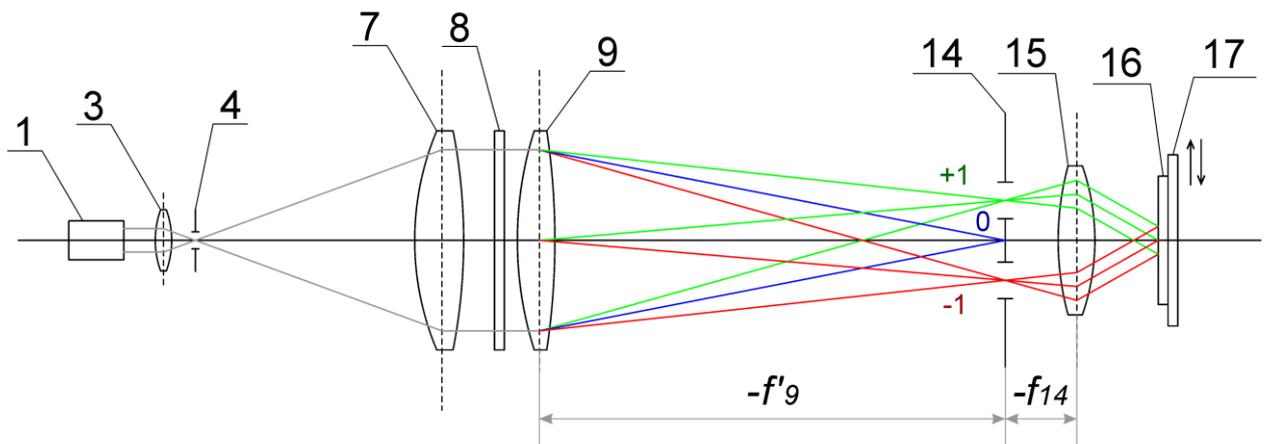
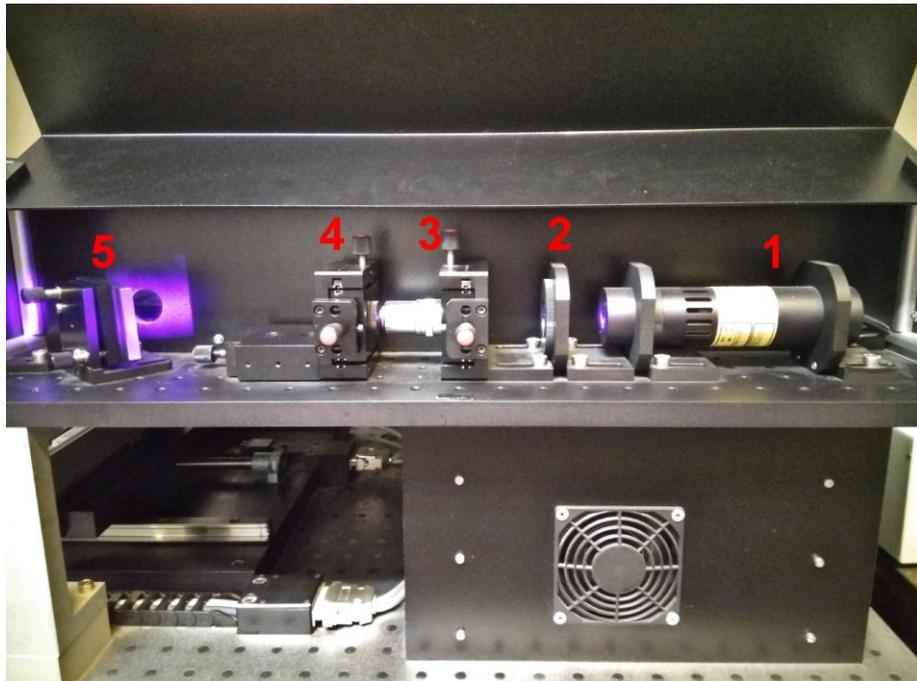


Рисунок 4.30 – Принципиальная оптическая схема KineMax:

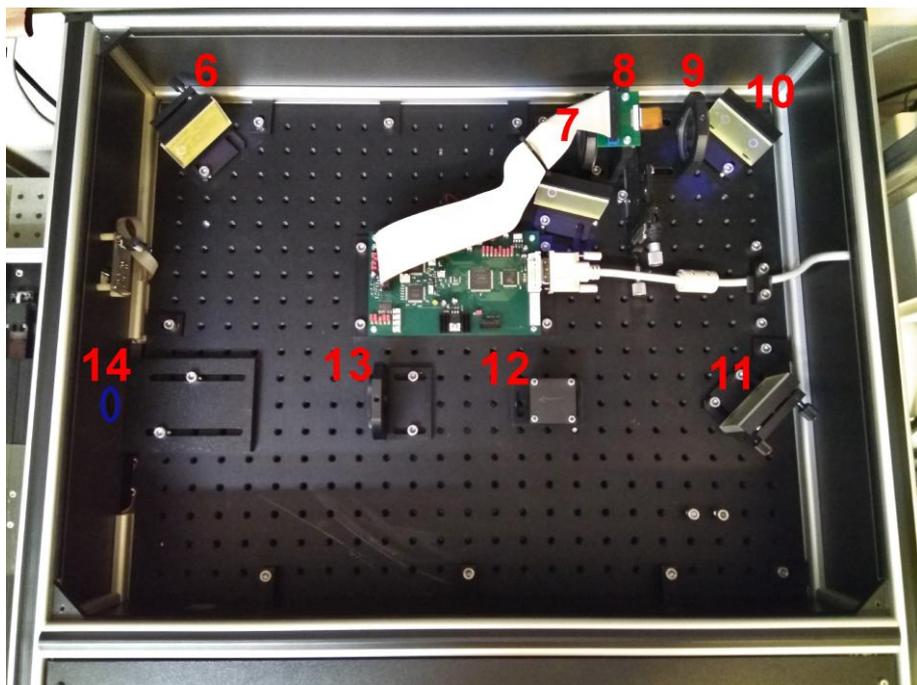
1 – лазер; 3 – микрообъектив; 4 – микродиафрагма; 7 – коллимирующий объектив; 8 – ЖК ПМС; 9 – объектив с задним фокальным отрезком  $-f'_9$ ; 14 – пространственно-частотный фильтр; 15 – проекционный объектив; 16 – фоторезист; 17 – прецизионный подвижный стол

Диафрагма 14 вырезает осевые пространственные гармоники, удваивая пространственную частоту голопикселей, подобно операции оптического дифференцирования [1.51].

Лазер и другие элементы схемы установлены на специальной платформе (рисунок 4.31а,б,в).



a)



b)



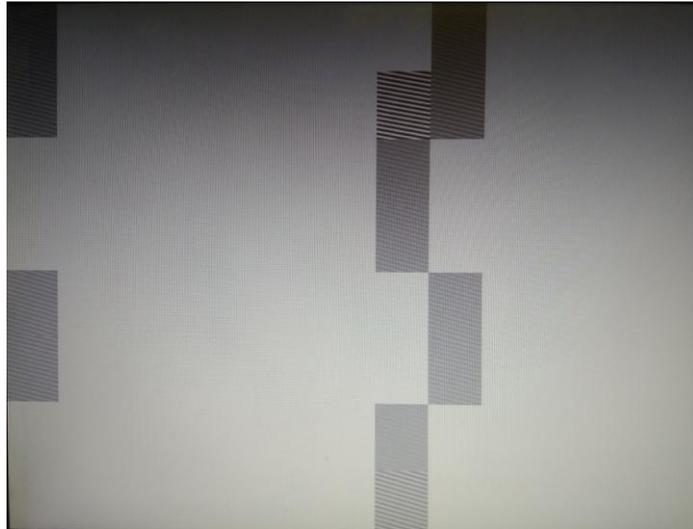
в)

Рисунок 4.31 – Устройство KineMax: а) 1 – лазерный модуль с блоком питания 405 нм 50 мВт и электронным затвором; 2 – четвертьволновая пластинка; 3 – микрообъектив; 4 – точечная диафрагма; 5 – юстировочное зеркало; б) 6 – неподвижное зеркало; 7 – коллимирующий объектив; 8 – ЖК-ПМС 1024×768 пикселей, рабочее поле 36,864×27,648 мм, период пикселей по горизонтали и вертикали 36 мкм; 9 – объектив; 10 – неподвижное зеркало; 11 – регулировочное зеркало; 12 – светоделительный поляризационный кубик; 13 – четвертьволновая пластинка; 14 – объектив со встроенной диафрагмой; в) 15 – поворотная призма, 16 – слой фоторезиста на стеклянной подложке, 17 – стол с управляемыми механическими подвижками

На рисунке 4.31а показано расположение первого блока оптических элементов, формирующих лазерный пучок, освещающий ЖК-ПМС (см. рисунок 4.30{1–5}). На рисунке 4.31б показано, как на основном участке оптической плиты расположены узлы, формирующие структуры голопикселей с помощью управляемого ЖК-ПМС и проекционной оптики. На рисунке 4.31в показана оптико-механическая система, обеспечивающая сканирование пластинки с фоторезистом (16) с помощью перемещающегося в ортогональных направлениях стола с механическими подвижками (17), обеспечивающая смещение пластинки с фоторезистом от кадра к кадру, каждый из которых

состоит из своей группы голопикселей в поле изображения, формируемого объективом (14).

Компьютер формирует на управляемом ЖК-ПМС структуры из наборов параллельных интерференционных полос, которые по частям собираются в массивы (рисунок 4.32), называемые голопикселями, образуя группы из квазинепрерывных полос, аналогично приведённым на рисунке 4.26.



а)



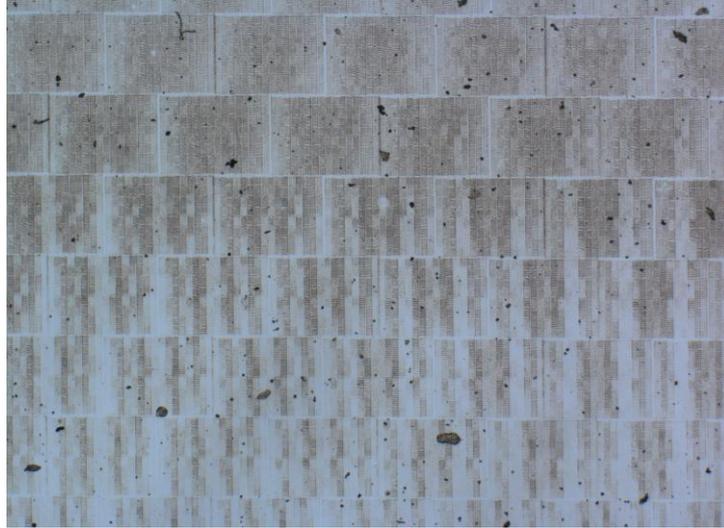
б)

Рисунок 4.32 – Структуры голопикселей, формируемые на ЖК-ПМС:

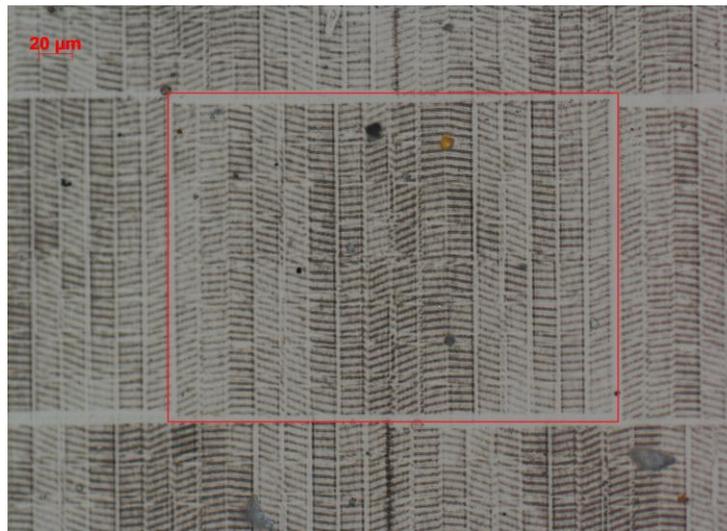
а) в начале расчётов; б) ближе к концу расчётов голографической структуры

Сформированные управляемым ЖК-ПМС кадры, которые могут состоять из нескольких голопикселей, в соответствии с программой их записи,

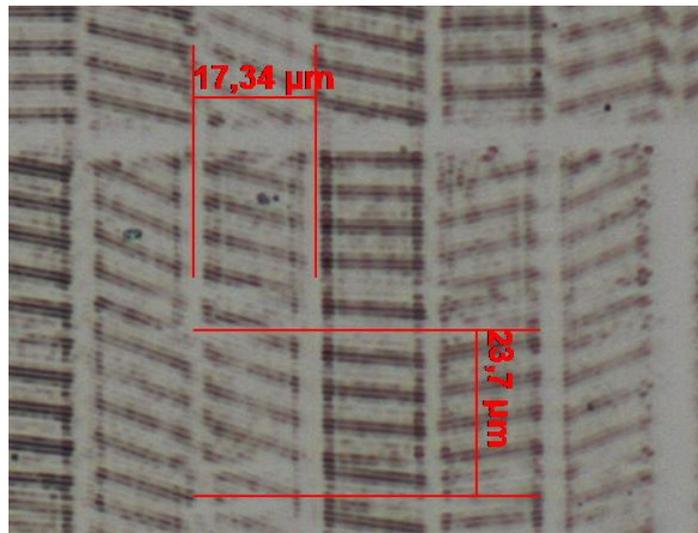
последовательно, перемещением двухкоординатного столика, экспонируются на участки фоторезиста. Фотографии записанной на фоторезисте структуры приведены на рисунке 4.33.



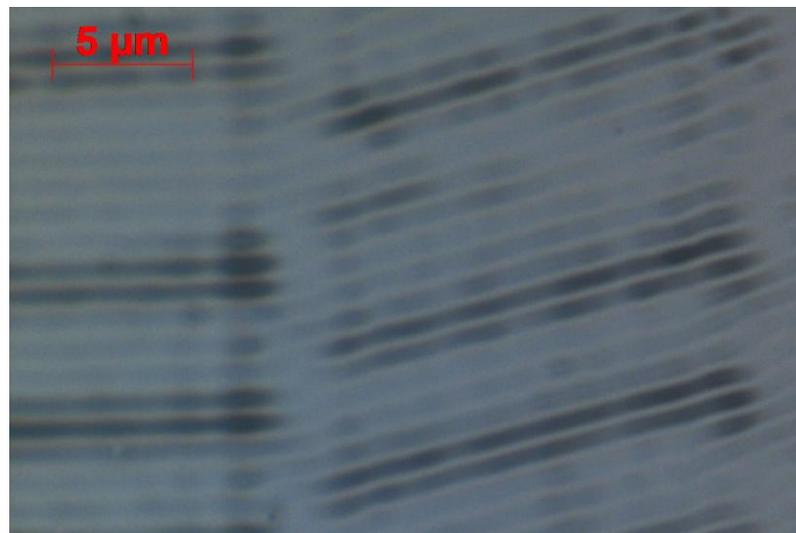
а)



б)



в)



г)

Рисунок 4.33 – Записанные на фоторезист голопиксели: а) массив голопикселей; б) один голопиксель, размером  $200 \times 270$  мкм; в) элемент голопикселя, размером  $17,3 \times 23,7$  мкм, формирующий один вектор дифракции восстановленной голограммой волны; г) структура полос голопикселя с максимальным увеличением

На рисунке 4.33а видна структура участка голограммы, состоящая из массива голопикселей. Каждый голопиксель представляет собой набор голографических решёток, сформированных одним кадром ЖК ПМС. На рисунке 4.33б приведён один голопиксель, размером  $200 \times 270$  мкм, на котором видна структура полос, созданная одним кадром ЖК ПМС, подобная структуре на рисунке 4.32б и рисунке 4.26. Структура на рисунке 4.32в иллюстрирует размеры субпикселя, формирующего один вектор направления дифракции

восстановленной волны размером  $17,3 \times 23,7$  мкм. На рисунке 4.33г видна структура полос, образующих субпиксель. Виден период полос и количество отсчётов, приходящихся на одну интерференционную полосу. Согласно критерию Найквиста, их должно быть больше двух, мы наблюдаем около шести. Такая голограмма будет восстанавливаться достаточно качественно. Видно, что полученные расчётным путём, спроецированные на фоторезист и проявленные на нём структуры, состоящие из вертикальных отрезков с ориентированными поперечно под разными углами полосами (рисунок 4.32, 4.33) очень похожи на полученные в классической схеме С. Бентона (рисунок 4.26).

Записанная на фоторезист структура из синтезированных по виртуальной голограмме, рассчитанной ранее, образует голограмму записанного на ней 3D портрета человека.

#### ***4.2.2. Восстановление 3D изображения голограммой***

Общий вид голограммы, полученной на устройстве KineMax, приведён на рисунке 4.34.

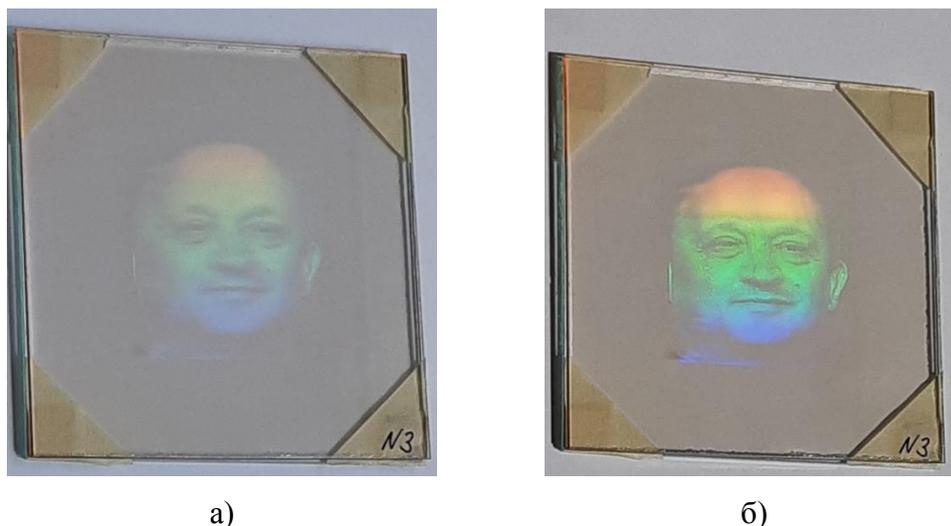


Рисунок 4.34 – Радужная голограмма 3D живого объекта в солнечном свете:

а) – свет, рассеянный облаком в солнечный день; б) – прямой солнечный

На рисунке 4.35 приведены изображения, восстановленные этой голограммой. Серией фотографий восстановленного голограммой 3D изображения с разных ракурсов при использовании схемы измерения (параграф 2.5) показан параллакс.

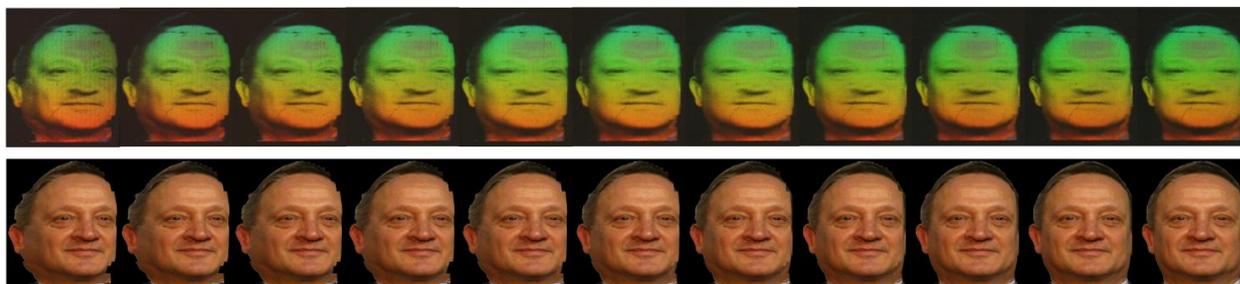


Рисунок 4.35 – Восстановленные голограммой изображения 3D объекта в проекции (верхний ряд); проекции 3D объекта, использованные для записи радужной голограммы (нижний ряд)

На рисунке 4.36 видно, что восстановленные таким образом изображения реально обладают эффектом параллакса. Величина параллакса, непосредственно восстановленного голограммой изображения, была измерена с помощью выноса изображения из плоскости голограммы телескопической системой [2.25]. Её схема приведена на рисунке 4.37.

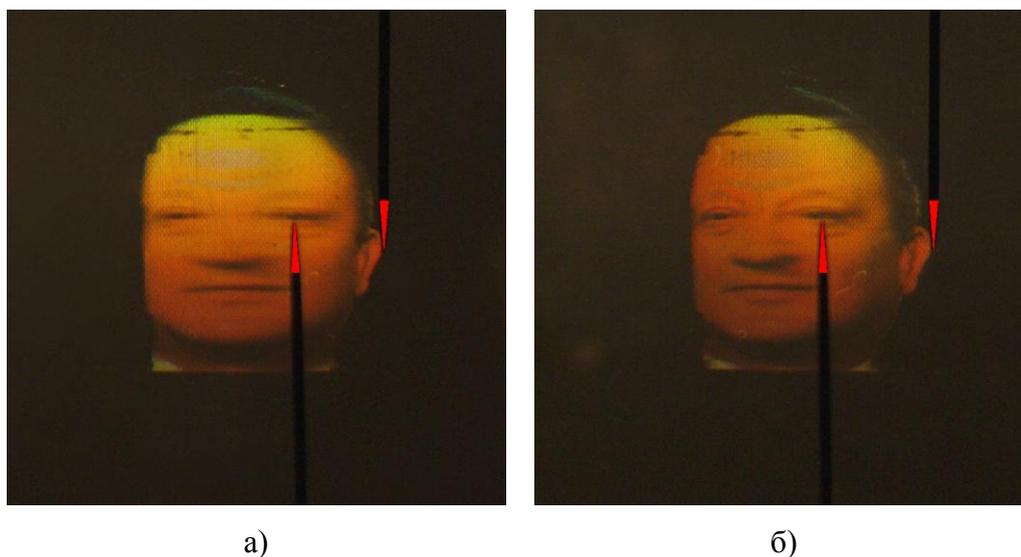


Рисунок 4.36 – Измерение параллакса, восстановленного голограммой изображения путём его выноса в пространство измерений а) анфас, б) правый полупрофиль

Параллакс изображения, восстановленного голограммой, наблюдается в пространстве вынесенного телескопической системой изображения, перед силовым объективом телескопической системы [4.11] и регистрировался серией снимков фотокамерой под разными углами (рисунок 4.37). Тестовыми приспособлениями служили мерительные маркеры (две иглы), разнесённые на глубину объекта вдоль оптической оси стенда, где производилось восстановление 3D изображения голограммой. Верхняя – ближе к голограмме вдоль оптической оси, нижняя – дальше. Схема измерений представлена на рисунке 4.37.

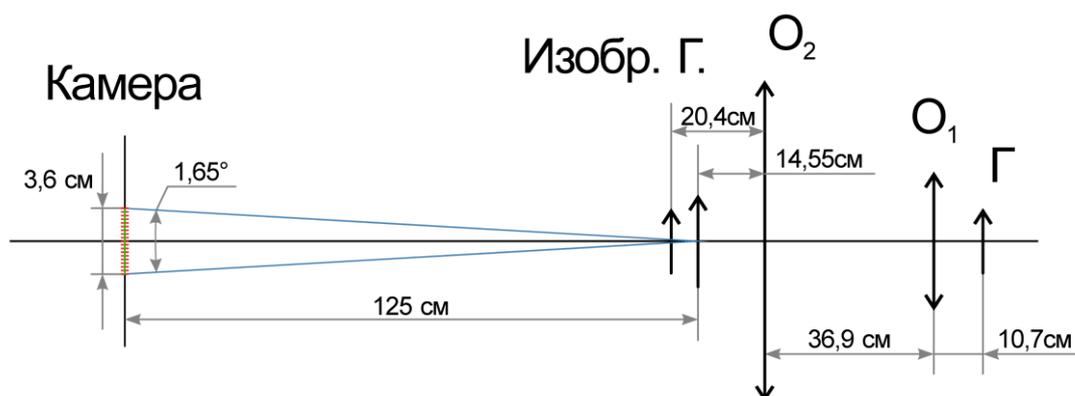


Рисунок 4.37 – Схема измерения параллакса, восстановленного голограммой изображения  
Г – голограмма,  $O_1$  и  $O_2$  – объективы телескопической системы

Положение мерительных маркеров выбиралось такое, чтобы при изменении угла поворота восстановленного изображения их острия практически не смещались с выбранной опорной точки на объекте. Расстояние между мерительными маркерами измерялось и равно 5,85 мм. Телескопическая система имеет продольное увеличение 9-крат (рисунок 4.37), что соответствует глубине восстановленного голограммой изображения, равной 0,65 мм. Измеренный параллакс составлял  $9,7^\circ$ . При дальнейшем увеличении угла мешали aberrации использованной оптической телескопической системы, состоящей из неспециализированных объективов. Однако, эти технические ограничения не имеют принципиального значения в доказательстве наличия параллакса в изображении, восстановленном голограммой, синтезированной по принятой на конце канала связи 3D голографической информации. На основе полученных

результатов, показывающих принципиально существование параллакса, и работы [2.28], в которой доказано, что бителецентрические оптические системы могут быть настолько точными, что возможно их применение для метрологических задач, может быть сформулировано отдельное техническое задание на разработку соответствующей бителецентрической проекционной системы в рамках самостоятельного предмета исследования.

### ***Выводы параграфа 4.2***

Таким образом, экспериментально было показано наличие параллакса в изображении, восстановленном радужной голограммой, записанной на приёмном конце канала связи, по маске, сформированной паттернами структурированного света и текстуре поверхности голографируемого живого объекта в соответствии с описанной в главе 2 методом, защищённым патентом RU2707582C1. Зарегистрированное на голограмме с помощью паттернов структурированного света из параллельных полос изображение является 3D изображением исходного живого объекта.

### **Параграф 4.3. Синтез голограммы 3D объекта с непрерывным параллаксом**

В предыдущем параграфе 4.2 и в [4.12] приведены результаты первых опытов по сжатию голографической информации, путём передачи двух основных модальностей 3D изображения – карты высот и текстуры, голографической информации. Такая передача 3D голографической информации по своей сути похожа, хотя и имеет существенные отличия, на известную в радиотехнике передачу информации на одной боковой полосе (SSB), когда в голографии несущая частота отвечает за дифракцию восстанавливаемого голограммой 3D изображения объекта в нужный порядок, а модуляция голографируемым объектом предметного пучка – за девиацию пространственных частот.

В технологии проекционной системы Dot Matrix [4.10] запись голограммы осуществлялась последовательной проекцией на носитель фрагментов компьютерной полиграммы (многокурсное развитие стереограммы), рассчитанной по набору плоских ракурсных фотографий принятого на приёмном конце канала связи 3D изображения объекта.

Хотя описанная в параграфе 4.2 голограмма и создаёт эффект горизонтального параллакса при повороте голограммы вокруг вертикальной оси, но в каждый момент времени наблюдатель видит одну из плоских картин – одну из проекций 3D объекта. Это хорошо работает, создавая иллюзию 3D в маленьких ( $\varnothing \sim 20$  мм) защитных голограммах, но очень бросается в глаза в голограммах размером уже больше  $4 \div 5$  см, не говоря уже о портретах в натуральную величину. На голограммах больших размеров становится явно видно восстановление в каждый угол плоских фотографических изображений. Другими словами, способ восприятия объёма аккомодацией глаза и окклюзией в них не работает, а остаётся только параллакс движения. И хотя на приёмный конец канала связи нами была передана полная информация, достаточная для синтеза голограммы, восстанавливающей полноценное 3D изображение с непрерывным параллаксом, технологическая необходимость уже на приёмном конце канала сначала превращать её в набор плоских картинок, хотя и с любым количеством изопрооекций, мешает восприятию полноценного 3D объёма.

В параграфе 4.4 настоящей главы будут представлены результаты практической передачи 3D голографической информации по радиоканалу связи. Поскольку в параграфе 4.4 экспериментально доказана возможность прямой передачи двух 2D изображений нужного качества с требуемой частотой смены кадров, последним этапом на пути демонстрации практической возможности передачи видеопотока 3D голографической информации является доказательство восстановления материальной голограммы по принятой на приёмном конце канала связи 3D информации. Другими словами, необходимо в эксперименте доказать, что предложенное внесение несущей пространственной частоты (или комбинации пространственных частот) в переданную 3D информацию об объекте

голографирования, в виде двух описанных модальностей, приводит к синтезу полноценной голограммы, восстанавливающей 3D изображение объекта с непрерывным, ограниченным только возможностями наблюдения, параллаксом.

Такая голограмма должна иметь ещё большее сходство с аналоговой голограммой с непрерывным параллаксом восстановленного 3D изображения, не ограниченного набором исходных ракурсов, закладываемых в расчёт голографической структуры, как было представлено в предыдущем параграфе 4.2 в технологии KineMax MASTERING SYSTEM.

Используемая с этой целью далее технология записи аналоговой голограммы, опирается не на дискретный набор проекций 3D объекта, а на полноценную 3D маску объекта голографирования, полученную на приёмном конце канала связи карту высот. В этом случае дискретизация восстановленного изображения будет ограничена не имманентными свойствами самого способа записи и заложенным заранее набором ракурсов, как это было сделано в предыдущем параграфе 4.2, а только мощностью вычислительной системы, обрабатывающей эту карту высот 3D объекта.

Один из вариантов синтеза компьютерной голограммы Э. Лейта и Ю. Упатниекса и восстановления ею 3D изображения сложного голографируемого объекта – портрета человека, был показан в численном виде в главе 2 настоящей работы [1.94, 4.13]. Другой вариант представлен в предыдущем параграфе 4.2 в виде материального объекта – радужной голограммы С. Бентона. В настоящем параграфе будет показан ещё один способ записи аналоговой материальной голограммы, как материальной копии компьютерной голограммы, синтезированной по образцу рассчитанной на приёмном конце канала связи [4.14].

Для большей убедительности того, что переданная указанным способом [1.94] 3D голографическая информация позволяет создавать на приёмном конце канала связи аналоговые материальные голограммы, аналогичные компьютерным, восстанавливающие 3D изображения голографируемого объекта с непрерывным параллаксом, была применена ещё одна технология записи голограмм,

непосредственно использующая для этого переданную по радиоканалу карту высот голографируемого 3D объекта. Следует уточнить, что понятие «непрерывный параллакс» здесь тоже является в некоторой степени условным, настолько, насколько непрерывным можно считать любое цифровое изображение. Мы далее будем говорить о непрерывном параллаксе, подразумевая, что он, на самом деле, является квазинепрерывным, но это «квази» определяется не свойствами самой переданной голографической информации, а только лишь точностью её представления в цифровом виде.

#### ***4.3.1. Запись голограмм и исследование их структуры***

В настоящем параграфе приведены результаты эксперимента по синтезу материальной голограммы уже не по набору плоских изопрооекций 3D объекта, а с использованием его (непрерывной) 3D маски (рисунок 2.15). На рисунке 2.15а – приведена текстура одного кадра поверхности живого, изменяющегося во времени, объекта с разрешающей способностью  $2000 \times 2000$  пикселей в кадре, т. е. превышающей стандарт Full HD. Здесь текстура приведена в серых тонах, хотя можно передавать и цветное изображение, например в стандарте RGB. На рисунке 2.15б – карта высот поверхности голографируемого 3D объекта, имитирующая его глубину в 256 слоёв, т. е. соответствующая по глубине цвета стандарту Full HD. На рисунке 2.15в приведена 3D маска, созданная по карте высот поверхности 3D объекта. На рисунке 4.38 приведены восстановленные голограммами 3D изображения. Голограммы рассчитывались по маске (рисунок 2.15б) методом, заявленным в [4.14, 4.15].

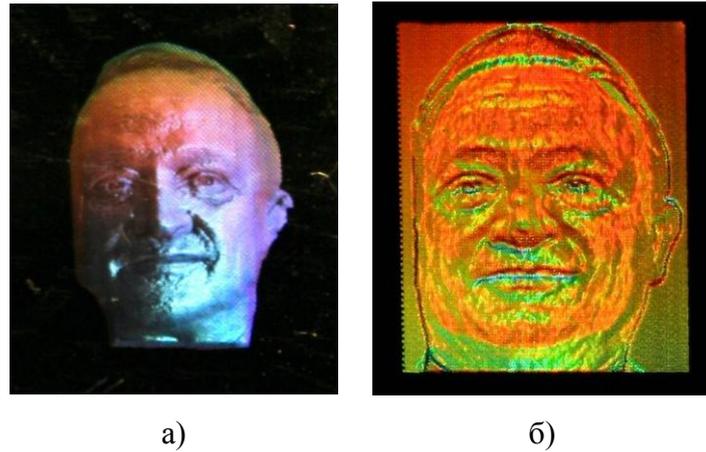


Рисунок 4.38 – Восстановленное изображение: а) голограммой, изготовленной в технологии Dot Matrix с регулярным расположением голопикселей со скважностью 1,5; б) голограммой в технологии Dot Matrix с нерегулярным расположением голопикселей в форме многоугольников, покрывающих всю 3D поверхность маски

Расчёт структуры голограмм в отличие от прямого преобразования Френеля и его интерференции с опорным пучком, и от расчёта радужной голограммы С. Бентона [4.10] в технологии проекционной системы Dot Matrix проводился с учётом угла наклона локальных участков 3D маски (рисунок 2.15б, в). В голограмме, восстанавливающей изображение (рисунок 4.38а), сначала находились нормали к поверхности маски (рисунок 2.15в), расположенные в узлах прямоугольной сетки, а затем по (4.3, 4.4) вычислялся период решётки голопикселя. В голограмме, восстанавливающей изображение (рисунок 4.38б), исходя из структуры поверхности маски, определялись участки примерно одинакового наклона в виде многоугольников (полигоны) и по их наклону, с помощью (4.3, 4.4), вычислялся период решётки для каждого полигона. В первом случае легче вводить изменение яркости, пропорциональное яркости текстуры (рисунок 2.15а) пропорциональным изменением площади соответствующего голопикселя, а во втором – можно получать бóльшую ДЭ [4.14, 4.15].

В обоих случаях решалось уравнение дифракции Брэгга в 3D пространстве (4.3), в котором по заданным волновым векторам восстанавливающей опорной волны  $k_r$  и восстановленной объектной  $k_o$  для каждого участка  $s$  поверхности 3D

объекта (маски) находился вектор решётки  $K_s$ , который затем проецировался на плоскость голограммы:

$$K_s = k_o - k_r. \quad (4.3)$$

Или по аналогии с дифракцией на кристаллах – решалась система линейных уравнений Лауэ [4.16], в которых направление дифракционных максимумов удовлетворяет одновременно условиям (4.4):

$$\begin{cases} d_x (\cos \varphi_x - \cos \xi_x) = M\lambda \\ d_y (\cos \varphi_y - \cos \xi_y) = N\lambda \end{cases}. \quad (4.4)$$

Здесь,  $d_x, d_y$  – проекции на соответствующие оси периодов синтезируемой голографической решётки;  $\varphi_x, \varphi_y$  – углы, образуемые падающим, а  $\xi_x, \xi_y$  – рассеянным излучением;  $\lambda$  – длина волны восстанавливающего излучения;  $M, N$  – целые числа. Таким образом, в рамках геометрической оптики решается обратная задача, когда по набору  $\xi_x, \xi_y$  и  $\varphi_x, \varphi_y$  для  $M = N = 1$  находились  $d_x, d_y$ , определяющие локальные значения периода  $d$  голографической решётки и её азимута для каждого локального участка голограммы площадью  $s$ , на которые она была предварительно разбита полигональной системой голопикселей.

В случае, когда  $s$  большое настолько, что можно пренебречь дифракционными эффектами, такая голограмма представляет собой киноформ со сложной структурой. Согласно условию дистанции Рэля (4.5), это выполняется, когда  $s \gg \lambda L_z$ , (или число зон Френеля  $m \gg 1$ ) где  $L_z$  – глубина объекта на  $s$ -ом участке его поверхности:

$$m = \frac{s}{\lambda L_z} \begin{cases} \ll 1 \rightarrow \text{дифракция Фраунгофера} \\ 1 \div 10 \rightarrow \text{дифракция Френеля} \\ \gg 1 \rightarrow \text{геометрическая оптика} \end{cases}. \quad (4.5)$$

В этом случае дифракция на таком участке не важна, и все расчёты по (4.3) соответствуют требованиям геометрической оптики. Этот случай соответствует

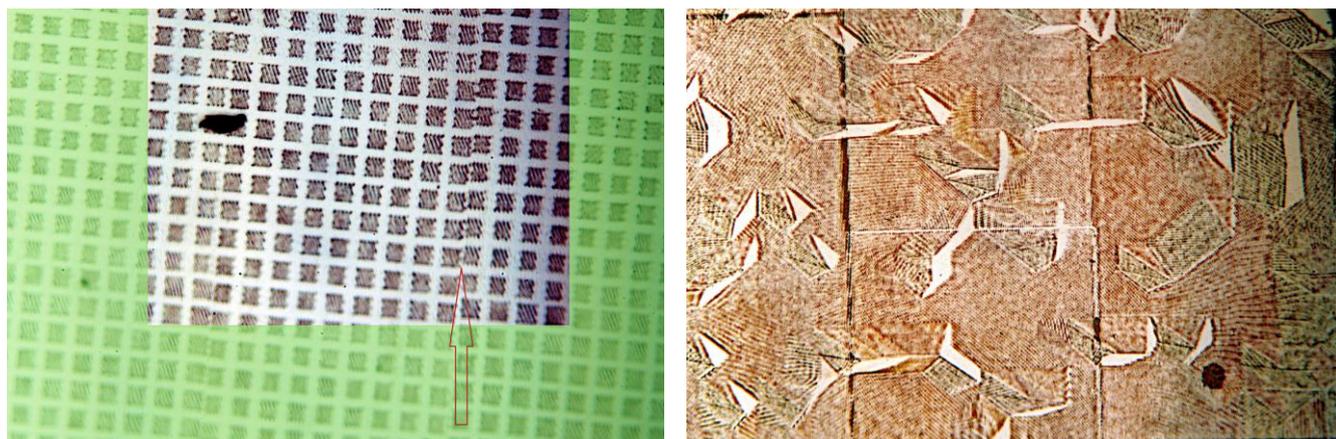
киноформной оптике, иногда называемой лито-голограммой. Видно, что такой киноформ хорошо работает при сравнительно небольших глубинах голографируемого 3D объекта. С ростом  $L_z$ , когда  $s \sim \lambda L_z$ , или  $s < \lambda L_z$ , дифракционным рассеянием уже нельзя пренебречь и голограмма больше соответствует эшелетту [4.14]. Для более полного соответствия технологии эшелеттов, обеспечивающей более яркое восстановленное изображение, необходимо выдерживать условие равенства наклона профиля полос и периода решётки таким образом, чтобы отражённый от наклонного участка полосы свет распространялся в ту же сторону, как и минус первый порядок дифракции на этой решётке [4.15]. Однако выдерживать такие соотношения для сложной голографической структуры полос невозможно, поскольку, выдерживая их для одного наклона голограммы, мы тем самым нарушаем их для другого. Поэтому такие голограммы будут восстанавливать 3D изображения яркими, но существующими в небольшом угловом пространстве.

Для записи голограммы, приведённой на рисунке 4.38а, была использована проекционная система «Dot Matrix» [4.15]. Соответствующая голограмма (её фрагмент на рисунке 4.39а) экспонируется небольшими участками – фреймами. Изображение системы полос выводится на жидкокристаллический пространственный модулятор, освещаемый лазером через формирователь пучка, и с уменьшением проецируется на регистрирующую среду. После экспозиции одного фрейма столик перемещается на его величину и снова записывается очередной участок системы полос. В зависимости от яркости изображения в каждой точке меняется площадь заполнения голопикселя решёткой. Таким образом, достигается модуляция яркости на голограмме согласно яркости соответствующих участков текстуры голографируемого объекта. В процессе записи фреймы с разрешением  $1920 \times 1080$  точек поочередно выводятся на ЖК модулятор и проецируются микрообъективом на фоточувствительную пластину с уменьшением до  $0,3 \times 0,169$  мм. Для синтеза голограммы потребовалось около  $10^6$  пикселей на 1 квадратный миллиметр её поверхности.

Голограмма (рисунок 4.39б) рассчитывается аналогично, но покрытие решётками поверхности фоторезиста осуществлялось непрерывно, как проекция полигонов, покрывающих 3D поверхность голографируемого объекта. В этой технологии повышается общая площадь дифракции и вместе с ней ДЭ синтезированной голограммы, но отсутствует прямая возможность изменять площадь полигонов, как в предыдущей технологии, что мешает изменять яркость участков голограммы пропорционально яркости используемой текстуры объекта. Более подробно измерения характеристик голограмм (рисунок 4.38) проводилось на специализированном оборудовании, разработки ИАЭ СО РАН [4.9].

#### ***4.3.2. Измерения характеристик голограмм, записанных по технологии «Dot Matrix»***

На рисунке 4.39а приведена микрофотография структуры голограммы, восстанавливающей 3D изображение (рисунок 4.38а). Размер голопикселя в виде квадрата с дифракционной решёткой внутри составляет 9,5 мкм. Период решётки в пикселях представленного сегмента по микрофотографии голограммы можно оценить как варьирующийся между 0,5 и 1 мкм. Сопряжение двух записываемых участков голограммы производилось механическим перемещением столика. Для этих размеров в видимом диапазоне длин волн ( $\lambda \sim 0,5$  мкм) для критерия Рэлея (4.5) выполняется условие числа открытых зон Френеля  $m < 1$  для всех глубин объекта  $L_z > 0,17$  мм. Таким образом, действительно, структура решётки (рисунок 4.39а), согласно критерию Рэлея, представляет собой дифракционную структуру (голограмму), а не эшелетт или литографическую структуру.



а)

б)

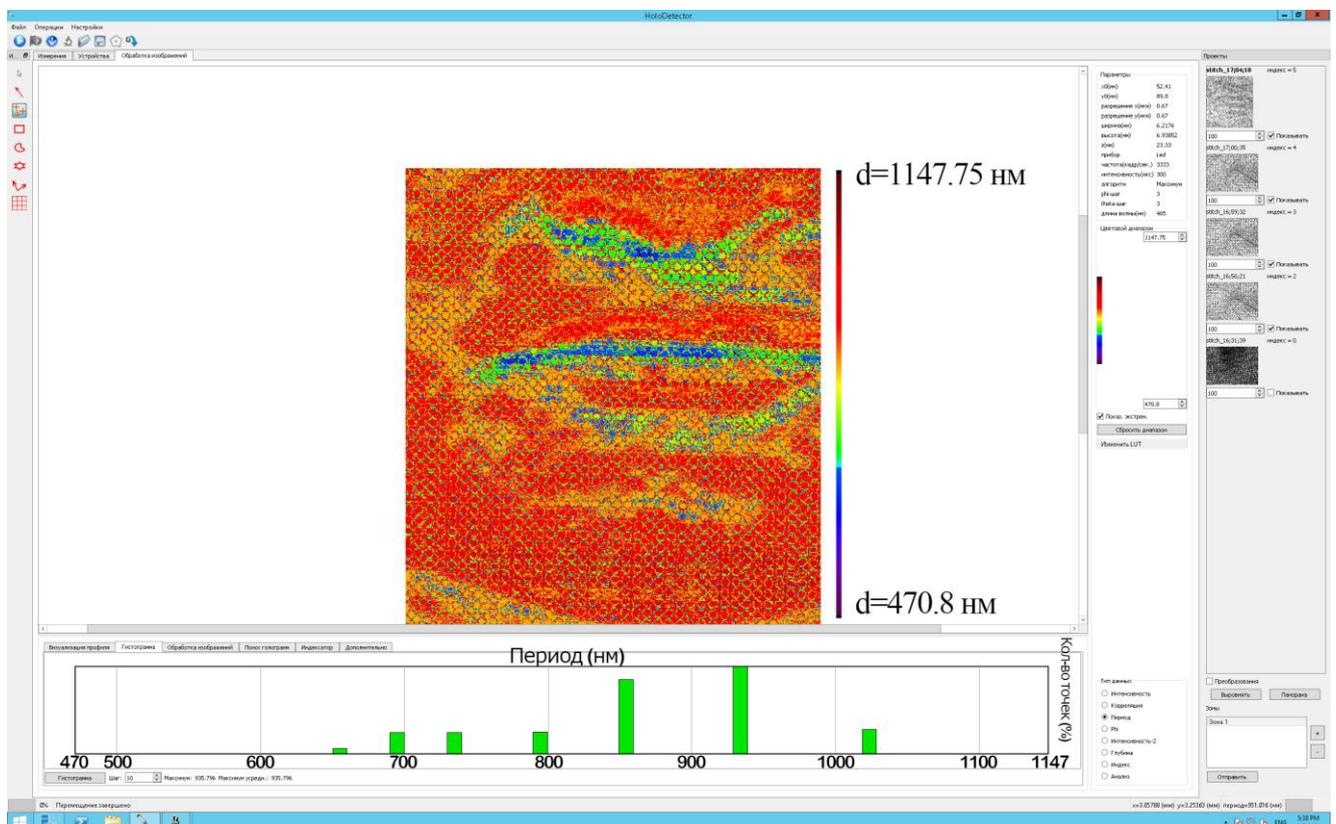
Рисунок 4.39 – Микрофотография структуры голограммы: а) восстанавливающей 3D изображение рисунок 4.38а; б) восстанавливающей 3D изображение рисунок 4.38б

Другой способ записи, заимствовавший разбиение 3D поверхности на треугольники из полигональной графики [4.17, 4.18], когда поверхность 3D объекта покрывается множеством треугольников с общими гранями, показан на рисунке 4.39б. В полигональной технологии три точки каждого треугольника задают поверхность 3D объекта. Каждый такой треугольник можно спроецировать на поверхность голограммы и создать на её поверхности дифракционную решётку (тоже по (4.3, 4.4)). Эшелетт при таких маленьких периодах решётки создавать трудно, хотя начальные шаги в этом направлении уже ведутся [4.19–4.21]. Подготовка технологии записи голографических решёток, приведённых на рисунке 4.39б, осуществлялась также в рамках работ [4.14, 4.15].

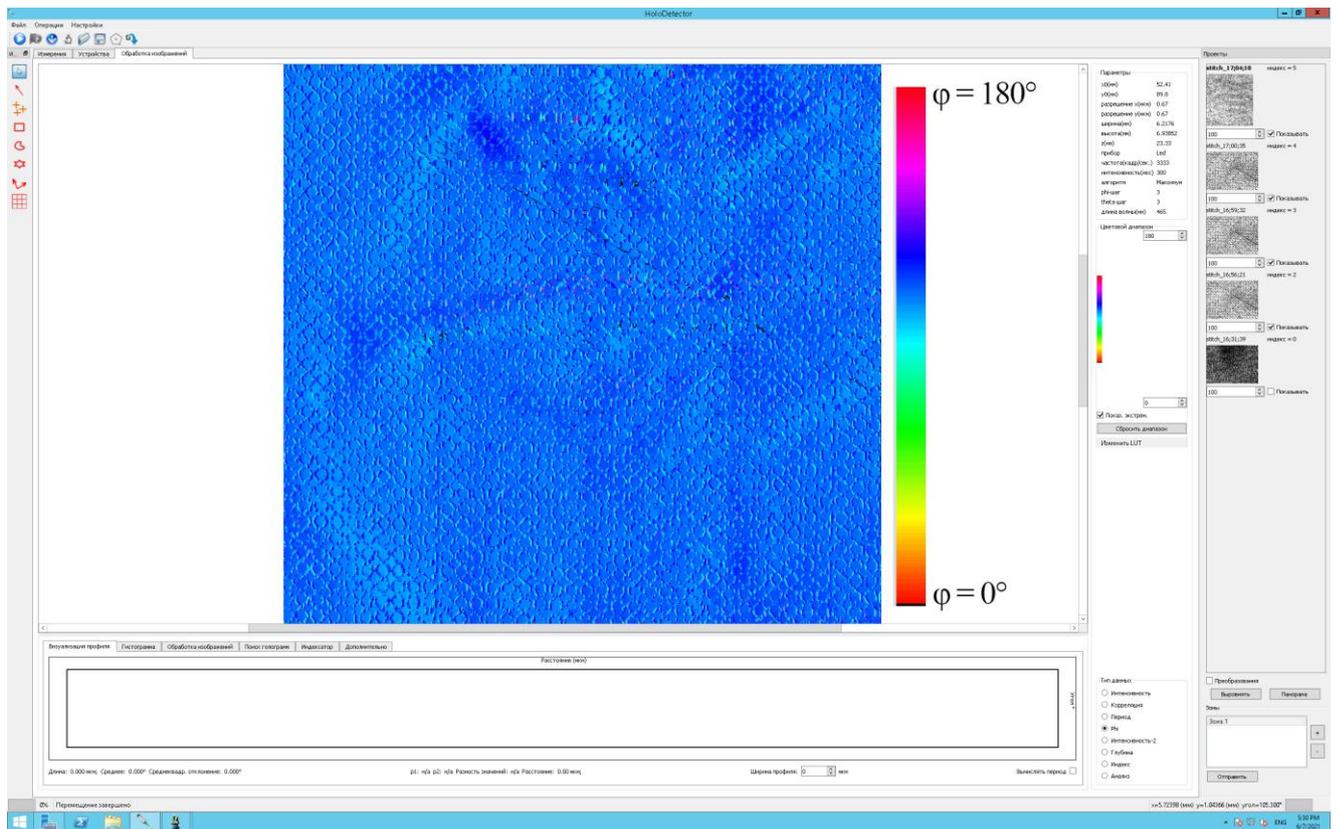
Такая голограмма, записанная набором дифракционных решёток, изменяющихся от полигона к полигону, приведена на рисунке 4.39б. На основе непрерывной карты высот создаётся объёмный объект, затем идёт операция сглаживания пиксельной структуры, затем текстурой создаётся матовая поверхность, а в конце на этот объект «натягивается» текстура решётки. Видно, что получаемая голографическая структура имеет дифракционный рельеф, однако в микроскоп также видны и пустоты, свободные от голографических решёток. Вероятно, это связано с тем, что некоторые сформированные пространственные

частоты были слишком большими и не смогли быть перенесены записывающей системой на фоторезист. Сравнение по формуле (4.5) реализованных размеров полигонов  $\{s \sim (17)^2 \text{ мкм}\}$ , несущих в себе различные дифракционные решётки, также показывает, что при записи голограмм с глубиной объекта голографирования  $L_z > 0,55 \text{ мм}$  условия дифракции вступают в силу на большей части голограммы, а при  $L_z > 1 \text{ мм}$  уже на всей её площади. Таким образом, представленные на рисунке 4.40а,б синтезированные дифракционные структуры являются полноценными голограммами. Можно считать, что таким образом в сигнал, сформированный переданными по каналу связи картой поверхности (маской) и текстурой была рассчитана и внесена несущая частота, на которой дифрагирует восстанавливающий пучок, формируя изображение записанного 3D кадра.

Структура микрорельефа голограммы на рисунке 4.40б, её полигоны имеют более сложную форму и для её объективного анализа нужно привлекать специальные системы, как, например, разработанная в ИАЭ СО РАН специальная система для анализа структуры рельефно-фазовых голограмм [4.22, 4.23].



а)



б)

Рисунок 4.40 – Статистика структуры решёток голограмм: а) по периоду; б) по азимуту

С её использованием можно примерно оценить (рисунок 4.40а,б) размеры треугольных полигонов, сечения которых, на рисунке 4.40а были определены как 10–20 мкм, средний период дифракционных решёток, заполняющих полигоны (см. шкалу  $d$ ) составлял от 0,47 мкм до 1,15 мкм.

Структура решёток голопикселей, как видно из рисунка 4.39 и рисунка 4.40, состоит из прямых линий. Каждый голопиксель представляет собой полигон размером от 17 до 34 мкм с решётками периодом от 0,47 до 1,15 мкм со средним периодом 0,9 мкм. Средний азимут направления решёток составляет  $110^\circ$  с девиацией  $\pm 6^\circ$ .

На рисунках 4.40а,б изменяющиеся параметры (период и направление решётки) закодированы цветом, по распределению которого на поле голограммы видно, что их структура почти по всей площади примерно одинакова. Небольшие отклонения возникают в характерных областях относительно резкого изменения глубины на поверхности объекта голографирования.

Из структуры голограммы, представленной на рисунке 4.39а,б, и измеренных характеристик (рисунок 4.40а,б) видно, что синтезированная голограмма обладает несущей частотой и её девиацией, что представлено как изменяющимся периодом, так и азимутом решёток. Это означает, что на приёмном конце канала связи была получена полноценная голограмма, у которой по (4.4),  $d_x, d_y$  определяют несущую частоту голографической дифракционной решётки при постоянных  $\xi_x, \xi_y$  и  $\varphi_x, \varphi_y$  и  $\lambda$ , а при изменении  $\xi_x, \xi_y$  и  $\varphi_x, \varphi_y$ , вызванном модуляцией опорного пучка объектным, наблюдается девиация  $d_x, d_y$ . Также видно, что несущая пространственная частота сравнительно легко может быть изменена. Как указывалось выше, это удобно для мультиплексирования 3D изображений, поскольку маска остаётся постоянной для любой текстуры, будь то видимое, ИК или УФ изображение. Так же легко реализуется расчёт голограммы с переносом 3D изображения из одного участка электромагнитного спектра в другой. Экспериментальные измерения характеристик, восстановленных такими голограммами 3D изображений приведены ниже.

#### ***4.3.3. Измерения характеристик восстановленных голограммами изображений***

У обеих голограмм (рисунок 4.39а,б) была измерена глубина восстановленного ими 3D изображения. Для этого, аналогично измерениям параграфа 4.2, использовалась бителецентрическая телескопическая система (рисунок 4.41), которая проецировала действительное изображение восстановленного 3D изображения в пространство перед объективом. В эту область проекции 3D изображения телескопической системы также помещались два мерительных маркера (две иглы). Путём их перемещения настраивались положения, когда при поперечном смещении устройства фоторегистрации концы маркеров не смещались относительно точек изображения.

С учётом продольного увеличения телескопической системы, пересчётом, определялось истинное продольное расстояние между двумя точками 3D объекта, восстановленного голограммой, и его истинный параллакс. Выбирая максимально удалённую точку и максимально приближённую, с учётом пересчёта по величине продольного увеличения, определяли глубину восстановленного голограммой изображения объекта.

Схема измерений приведена на рисунке 4.41.

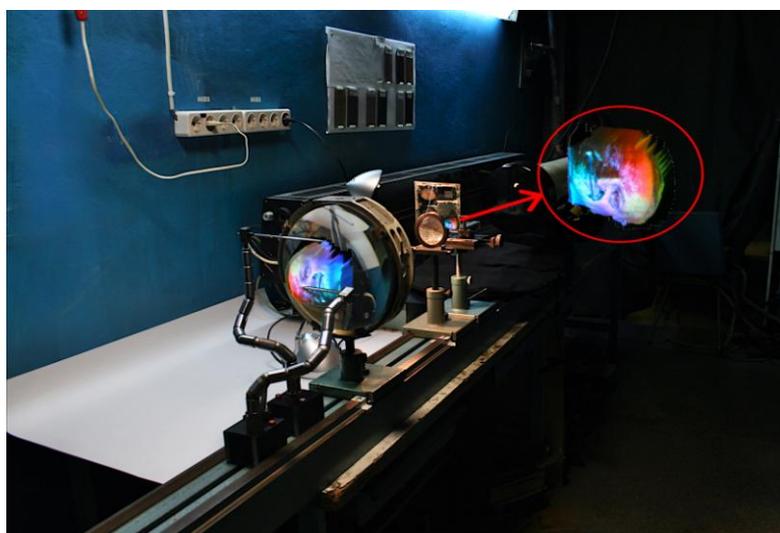
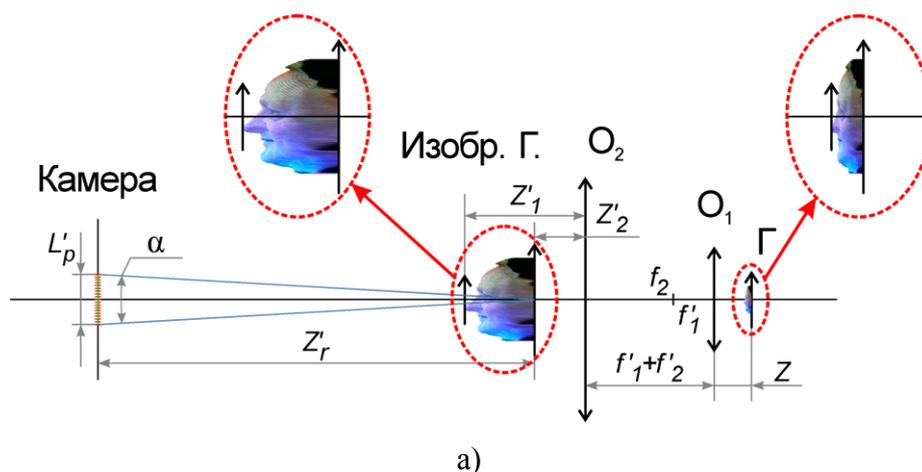
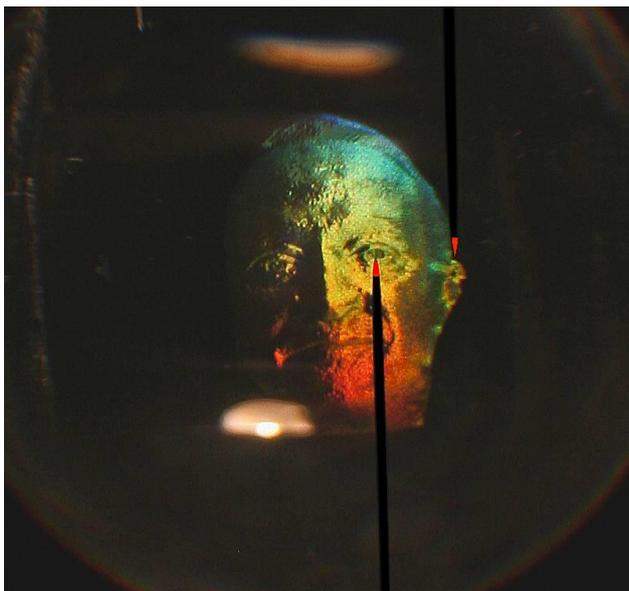


Рисунок 4.41 – Телескопическое измерение параллакса 3D изображения: а) телескопическая система  $O_1$  и  $O_2$ ; голограмма  $\Gamma$ ; изображение восстановленного объекта (ближний план  $z'_1$ , дальний план  $z'_2$ ); угол измеряемого параллакса  $\alpha$ ; б) фотография экспериментальной телескопической системы (за  $O_1$  в изображение оптической схемы для наглядности вмонтировано восстановленное голограммой 3D изображение объекта и это же изображение, увеличенное телескопической системой, вмонтировано перед  $O_2$ )

На рисунке 4.41 приведены: а) оптическая схема телескопической системы, позволяющая выносить в пространство измерений 3D изображение, восстановленное голограммой и б) фотография реально используемого телескопического устройства с добавленными в неё проекциями 3D изображений.

Объективы  $O_1$  и  $O_2$  образуют телескопическую систему. Голограмма  $\Gamma$  восстанавливает изображение 3D объекта на входе в телескопическую систему. Измерения параллакса проводятся регистрацией совмещённых с передним и задним планами 3D изображений мерительных маркеров камерой, перемещающейся поперёк оптической оси на  $L'_p$ .

На рисунке 4.42 приведены две фотографии восстановленного 3D изображения с мерительными маркерами, позволяющими определить глубину каждого изображения.



а)



б)

Рисунок 4.42 – Восстановленные изображения с мерительными маркерами в виде игл (нижний маркер ближе, верхний – дальше):

- а) для голограммы рисунка 4.39а, восстанавливающей 3D изображение рисунок 4.38а;
- б) для голограммы рисунка 4.39б, восстанавливающей 3D изображение рисунок 4.38б

Результаты измерений сведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Результаты измерений параллакса восстановленных изображений рисунок 4.42а и рисунок 4.42б

Голограмма	Рисунок 4.42а	Рисунок 4.42б
Восстановленное изображение	Рисунок 4.38а 	Рисунок 4.38б 
Поперечный размер объекта на голограмме (мм)	Высота – 20 Ширина – 14	Высота – 20 Ширина – 16
Кратность поперечного увеличения телескопа (крат)	3,1	3,1
Поперечный размер действительного изображения объекта, увеличенного телескопом (мм)	Высота – $20 \times 3,1 = 62$ Ширина – $14 \times 3,1 = 43,4$	Высота – $20 \times 3,1 = 62$ Ширина – $16 \times 3,1 = 49,6$
Продольный размер действительного изображения объекта, увеличенного телескопом (мм)	14 (измерено экспериментально)	32 (измерено экспериментально)
Пересчитанный продольный размер объекта, восстановленного голограммой (мм)	1,35 (вычислено в ZEMAX)	3,36 (вычислено в ZEMAX)
Параллакс действительного изображения, увеличенного телескопической системой (угловых градусов), измеренный	Диапазон перемещений $L'_p$ 15 кадров при шаге 4 мм = 60 мм, Расстояние до камеры $z'_r$ – 1250 мм. Угол наблюдения параллакса $\alpha = 2,75^\circ$	Диапазон перемещений $L'_p$ 8 кадров при шаге 4 мм = 32 мм, Расстояние $z'_r$ до камеры – 1250 мм. Угол наблюдения параллакса $\alpha = 1,47^\circ$
Параллакс действительного изображения, восстановленного голограммой (угловых градусов) без телескопической системы, вычисленный	Диапазон перемещений 17 кадров при шаге 4 мм = 68 мм, Расстояние от голограммы до камеры – 370 мм. Угол наблюдения параллакса $\alpha = 10,5^\circ$	Диапазон перемещений 15 кадров при шаге 4 мм = 60 мм, Расстояние от голограммы до камеры – 370 мм. Угол наблюдения параллакса $\alpha = 9,27^\circ$

Хотя измеренный параллакс полученных 3D голографических изображений, восстановленных реальными, реализованными в экспериментах по синтезу материальных голограмм, и не велик, но мы уверенно наблюдаем в этих голограммах непрерывный параллакс, требуемый для нормального восприятия объёма. Следует пояснить, что ограничения по измеренному угловому параллаксу  $10,5^\circ$  и  $9,27^\circ$  были связаны не с ограниченным параллаксом восстановленных

голограммами изображений объекта, а с проявляющимися при увеличении углов наблюдения полевыми aberrациями используемых неспециализированных объективов в оптической схеме (рисунок 4.41).

Для голограммы (рисунок 4.38а), восстанавливающей изображение (рисунок 4.42а), глубина восстановленного изображения составила  $\Delta_{\text{Рисунок 4.42а}} = z_1 - z_2 = 1,35$  мм при ширине объекта 14 мм, а для голограммы (рисунок 4.38б), восстанавливающей изображение рисунок 4.42б, глубина восстановленного изображения составляет  $\Delta_{\text{Рисунок 4.42б}} = z_1 - z_2 = 3,36$  мм соответственно. Это говорит о том, что созданные в рамках настоящего исследования голограммы, несущие один кадр 3D голографического сигнала, переданного с TV кадровой частотой, вполне удовлетворяют условиям объёмности восстанавливаемых ими изображений, хотя эти голограммы и были созданы численно и затем записаны в аналоговом виде уже на приёмном конце традиционного канала связи Wi-Fi.

В следующем параграфе будет экспериментально показано, что скорость передачи таких голограмм по радиоканалу удовлетворяет принятой TV частоте кадровой развёртки в 25 пар кадров (текстура + маска) в секунду.

### ***Выводы параграфа 4.3***

Экспериментально показана возможность практической реализации предложенного в патенте RU2707582C1 способа передачи 3D голографической информации с восстановлением на приёмном конце обычного канала связи 3D голографического изображения с непрерывным параллаксом. Вместе с работой о практической передаче голографической информации по радиоканалу, полученный в параграфе 4.3 результат является практическим доказательством возможности реализации сравнительно простого варианта передачи и восстановления на приёмном конце канала связи голографического TV контента и динамической 3D дополненной реальности. В случае появления голографического

монитора, эта технология позволит проводить 3D сеансы связи без использования специальных шлемов и насадок для глаз.

В технологии Pleno основное внимание уделяется энтропийным методам сжатия голографической информации, сохраняющим при передаче полную информацию, содержащуюся в голограмме, включая и несущую частоту. При таком подходе передача голографической информации по существующим радиоканалам принципиально невозможна. Разработанный нами метод двух модальностей без несущей частоты и его развитие в замене карты высот паттерном структурированного света из параллельных полос, является во-первых, менее ресурсоёмким, во-вторых, решает задачу передачи по существующим каналам связи глубоких действительных 3D динамических изображений с Full HD качеством, буквально живущих в пространстве наблюдателя, перед экраном голографического монитора. В следующем параграфе приведены результаты такой передачи.

#### **Параграф 4.4. Передача 3D голографической информации по радиоканалу**

При передаче голографической информации по каналам связи возникает проблема, связанная с большой ёмкостью голограмм [4.24]. В патенте RU 2707582 C1 [1.94] показана возможность эффективного сжатия голографической информации, аналогичная известной в радиоэлектронике передаче на одной боковой полосе. Экспериментальная передача такой сжатой информации по беспроводному каналу связи Wi-Fi с кадровой частотой больше 25 кадров в секунду показана в настоящем параграфе и изложена в материалах конференции [4.12, 4.25]. Проведён опыт передачи голографической информации 3D изображений по беспроводному каналу связи Wi-Fi 3D видео с помощью протокола FTP. Каждый передаваемый кадр 3D изображения представлял собой сумму двух 2D кадров – текстуры (2000×2000 пикселей) и маски (1000×1000 пикселей). Для передачи видеопоследовательности одновременно

передавались пакеты по 500 двойных кадров. Замеренное программой «FileZilla» время передачи этих пакетов кадров при воспроизведении в реальном времени показало, что передача полной голографической информации о 3D-объекте с кадровой частотой больше, чем 25 кадров/сек, вполне осуществима.

Как было показано выше, голографическое кино, созданное Виктором Григорьевичем Комаром, не может быть передано по радиоканалу ввиду огромного количества информации, записанной на каждом голографическом кадре (рисунок 4.43). Поскольку именно большой объём голографической информации стал одним из основных препятствий при разработке голографического TV и устройств 3D дополненной реальности [1.5, 1.6], нами были проведены прямые опыты по передаче 3D голографической информации и экспериментально подтверждена реализуемость разработанного метода.

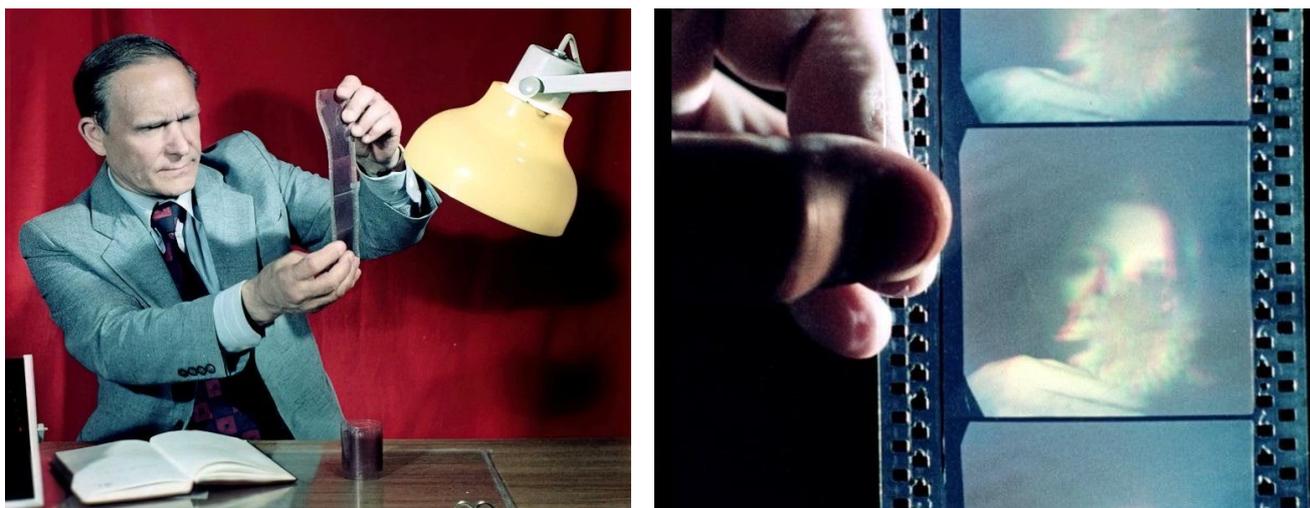


Рисунок 4.43 – Первая в мире голографическая кинолента

На рисунке 4.44 показан принцип формирования кадра для синтеза 3D голографического изображения на приёмном конце канала связи, а на рисунке 4.45 – его аппаратное обеспечение (см. параграф 4.4.1).

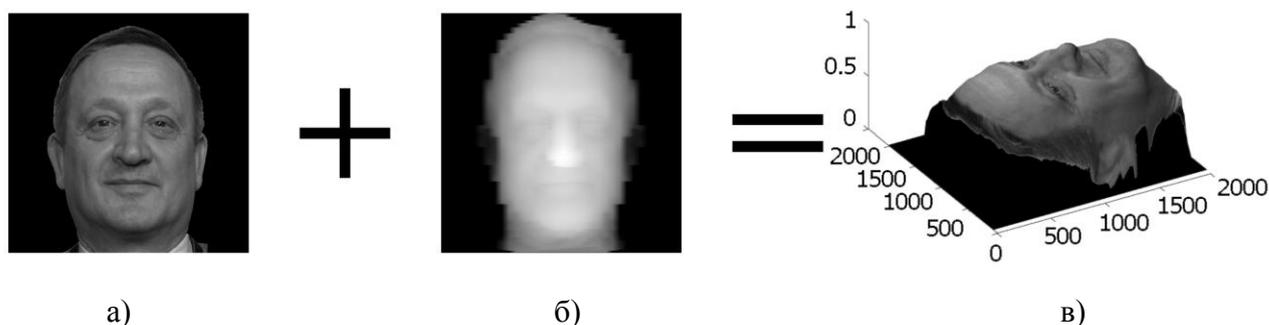


Рисунок 4.44 – Принцип формирования одного кадра 3D сюжета: а) текстура 3D объекта; б) карта высот 3D объекта (маска); в) синтезированная модель 3D объекта

Согласно [1.94], по каналу связи (блоки 4, 5 из рисунка 2.2) передаются две моды 3D изображения – топографическая карта высот (маска) и текстура, её покрывающая, что эквивалентно вычитанию несущей пространственной частоты голограмм и даже имеет более высокое качество восстановленного 3D изображения (рисунок 2.33), чем традиционная передача спектра.

Для задач дополненной реальности подходит широко распространённая и активно развивающаяся сегодня технология беспроводной передачи данных Wi-Fi. Далее описана техника эксперимента по передаче кадров по беспроводному каналу связи Wi-Fi с частотой больше 25 кадров/сек.

#### ***4.4.1. Техника эксперимента***

Для иллюстрации простоты и доступности указанного метода передачи голографической 3D информации выбраны доступные элементы гражданской бытовой аппаратуры. В качестве сервера использовалось мобильное устройство Xiaomi Mi A1 (на базе ОС Android 8). В качестве клиента – компьютер (сетевой контроллер Realtek RTL8111G материнской платы ASUS A88XM, процессор AMD Athlon X4 860K, оперативная память – 12 ГБ) с подключённым к нему через сетевой кабель (Ethernet) роутером (ELTEX NTE-RG-1421G-Wac rev. A1).

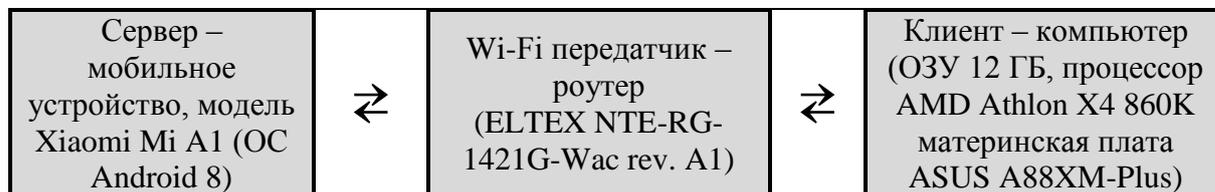


Рисунок 4.45 – Блок-схема передачи информации

Передача информации осуществлялась по стандарту IEEE 802.11n. Версия стандарта 802.11 для сетей Wi-Fi появилась в 2009 году и получила название Wi-Fi 4. Работает в диапазонах 2,4 и 5 ГГц (мы использовали диапазон 5 ГГц), теоретически позволяет достигать скоростей до 150 Мб/с при ширине канала 40 МГц на каждую независимую антенну [4.26]. В наших экспериментах было реализовано 90 Мб/с.

Такой беспроводной канал связи должен обеспечивать кадровую скорость передачи, достаточную для плавного восприятия наблюдателем голографического видео при его воспроизведении, т. е. как минимум – 25 кадров/сек, что и ставилось задачей экспериментальной проверки.

Программное соединение между двумя устройствами устанавливалось через протокол передачи файлов FTP (File Transfer Protocol). При таком типе соединения первое устройство является FTP-сервером, а второе – клиентом (подключается к серверу), при этом передача файлов может осуществляться в любом направлении.

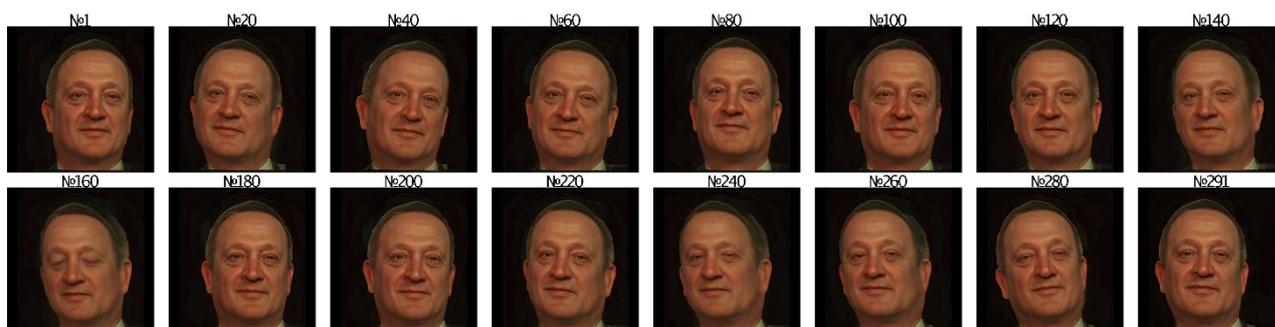
На PC использовалась программа для работы с FTP-серверами FileZilla, через неё отправлялись команды по передаче данных. После передачи данных программа возвращает общее время отправки файла, на основе чего определялась скорость передачи данных и частота кадровой развёртки.

На мобильном устройстве использовалось приложение ES-проводник (менеджер файлов – проводник), одной из функций которого является создание и работа с локальным FTP-сервером.

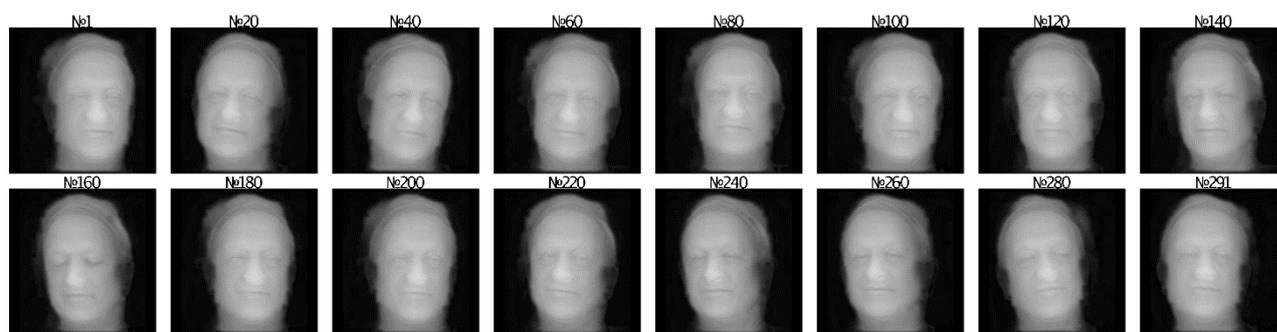
Как было показано в [2.9], для передачи полной информации о голографируемом объекте, необходимой для создания на приёмном конце канала связи полноценных динамически меняющихся 3D голограмм, достаточно передавать пары кадров – фотографию текстуры поверхности объекта плюс его 3D-карту поверхности (маску), с частотой принятой в TV кадровой развёртки. Ниже приведены полученные в эксперименте результаты по их передаче.

#### 4.4.2. Результаты эксперимента

В качестве 3D информации для голографического видео нами была использована серия из 291 кадра 3D – динамически меняющихся изображений живого человека [4.27]. Время съёмки зависит от используемой аппаратуры и поэтому не учитывалось. Фотографии некоторых кадров передаваемого видео, из передаваемой серии RGB кадров текстуры поверхности объекта и 3D-карты поверхности приведены на рисунке 4.46. В эксперименте использовались текстуры с разрешением от  $500 \times 500$  до  $2000 \times 2000$  пикселей и разные комбинации значений 3D-карты высот.



a)



б)

Рисунок 4.46 – Некоторые кадры передаваемой 3D-видео информации с изображением живого движущегося человека: а) текстура и б) карта высот (маска)

Простейшим способом передачи данных является прямая передача изображений. Изображения можно формировать с разной степенью сжатия. Без сжатия в формате BMP, со сжатием без потерь в формате PNG или со сжатием с потерями в формате JPEG.

Все кадры предварительно были подготовлены в форматах BMP (без сжатия), PNG (сжатие без потерь), JPEG (сжатие с потерями, 70 % качество). Эксперименты проводились для каждого из перечисленных форматов.

Размеры кадров с текстурой и маской выбраны в следующих комбинациях:

- 500×500 пикс. текстура + 500×500 пикс. маска;
- 1000×1000 пикс. текстура + 500×500 пикс. маска;
- 1000×1000 пикс. текстура + 1000×1000 пикс. маска;
- 2000×2000 пикс. текстура + 1000×1000 пикс. маска.
- 2000×2000 пикс. текстура + 2000×2000 пикс. маска.

Все наборы кадров, для удобства тестовой передачи, перед отправкой упаковывались в пакеты несжатых ZIP архивов.

На рисунке 4.47 показан интерфейс программы FileZilla, в которой фиксировалось время передачи пакетов с 3D-кадрами.

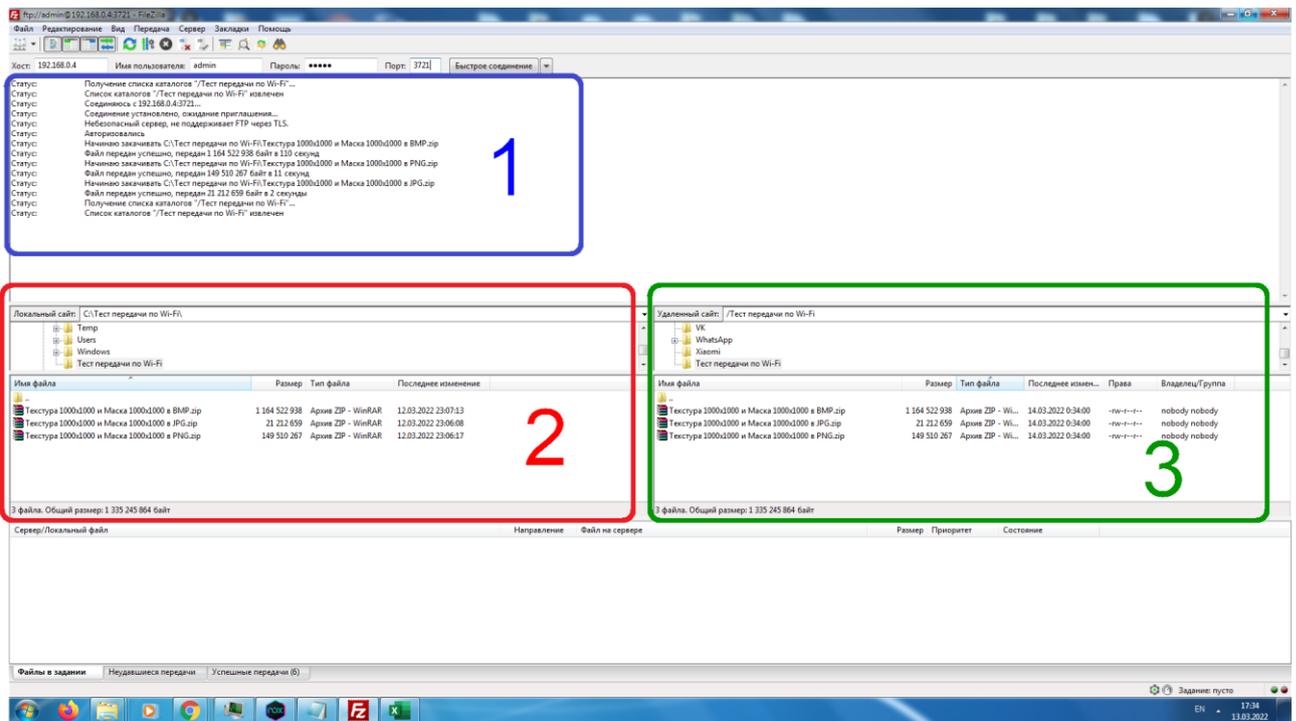
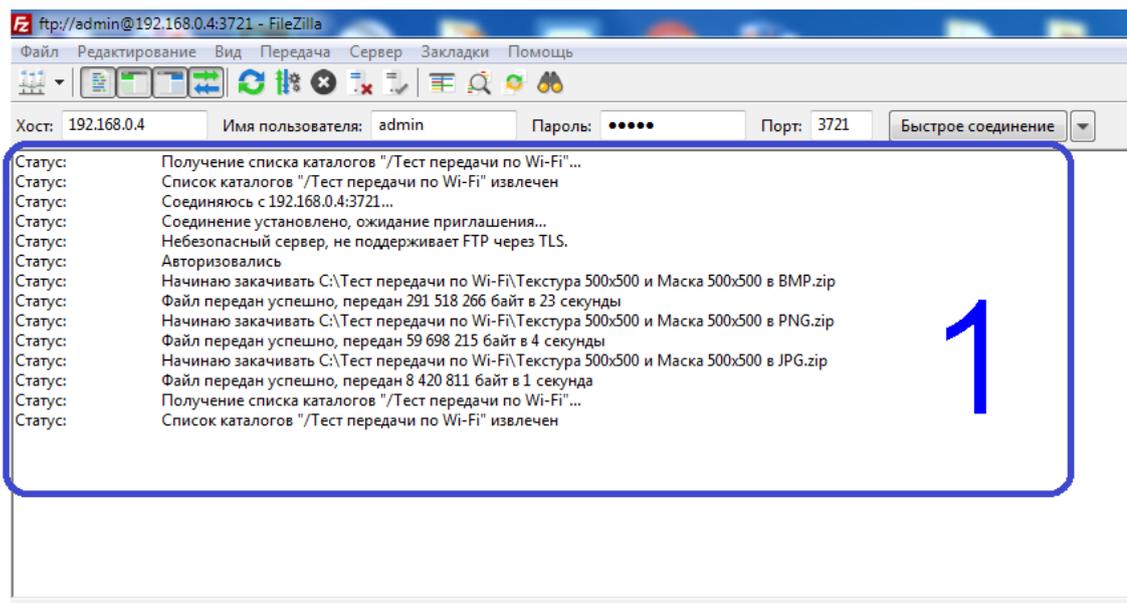


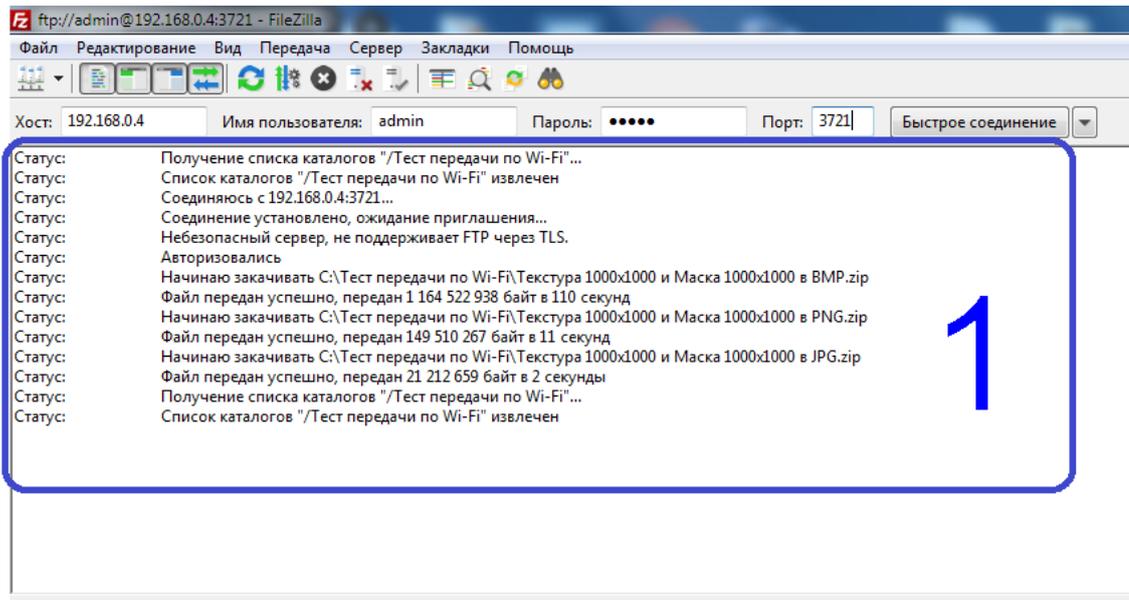
Рисунок 4.47 – Интерфейс программы FileZilla: общий вид окна программы:

- 1 – информация о выполненных процессах в программе (например, время передачи файлов),  
 2 – структура папок клиента (компьютер), 3 – структура папок сервера (мобильное устройство)

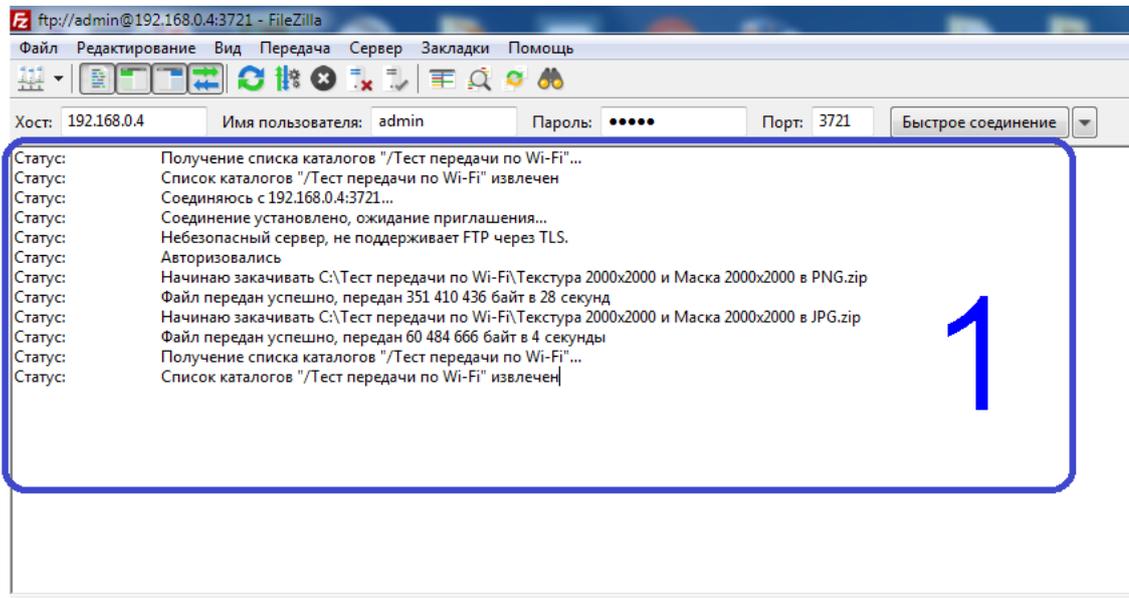
На рисунке 4.48 приведены снимки экрана с окном программы, на котором показаны результаты измерений времени передачи пакетов с кадрами по 291 пар кадров (текстура + маска).



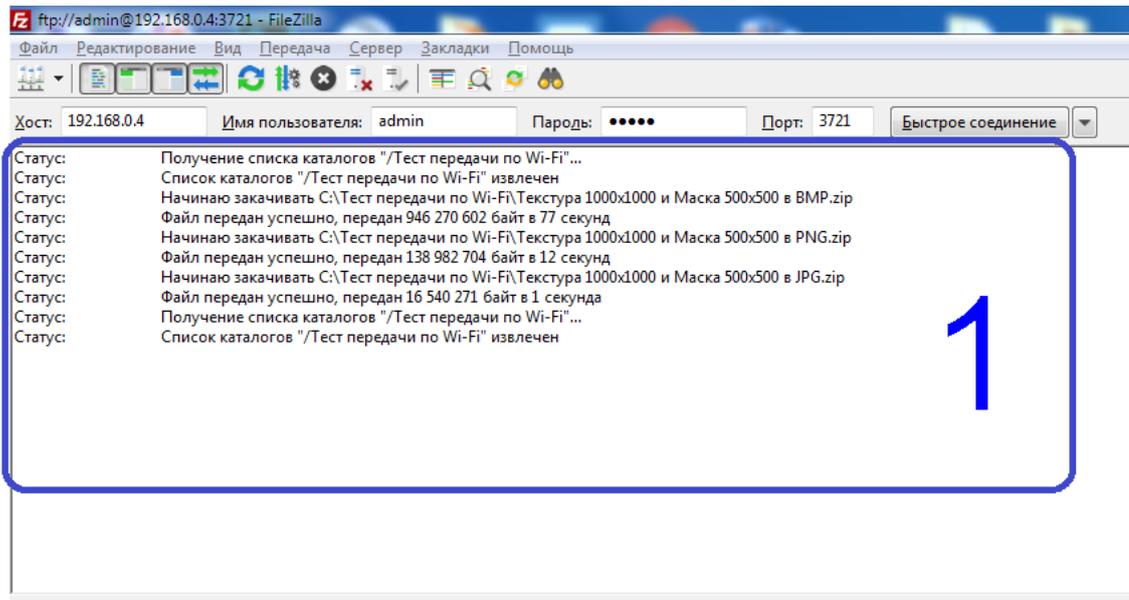
a)



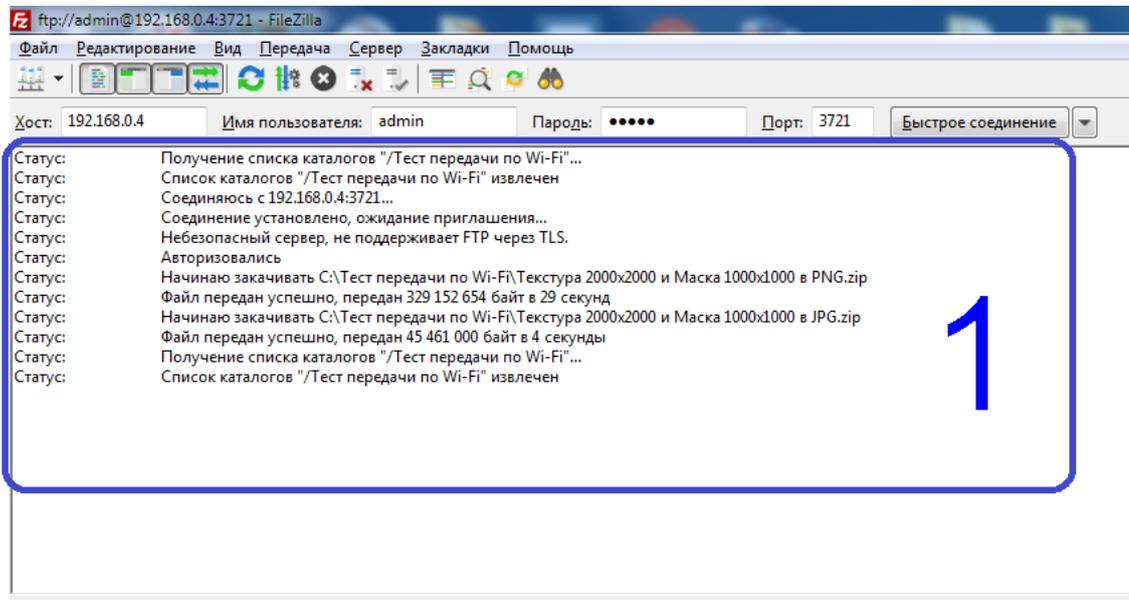
б)



в)



г)



д)

Рисунок 4.48 – Увеличенный фрагмент окна программы, показано время передачи пакетов 3D-кадров: а) 500×500 пикс. текстура + 500×500 пикс. маска (строки 1–3 в таблице 4.2); б) 1000×1000 пикс. текстура + 1000×1000 пикс. маска (строки 4–6 в таблице 4.2); в) 2000×2000 пикс. текстура + 2000×2000 пикс. маска (строки 7–9 в таблице 4.2); г) 1000×1000 пикс. текстура + 500×500 пикс. маска (строки 10–12 в таблице 4.2); д) 2000×2000 пикс. текстура + 1000×1000 пикс. маска (строки 13–15 в таблице 4.2)

Результаты измерений времени передачи пакетов обработаны и собраны в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Время передачи пакетов (текстура + маска) и частота кадровой развёртки

№	Разрешение, пикс. (Столбцов × Строк)	Формат кадров	Количество кадров, шт.	Объём пакета, МБ	Время передачи пакета, с	Вычисленная скорость передачи пакета, МБ/с	Частота кадровой развёртки	
							При вычисленной скорости передачи	При средней скорости передачи 11,2 МБ/с
1	T 500×500 M 500×500	BMP	291	T208,2+M69,7= 277,9 МБ	23	12,08	12,65	11,73
2	T 500×500 M 500×500	PNG	291	T46,2+M10,5= 56,7 МБ	4	14,18	72,75	57,48
3	T 500×500 M 500×500	JPEG	291	T4,9+M2,9= 7,8 МБ	1	7,80	291,00	417,85
4	T 1000×1000 M 1000×1000	BMP	291	T832,6+M277,8= 1110,4 МБ	110	10,09	2,65	2,94
5	T 1000×1000 M 1000×1000	PNG	291	T121,8+M20,6= 142,4 МБ	11	12,95	26,45	22,89
6	T 1000×1000 M 1000×1000	JPEG	291	T12,7+M7,4= 20,1 МБ	2	10,05	145,50	162,15
7	T 2000×2000 M 2000×2000	BMP	291	T3330,2+M1110,4= 4440,6 МБ	—	—	—	0,73
8	T 2000×2000 M 2000×2000	PNG	291	T293,1+M41,8= 334,9 МБ	28	11,96	10,39	9,73
9	T 2000×2000 M 2000×2000	JPEG	291	T35,8+M21,7= 57,5 МБ	4	14,38	72,75	56,68
10	T 1000×1000 M 500×500	BMP	291	T832,6+M69,7= 902,3 МБ	77	11,72	3,78	3,61
11	T 1000×1000 M 500×500	PNG	291	T121,8+M10,5= 132,3 МБ	12	11,03	24,25	24,63
12	T 1000×1000 M 500×500	JPEG	291	T12,7+M2,9= 15,6 МБ	1	15,60	291,00	208,92
13	T 2000×2000 M 1000×1000	BMP	291	T3330,2+M277,8= 3608 МБ	—	—	—	0,90
14	T 2000×2000 M 1000×1000	PNG	291	T293,1+M20,6= 313,7 МБ	29	10,82	10,03	10,39
15	T 2000×2000 M 1000×1000	JPEG	291	T35,8+M7,4= 43,2 МБ	4	10,80	72,75	75,44

В таблице в столбце «Номер строки» указан порядковый номер эксперимента с тестовой передачей. В столбце «Разрешение, пикс.» – разрешение в пикселях кадров с изображением текстуры (Т) и маски (М) соответственно. В столбце «Формат кадров» указаны форматы файлов, в которые предварительно перед передачей были переведены исходные массивы изображений. В столбце

«Количество кадров» – количество передаваемых кадров в пакете. В столбце «Объём пакета, МБ» – объём в мегабайтах передаваемого пакета с кадрами, где индексами Т и М помечены отдельно объёмы кадра с текстурой и маской соответственно. В столбце «Время передачи пакета, сек» показано время передачи пакета файлов, измеренное программой FileZilla. Точность измерений программы ограничена – 1 сек, такая точность измерения времени обусловлена особенностями работы программы FileZilla. В столбце «Вычисленная скорость передачи пакета, МБ/сек» – скорость передачи конкретного пакета, вычисленная как отношение объёма передаваемого пакета к измеренному времени его передачи. В этом измерении закладывается неточность, вызванная коротким временем передачи всего пакета при указанном замере времени с точностью до 1 сек. В столбце «Кадровая частота при вычисленной скорости передачи» – частота кадров, определённая на основе так измеренной скорости передачи пакета кадров. Более корректное измерение скорости передачи будет либо при существенном увеличении объёмов передаваемых пакетов, либо при простом суммировании общего времени передачи всех реально переданных в этом эксперименте пакетов. В столбце «Кадровая частота при средней скорости передачи 11,2 МБ/сек» показана кадровая частота, вычисленная на основе посчитанной средней скорости передачи при отправке пакетов больших объёмов с целью уменьшения ошибок измерения времени, возникающих при замере времени с точностью 1 секунда. Поскольку представление измеренного времени передачи программой FileZilla обеспечивалось с точностью до 1 сек, то точность измерений для разных пакетов была разной. Например, при времени передачи в 4 сек. (строка 2, 9, 15 таблицы 4.2) величина ошибки была  $\pm 12,5\%$ ; а при 110 сек. (строка 4 таблицы 4.2) –  $\pm 0,45\%$ . Поэтому скорость передачи определялась по среднему времени передачи больших пакетов (строки 1 – 12,08 МБ/сек, 4 – 10,09 МБ/сек, 10 – 11,72 МБ/сек, 14 – 10,82 МБ/сек). Она составила 11,2 МБ/сек (см. правый крайний столбец таблицы), по этой скорости вычислена частота кадровой развёртки передаваемого контента.

Видно, что в эксперименте 2 частота кадровой развёртки оказалась больше 25 кадров в секунду, а в экспериментах 5, 11 почти достигает этой частоты. Это означает, что для TV стандарта SECAM и стандарта PAL можно передавать 3D голографическую информацию без каких-либо осложнений в формате PNG, а при незначительном увеличении сжатия, можно и в формате HD. В стандарте Full HD – только в формате JPEG, если не использовать дополнительно меры сжатия. Последнее при разработке прототипа установки голографического TV будет сделано, например, при другой настройке роутера (работал на 90 МБ/с, по техническому паспорту прибора возможна работа до 150 МБ/с) или использованием следующего поколения канала передачи Wi-Fi. Кроме того, в наших экспериментах были использованы квадратные кадры, что связано с удобством при вычислениях и синтезе голограмм. Реальные стандарты TV высокой чёткости имеют количество строк, практически, в два раза меньшее ширины кадра (Full HD –  $1920 \times 1080$  пикселей). Таким образом, переходя к точным размерам кадра, с учётом настройки роутера, можно получить увеличение скорости передачи, практически, до четырёх раз. Тогда и эксперименты в строках 5, 11, и эксперименты в строках 8, 14 будут соответствовать необходимой скорости передачи в формате PNG с TV частотой кадровой развёртки выше 25 Гц, необходимой для создания непрерывного видеоряда. Дополнительным ресурсом ускорения передачи голографической информации является полученный в параграфе 4.1 результат по использованию паттернов структурированного света из параллельных полос в качестве дифракционной структуры, восстанавливающей 3D изображение объекта при дифракции на такой структуре света с длиной волны, согласованной условиями Брэгга с синтезированной на паттерне несущей частотой. Это приводит к сжатию информации ещё почти в два раза, что переводит все полученные результаты в стандарт двойной частоты кадровой развёртки 50 Гц.

Остальные варианты могут применяться в других устройствах 3D дополненной реальности, как например, в телемедицине, системах

дистанционного управления сложными объектами, включая системы безопасности, 3D фототелеграф и др.

На рисунке 4.49 показана процентная разница между двумя картами высот поверхности, переданными по каналу связи в формате PNG и формате JPEG.

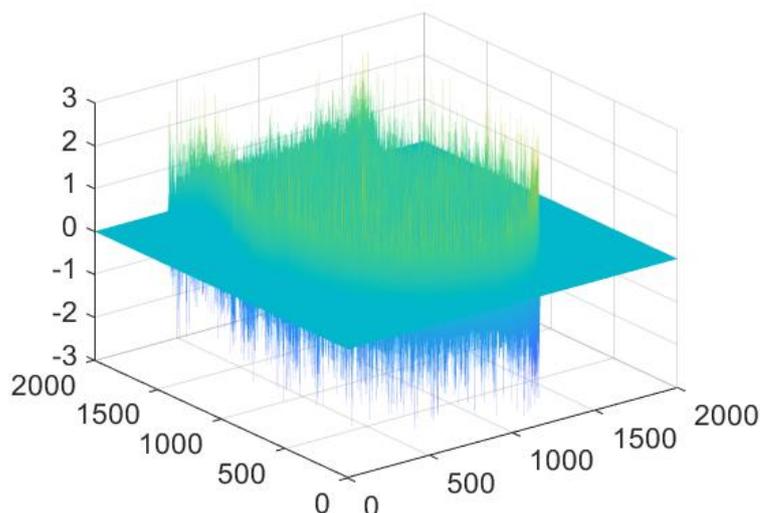
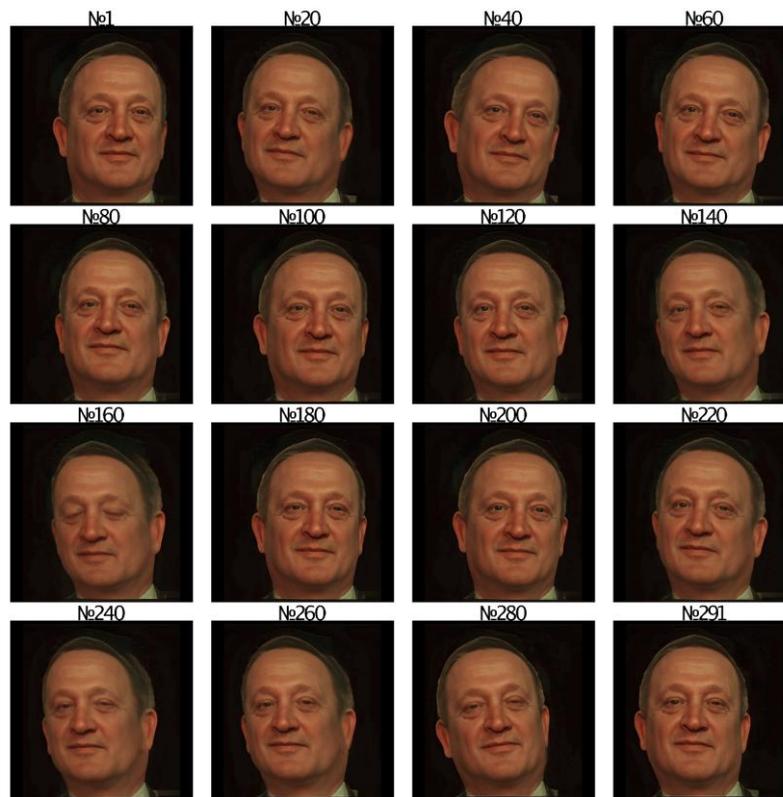


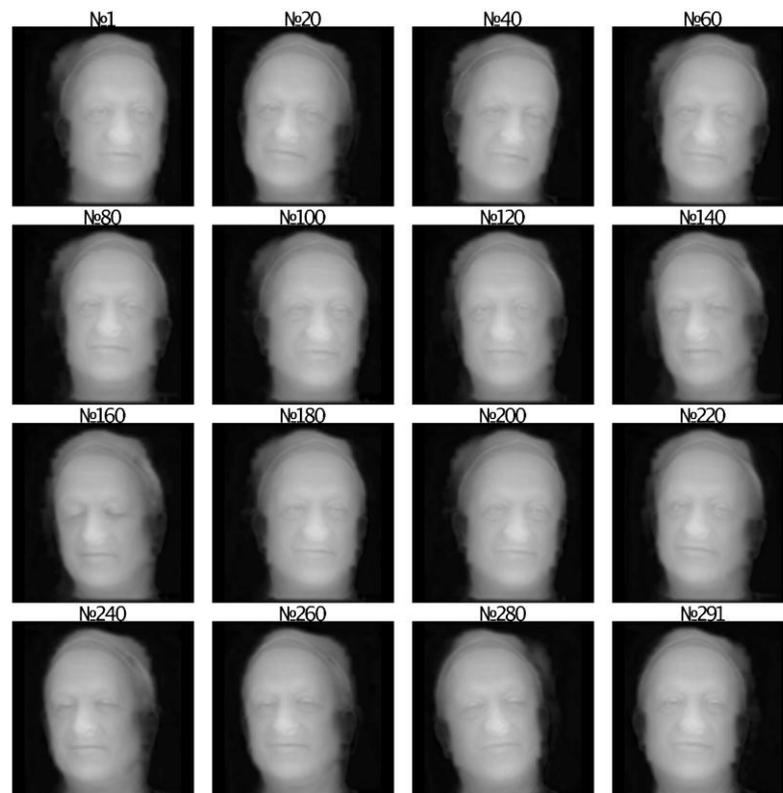
Рисунок 4.49 – Разница между принятой PNG и JPEG картой высот объекта в процентах к максимальному значению глубины

Видно, что сжатие JPEG всё же даёт некоторое искажение глубины объекта, что не нарушает его зрительное восприятие. Таким образом, для метрологических задач будет требоваться передача в стандарте PNG. Если требуется частота кадровой развёртки 25 Гц, то можно использовать режимы, отражённые в строках 2, 3, 6, 9, 11, 12, 15 таблицы 4.2. Работать с высоким разрешением, но в режиме голографического фототелеграфа [4.28], можно в режимах строк 7,8.

Пример переданного 3D видеосюжета из 291 кадра, номера которых указаны над ними, представлен набором каждого двадцатого кадра на рисунке 4.50. Как в самом видео, так и в представленном наборе кадров видно и движение живого 3D объекта, и его глубину, и, отчасти, зрительно даже можно наблюдать параллакс.



а)



б)

Рисунок 4.50 – Выборка из 291 кадра 3D видео, переданного по радиоканалу с TV частотой кадровой развёртки: а) текстура, б) карта высот

Более наглядно параллакс одного из приведённых выше кадров из 3D видео показан в сборке на рисунке 4.51. В приведённой сборке действительно виден и горизонтальный, и вертикальный параллакс.



Рисунок 4.51 – Вертикальный и горизонтальный параллакс одного из 291 3D кадра

Также на изображениях рисунка 4.51 можно увидеть и возникающие специфические аберрации, искажающие изображение в крайних ракурсах, проявляющиеся при слишком больших углах обзора, достигающих  $45^\circ$  по одной из осей. Их анализ выходит за рамки настоящей работы и является

самостоятельной перспективной темой в теории аббераций 3D изображений объектов.

В заключение параграфа приведём результаты ещё одной серии экспериментов по передаче 3D информации с целью восстановления на приёмном конце канала связи 3D изображения с высоким пространственным разрешением и непрерывным параллаксом. Как было показано в параграфе 4.1 настоящей главы, для этого по каналу связи достаточно передать информацию о текстуре кадра и о паттерне структурированного света, латерально освещающего объект.

#### ***4.4.3. Передача текстуры и паттерна структурированного света***

Полученный выше результат использован для уменьшения количества передаваемой информации даже по сравнению с предложенным в [1.94], но, тем не менее, достаточной для создания на приёмном конце канала радиосвязи голографического видеопотока. Для этого вместо передачи двух 2D кадров (карты глубин и текстуры) в эксперименте передавался один 2D кадр, но увеличенный на несколько столбцов. Так например для стандарта Full HD это будет не кадр  $1920 \times 1080$ , а кадр  $1945 \times 1080$ , где дополнительные 25 столбцов будут нести информацию о паттерне структурированного света в виде вертикальных полос, латерально освещавших объект голографирования (рисунок 4.3б). На приёмном конце канала связи эти 25 столбцов будут использованы для создания дифракционной структуры, аналогично показанной на рисунке 4.3а, восстанавливающей 3D изображение карты высот (рисунок 4.4а). Наложение на эту дифракционную структуру кадра текстуры позволяет восстанавливать 3D изображение объекта в целом, как на рисунке 4.1б. Следует отметить, что последнее будет эффективно работать только в случае небольших значений дистанции Рэлея, когда дифракция ещё не размыла изображение текстуры. Известно, что это выполняется, когда число зон Френеля, укладывающихся в поле голограммы, много больше единицы. Это условие реализуется в голограммах

сфокусированных изображений, когда 3D изображение вынесено перед голограммой на глубину пространства не более нескольких диагоналей голографического монитора или голограммы.

Для передачи видеопоследовательности, как и раньше, одновременно передавались пакеты по 291 таких кадров. Замеренное программой «FileZilla» время передачи этих пакетов при воспроизведении в реальном времени показало, что передача полной голографической информации о динамическом 3D-объекте в реальном времени с кадровой частотой больше, чем 25 кадров/сек вполне осуществима и для стандарта кадра, подобного HD, и для Full HD.

В эксперименте по передаче голографического 3D видео передаваемые 2D кадры, состоящие из текстуры и служебной информации также формировались с разной степенью сжатия.

Все кадры предварительно были подготовлены в форматах BMP (без сжатия), PNG (сжатие без потерь), JPEG (сжатие с потерями, 70 % качество). Эксперименты проводились для каждого из перечисленных форматов.

Размеры кадров с текстурой и маской мы для удобства сравнения результатов снова выбрали в тех же комбинациях:

- 500×500 пикс. текстура + 25×500 пикс. паттерн структурированного света;
- 1000×1000 пикс. текстура + 25×1000 пикс. паттерн структурированного света;
- 2000×2000 пикс. текстура + 25×2000 пикс. паттерн структурированного света.

Все наборы кадров, для удобства тестовой передачи, перед отправкой упаковывались в пакеты несжатых ZIP архивов.

Результаты измерений времени передачи пакетов обработаны и собраны в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Время передачи пакетов (текстура + паттерн структурированного света) и частота кадровой развёртки

№	Разрешение, пикс. (Столбцов × Строк)	Формат кадров	Кол-во кадров, шт.	Объём пакета, МБ			Пропускная способность канала связи, МБ/сек	Частота кадровой развёртки, кадров/сек
				Т	М	Общий		
1	Т 500×500 М 25×500	BMP	291	69,68	4,18	73,86	11,2	44,12
2	Т 500×500 М 25×500	PNG	291	15,86	0,87	16,74	11,2	194,73
3	Т 500×500 М 25×500	JPEG	291	4,22	0,84	5,06	11,2	644,07
4	Т 1000×1000 М 25×1000	BMP	291	277,82	8,07	285,89	11,2	11,40
5	Т 1000×1000 М 25×1000	PNG	291	52,94	1,22	54,16	11,2	60,18
6	Т 1000×1000 М 25×1000	JPEG	291	11,78	1,36	13,14	11,2	248,09
7	Т 2000×2000 М 25×2000	BMP	291	1110,38	15,84	1126,22	11,2	2,89
8	Т 2000×2000 М 25×2000	PNG	291	115,20	1,58	116,78	11,2	27,91
9	Т 2000×2000 М 25×2000	JPEG	291	30,53	2,34	32,87	11,2	99,14

В таблице в первом столбце указан порядковый номер эксперимента с тестовой передачей голографической 3D информации по текстуре и паттерну структурированного света. В столбце «Разрешение, пикс.» разрешение в пикселях кадров с изображением текстуры (Т) и маски (М) соответственно. В столбце «Формат кадров» указаны форматы файлов, в которые предварительно перед передачей были сжаты исходные массивы изображений. В столбце «Количество кадров» – количество передаваемых кадров в пакете. В столбце «Объём пакета, МБ» – объём в мегабайтах передаваемого пакета с кадрами, где индексами Т и М помечены отдельно объёмы кадра с текстурой и маской соответственно. В столбце «Пропускная способность канала связи» – пропускная способность используемого канала связи Wi-Fi, в МБ/сек. В столбце «Кадровая частота передачи» – частота передачи кадров, определённая на основе измеренной скорости передачи данных канала связи Wi-Fi, в кадров/сек.

Видно, что в экспериментах 1–3, 5–6 и 8–9 частота кадровой развёртки оказалась больше 25 кадров/сек. Это означает, что в этой технологии как для TV стандарта, подобного SECAM, так и HD и Full HD передавать 3D голографическую информацию можно в форматах PNG и JPEG. Формат BMP для передачи кадров, в нашем случае, не подходит для разрешения большего, чем в эксперименте 1, в силу отсутствия какого-либо традиционного типа сжатия передаваемых 2D кадров, и, как следствие, громоздкости файлов с передаваемыми кадрами. Тем не менее, формат BMP в предлагаемой технологии также вполне годится для использования в системах голографического фототелеграфа, что видно по результатам экспериментов в строках 4 и 7.

Приведённые в таблице 4.3 варианты передачи 3D данных могут с ещё более высоким качеством изображения применяться в различных устройствах 3D дополненной реальности, в том числе, в телемедицине, системах дистанционного управления сложными объектами, включая системы безопасности, 3D фототелеграф и др., причём без использования вычислительно ёмких интегральных преобразований Фурье и Френеля. Полученные в настоящей работе изображения, восстановленные компьютерными и аналоговыми голограммами обладают достаточно хорошим качеством, что позволяет уверенно говорить о том, что их эмоциональное восприятие в устройствах 3D дополненной реальности не будет страдать от эффекта «зловещей долины» (приложение Д).

#### ***Выводы параграфа 4.4***

Экспериментально осуществлена передача по существующему (не специализированному) радиоканалу Wi-Fi видеосюжета с динамически меняющимся изображением живого человека с TV частотой кадровой развёртки, разрешающей способностью, удовлетворяющей требованиям современного TV высокого качества и непрерывным параллаксом восстановленного 3D изображения.

Такое видео передано с высоким качеством пространственного разрешения, как например, HD и Full HD, глубины цвета и пространственной глубины в 256 градаций и выше. Таким образом, экспериментально показана возможность организации 3D удалённой реальности, голографического TV и фототелеграфа высокого разрешения. С учётом того, что описанный выше эксперимент проводился на неспециализированном оборудовании, очевидно, что при небольшой доработке оборудования, которую неминуемо придётся делать даже при создании первых опытных образцов, можно будет увеличить пропускную способность канала так, как это делается для передачи голографического TV стандартов 4K UHD и 8K UHD. Такое голографическое TV и системы 3D дополненной реальности вполне могут быть использованы для систем удалённой хирургии, дистанционного 3D наблюдения, работы в агрессивных средах и при решении ряда спецзадач. С учётом возможностей сочетания карты высот, полученной в одном диапазоне электромагнитного спектра, а текстуры в другом, открываются новые возможности создания мультиспектральных 3D изображений. А, учитывая, что карта высот вполне может создаваться с помощью других типов излучения, например, акустического, возможна разработка гиперспектральных 3D изображений, совмещающих ранее несовместимые изображения 3D объектов.

#### **Выводы главы 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.

С учётом возможностей сочетания регистрации текстуры в одном диапазоне электромагнитного спектра, а паттернов структурированного света, согласованных, по условию Брэгга, с восстанавливающим излучением, в другом, открываются новые возможности создания мультиспектральных 3D изображений. А, учитывая, что паттерн структурированного света вполне может создаваться с помощью других типов излучения, например, акустического, возможна разработка гиперспектральных 3D изображений, совмещающих ранее несовместимые изображения 3D объектов.

По результатам расчёта компьютерных голограмм в двух технологиях (Стефана Бентона и Dot Matrix) 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 кадрового 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 с непрерывным параллаксом.

В результате выполненного исследования сделаны следующие выводы:

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, представляющая 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*, 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 материала 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. Защищён 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 фотовидеофиксации 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.

**СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ****Литература главы 1**

1.1. Голография и голографические методы контроля качества. Термины и определения [Текст]: ГОСТ 24865.1-81. Дата введения: 01.01.1982.

1.2. Оптика и фотоника. Голография. Часть 1: Основные термины и определения. Классификация [Текст]: ГОСТ Р 59321.1-2021. Дата введения: 12.10.2021.

1.3. Оптика и фотоника. Голография. Часть 2: Голография аналоговая. Термины и определения [Текст]: ГОСТ Р 59321.2-2021. Дата введения: 12.10.2021.

1.4. Оптика и фотоника. Голография. Часть 3: Голография цифровая и компьютерная. Термины и определения [Текст]: ГОСТ Р 59321.3-2021. Дата введения: 12.10.2021.

1.5. Денисюк Ю. Н. Достаточно ли известны фундаментальные принципы голографии для создания новых типов объёмного кинематографа и искусственного интеллекта? / Ю. Н. Денисюк // Журнал технической физики. – 1991. – Т. 61. – № 8. – С. 149–161.

1.6. Титарь В. П. Проблемы создания голографической телевизионной системы / Титарь В. П., Богданова Т. В. // Радиоэлектроника и информатика. – 1999. – № 2(7). – С. 38–42.

1.7. 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).

1.8. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения / Ю. Н. Денисюк // Доклады Академии наук СССР. – 1962. – Т. 144. – № 6. – С. 1275–1278.

1.9. Денисюк Ю. Н. Об отображении оптических свойств объекта в волновом поле рассеянного им излучения // Оптика и спектроскопия. 1963. – Т. 15. – № 4. – С. 522–532.

1.10. Leith E. N. Reconstructed Wavefronts and Communication Theory / E. N. Leith, J. Upatnieks // Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Т. 52. – № 10. – С. 1123–1130. <https://doi.org/10.1364/JOSA.52.001123>.

1.11. Leith E. N. Wavefront Reconstruction with Diffused Illumination and Three-Dimensional Objects\* / E. N. Leith, J. Upatnieks // Journal of the Optical Society of America. – 1964. – Т. 54. – № 11. – С. 1295–1301. <https://doi.org/10.1364/JOSA.54.001295>.

1.12. Van Heerden P. J. A New Optical Method of Storing and Retrieving Information / P. J. van Heerden // Applied Optics. – 1963. – Т. 2. – № 4. – С. 387–392. <https://doi.org/10.1364/AO.2.000387>.

1.13. Hill B. Some Aspects of a Large Capacity Holographic Memory / B. Hill // Applied Optics. – 1972. – Т. 11. – № 1. – С. 182–191. <https://doi.org/10.1364/AO.11.000182>.

1.14. Борн М. Основы оптики. 2-е изд., испр. / М. Борн, Э. Вольф; под ред. Г. П. Мотулевича; пер. с англ. С. Н. Бреуса, А. И. Головашкина, А. А. Шубина. – Москва: Наука, 1973. – 720 с.

1.15. Микаэлян А. Л. Возможности применения методов голографии для создания новых типов запоминающих устройств / А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев, С. М. Наумов, Л. З. Соколова // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14. – № 1. – С. 115–123.

1.16. Lang M. Gigabyte capacities for holographic memories / M. Lang, H. Eschler // Optics & Laser Technology. – 1974. – Т. 6. – № 5. – С. 219–224. [https://doi.org/10.1016/0030-3992\(74\)90061-9](https://doi.org/10.1016/0030-3992(74)90061-9).

1.17. Гибин И. С. Программируемое голограммное ЗУ с записью и считыванием информации / И. С. Гибин, Т. Н. Мантуш, Ю. Е. Нестерихин, Б. Н. Панков, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб // Автометрия. – 1975. – Т. 11. – № 3. – С. 3–11.

1.18. Mikaeliane A. L. Design principles of holographic memory devices / A. L. Mikaeliane, V. Bobrinev, S. M. Naumov, L. S. Sokolova // IEEE Journal of Quantum Electronics. – 1970. – Т. 6. – № 4. – С. 193–198.  
<https://doi.org/10.1109/JQE.1970.1076437>.

1.19. Акаев А. А. Голографические оперативные ЗУ – состояния и перспективы их развития / А. А. Акаев, С. А. Майоров, Н. А. Смирнов // Зарубежная радиоэлектроника. – 1975. – № 5. – С. 57–76. – № 6. – С. 80–100.

1.20. Такеда Я. Оптическая система записи и воспроизведения видеoinформации / Я. Такеда // Тезисы докладов Первой Всесоюзной конференции по Радиооптике. – Фрунзе, Политех. институт. – 1981. – С. 18.

1.21. Бобринев В. И. Экспериментальные исследования по голографической записи электрических сигналов на дисковый носитель / В. И. Бобринев, А. Л. Бобер, А. Ф. Ванин, Э. Х. Гуланиян, Е. И. Дмитриева, Ф. И. Макалеев, А. Л. Микаэлян, О. М. Переверзев, С. А. Прокопенко, А. И. Федулов // Тезисы докладов Первой Всесоюзной конференции по Радиооптике – Фрунзе: Политехнический Институт. – 1981. – С. 136–137.

1.22. Сайте Ф. Голография и запоминающие устройства / Ф. Сайте // Всесоюзный центр переводов, перевод № А-54130 из журнала «Электроникусу». – 1977. – Т. 22. – № 4, С. 372–377.

1.23. Okamoto A., Kunori K., Takabayashi M.; заявитель Hokkaido University NUC. Holographic memory reproduction device and holographic memory reproduction method. Патент EP2631909B1, Европейское патентное ведомство, МПК G03H1/22; заявл. 19.10.2011; опубл. 25.09.2019.

1.24. Kojima N., Fukumoto A.; заявитель Sony Corp. Phase modulation system, holographic recording and reproducing apparatus, and manufacturing method of phase modulation system. Патент JP2006107663A, Япония, МПК G03H1/12; заявл. 07.10.2004; опубл. 20.04.2006.

1.25. Варга П. Расчет оптического канала архивного голографического запоминающего устройства / П. Варга, Г. Киш // Квантовая электроника. – 1979. – Т. 6. – № 5. – С. 1048–1056.

1.26. Микаэлян А. Л. Голографические системы памяти / А. Л. Микаэлян, В. И. Бобринев // Радиотехника и электроника. – 1974. – № 5. – С. 898–926.

1.27. Соскин С. И., Шойдин С. А., Левин В. И.; Голографическое запоминающее устройство. Авторское свидетельство № 701350, СССР, 1979 г, зарегистрировано в Государственном реестре изобретений СССР за № 2468584 от 01.04.1977 г.

1.28. Соскин С. И. Расчёт оптической схемы голографического запоминающего устройства / С. И. Соскин, С. А. Шойдин // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44. – № 3. – С. 566–573.

1.29. Шойдин С. А. Исследование влияния аберраций оптической системы на плотность записи информации в ГЗУ [Текст]: дис. к. ф.-м. н.: 01.04.05 / Шойдин Сергей Александрович. – Ленинград.: ГОИ им. С. И. Вавилова, 1983. – 195 с.

1.30. Выдрин Л. В. Экспериментальная оптико-электронная (голографическая) система памяти / Л. В. Выдрин, Н. Н. Вьюхина, И. С. Гибин, В. Н. Затолокин, С. Ф. Кибирев, Т. Н. Мантуш, Ю. Е. Нестерихин, Б. Н. Панков, Е. Ф. Пен, П. Е. Твердохлеб, Ю. Н. Тищенко, А. В. Трубецкой // Автометрия. – 1980. – Т. 16. – № 2. – Р. 60–67.

1.31. Соскин С. И. Исследование голографического запоминающего устройства в режиме записи одиночных голограмм / С. И. Соскин, С. А. Шойдин // Оптико-механическая промышленность. – 1980. – № 11. – С. 3–8.

1.32. Шойдин С. А. Определение информационной ёмкости матриц голограмм в объёмной среде / С. А. Шойдин // Сборник трудов четвертой всесоюзной конференции по голографии – Ереван: ВНИИРИ. – 1982. – С. 149–153.

1.33. Betin A. Yu. Projection multiplex recording of computer-synthesised one-dimensional Fourier holograms for holographic memory systems: mathematical and experimental modelling / A. Yu. Betin, V. I. Bobrinev, N. M. Verenikina, S. S. Donchenko, N. N. Evtikhiev, E. Yu. Zlokazov, S. B. Odinkov, S. N. Starikov, R. S.

Starikov // Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 45 – № 8. – P. 771–775.  
<https://doi.org/10.1070/QE2015v045n08ABEH015567>.

1.34. Odinokov S. B. Optical memory system based on incoherent recorder and coherent reader of multiplexed computer generated one-dimensional Fourier transform holograms / S. B. Odinokov, E. Yu. Zlokazov, S. S. Donchenko, N. M. Verenikina // Japanese Journal of Applied Physics. – 2017. – Vol. 56 – № 9S. – P. 09NA02.  
<http://doi.org/10.7567/JJAP.56.09NA02>.

1.35. Shannon C. E. Recent Developments in Communication Theory / C. E. Shannon // Claude E. Shannon: Collected Papers. – IEEE, 1993. – С. 190–193.  
<https://doi.org/10.1109/9780470544242.ch11>.

1.36. Shannon C. E. Communication in the Presence of Noise / C. E. Shannon // Proceedings of the IRE. – 1949. – Т. 37. – № 1. – С. 10–21.

1.37. Гуревич С. Б. Передача и обработка информации голографическими методами / С. Б. Гуревич, В. Б. Константинов, В. К. Соколов, Д. Ф. Черных. – Москва: Советское радио, 1978. – 304 с.

1.38. Китович В. В. Ограничение плотности записи и помехи в оптоэлектронном ЗУ / В. В. Китович, В. В. Калейко // Тезисы докладов Первой Всесоюзной конференции по Радиооптике – Фрунзе: Политех. Институт. – 1981. – С. 162–163.

1.39. Малов А. Н. Голографические регистрирующие среды на основе дихромированного желатина: супрамолекулярный дизайн и динамика записи / Малов А. Н., Неупокоева А. В. – Иркутск: ИВВАИУ(ВИ), 2006. – 345 с.

1.40. Шойдин С. А. Влияние аберраций, вызванных разюстировкой схемы на ёмкость голограммного запоминающего устройства / С. А. Шойдин // Оптико-механическая промышленность. – 1981. – № 3.

1.41. Nyquist H. Certain factors affecting telegraph speed / H. Nyquist // The Bell System Technical Journal. – 1924. – Т. 3. – № 2. – С. 324–346.  
<https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1924.tb01361.x>.

1.42. Hartley R. V. L. Transmission of information / R. V. L. Hartley // The Bell System Technical Journal. – 1928. – Т. 7. – № 3. – С. 535–563. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1928.tb01236.x>.

1.43. Pierce J. R. Symbols, Signals and Noise: The Nature and Process of Communication / J. R. Pierce. – London: Hutchinson, 1962. – 307 с.

1.44. Тимофеев А. Л. Построение помехоустойчивого кода на базе голографического представления произвольной цифровой информации / А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44. – № 6. – С. 978–984. – <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-739>.

1.45. Тимофеев А. Л. Влияние шума и частоты дискретизации на погрешность дискретного представления изображений / А. Л. Тимофеев, А. Х. Султанов // Информационно-управляющие системы. – 2021. – Т. 114. – № 5. – С. 33–39. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-5-33-39>.

1.46. 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.

1.47. D'Auria L. Holographic read-write memory and capacity enhancement by 3-D storage / L. D'auria, J. P. Huignard, E. Spitz // IEEE Transactions on Magnetics. – 1973. – Т. 9. – № 2. – С. 83–94. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1973.1067578>.

1.48. Goldmann, G. Spatial frequency multiplexing for high-density holographic data storage. I. Storage density / G. Goldmann // Optik. – 1976. – Т. 45. – № 5. – С. 473–488. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL7730020629>.

1.49. Goldmann, G. Spatial frequency multiplexing for high-density holographic data storage. II. Signal-to-background ratio / G. Goldmann // Optik. – 1976. – Т. 46. – № 1. – С. 1–17. <https://pascal-francis.inist.fr/vibad/index.php?action=getRecordDetail&idt=PASCAL773003437>.

1.50. Lang M. A Contribution to the Comparison of Single Exposure and Multiple Exposure Storage Holograms / M. Lang, G. Goldmann, P. Graf // Applied Optics. – 1971. – Т. 10. – № 1. – С. 168–173. <https://doi.org/10.1364/AO.10.000168>.

1.51. Акаев А. А. Когерентные оптические вычислительные машины / А. А. Акаев, С. А. Майоров. – Ленинград: Машиностроение, 1977. – 440 с.

1.52. Лашков Г. И. Использование дисперсионной фоторефракции, обусловленной процессами с участием триплетных состояний для регистрации фазовых трёхмерных голограмм / Г. И. Лашков, В. И. Суханов // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 44. – № 5. – С. 1008–1015.

1.53. Сандер Е. А. Экспериментальное наблюдение пространственного резонанса спекл-поля с неоднородностями показателя преломления / Е. А. Сандер, В. В. Шкунов, С. А. Шойдин // Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики. – 1985. – № 1. – С. 116–119.

1.54. Аристов В. В. Голографирование без опорного пучка в случае трёхмерных голограмм / В. В. Аристов, В. Г. Лысенко, В. Б. Тимофеев, В. Ш. Шехтман // Доклады Академии наук СССР. – 1968. – Т. 183. – № 5. – С. 1039–1040.

1.55. Аристов В. В. Свойства трёхмерных голограмм // Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. Москва, 1971. 16 с.

1.56. Аристов В. В. Голография без опорного пучка / В. В. Аристов, В. Л. Броуде, В. Б. Тимофеев, В. Ш. Шехтман. – М.: Препринт Института Физики Твёрдого Тела АН СССР. – 1969. – 21 с.

1.57. Марков В. Б. Характеристики статических объёмных голограмм с кодированной опорной волной / В. Б. Марков, М. С. Соскин, А. И. Хижняк, В. Ф. Шишков // Сборник трудов четвертой всесоюзной конференции по голографии – Ереван: ВНИИРИ. – 1982. – С. 159–163.

1.58. Зельдович Б. Я. Расчет шумов и количественное обоснование модовой теории объёмных голограмм / Б. Я. Зельдович, В. В. Шкунов, Т. В. Яковлева // Препринт Физического Института Академии наук СССР. – 1979. – № 26. – С. 1–46.

1.59. Сандер Е. А. Исследование голографической записи двоичной информации в объёмной регистрирующей среде Реоксан / Е. А. Сандер, В. И.

Суханов, С. А. Шойдин // В сб.: Оптическая голография. – Л.: Наука. – 1983. – С. 77–89.

1.60. Shoydin S. A. Holographic memory without reference beam / S. A. Shoydin // *Optical Memory and Neural Networks*. – 2016. – Т. 25. – № 4. – С. 262–267. <https://doi.org/10.3103/S1060992X16040056>.

1.61. Lohmann A. W. Space–bandwidth product of optical signals and systems / R. G. Dorsch, D. Mendlovic, Z. Zalevsky, C. Ferreira // *Journal of the Optical Society of America A*. – 1996. – Т. 13. – № 3. – С. 470–473. <https://doi.org/10.1364/JOSAA.13.000470>.

1.62. Goodman, J. W. *Introduction to Fourier Optics*. 2nd Edition / J. W. Goodman. – New York: McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1996. – 441 с. – ISBN-13: 978-0070242548.

1.63. Renninger M. „Umweganregung“, eine bisher unbeachtete Wechselwirkungserscheinung bei Raumgitterinterferenzen / M. Renninger // *Zeitschrift für Physik*. – 1937. – Т. 106. – № 3. – С. 141–176. <https://doi.org/10.1007/BF01340315>.

1.64. Сергеев С. А. Дифракционные структуры, сформированные двумя скрещенными наложенными дифракционными решётками / С. А. Сергеев, А. Ю. Мешалкин, М. С. Ёвову // *Электронная обработка материалов*. – 2020. – Т. 6. – № 56. – С. 51–60. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4299754>.

1.65. Sergeev S. A. Diffraction Structures Formed by Two Crossed Superimposed Diffraction Gratings / S. A. Sergeev, A. Yu. Meshalkin, M. S. Iovu // *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. – 2021. – Т. 57. – № 2. – С. 207–216. <https://doi.org/10.3103/S1068375521020095>.

1.66. Kogelnik H. Coupled wave theory for thick hologram gratings / H. Kogelnik // *The Bell System Technical Journal*. – 1969. – Т. 48. – № 9. – С. 2909–2947. <https://doi.org/10.1002/j.1538-7305.1969.tb01198.x>.

1.67. Аристов В. В. Свойства трёхмерных голограмм / В. В. Аристов, В. Ш. Шехтман // *Успехи физических наук*. – 1971. – Т. 104. – № 5. – С. 51–76. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0104.197105c.0051>.

1.68. Lin L. H. Hologram Formation in Hardened Dichromated Gelatin Films / L. H. Lin // *Applied Optics*. – 1969. – Т. 8. – № 5. – С. 963–966. <https://doi.org/10.1364/AO.8.000963>.

1.69. Burke W. J. Crosstalk noise from multiple thick-phase holograms / W. J. Burke, P. Sheng // *Journal of Applied Physics*. – 1977. – Т. 48. – № 2. – С. 681–685. <https://doi.org/10.1063/1.323655>.

1.70. D'Auria L. Experimental Holographic Read-Write Memory Using 3-D Storage / L. D'Auria, J. P. Huignard, C. Slezak, and E. Spitz // *Applied Optics*. – 1974. – Т. 13. – № 4. – С. 808–818. <https://doi.org/10.1364/AO.13.000808>.

1.71. Шойдин С. А. Запись голограмм в динамических безрелаксационных средах / С. А. Шойдин, Е. А. Сандер // *Оптика и спектроскопия*. – 1985. – Т. 58. – № 1. – С. 200–202.

1.72. Зельдович Б. Я. Голограммы спекл-полей / Б. Я. Зельдович, В. В. Шкунов, Т. В. Яковлева // *Успехи физических наук*. – 1986. – Т. 149. – № 7. – С. 511–549. <https://doi.org/10.3367/UFNr.0149.198607e.0511>.

1.73. Шелковников В. В. Получение и свойства голографического фотополимерного материала в гибридной золь-гель-матрице / В. В. Шелковников, В. В. Русских, Е. В. Васильев, Е. Ф. Пен, В. И. Ковалевский, И. А. Кучин // *Оптический журнал*. – 2006. – Т. 73. – № 7. – С. 65–69.

1.74. Андреева О. В. Обратимые и необратимые изменения оптических параметров образцов полимерного материала «Диффен», обусловленные воздействием излучения / О. В. Андреева, Б. Г. Манухин, Н. В. Андреева // Тезисы докладов XIV международной конференции HOLOEXPO 2017, 12–14 сентября 2017 г. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2017. – С. 195–197. ISBN: 978-5-7038-4771-8.

1.75. Yamaguchi I. Phase-shifting digital holography / I. Yamaguchi, T. Zhang // *Optics Letters*. – 1997. – Т. 22. – № 16. – С. 1268–1270. <https://doi.org/10.1364/OL.22.001268>.

1.76. Blinder D. Signal processing challenges for digital holographic video display systems / D. Blinder, A. Ahar, S. Bettens, T. Birnbaum, A. Symeonidou, H.

Ottevaere, C. Schretter, P. Schelkens // *Signal Processing: Image Communication*. – 2019. – Т. 70. – С. 114–130. <https://doi.org/10.1016/j.image.2018.09.014>.

1.77. Petrov. N. V. Phase retrieval method for multiple wavelength speckle patterns / N. V. Petrov, V. G. Bespalov, A. A. Gorodetsky // *Proceedings of SPIE*. – 2010. – Т. 7387. – С. 73871Т. <https://doi.org/10.1117/12.871433>.

1.78. Петров Н. В. Восстановление волнового фронта при безопорной цифровой ПЗС-регистрации мультиспектральных спекл-картин / Н. В. Петров, В. Г. Беспалов, М. В. Волков // *Наносистемы: физика, химия, математика*. 2011. Т. 2. – № 1. С. 82–90.

1.79. Shevkunov I. A. Experimental comparison of phase retrieval methods which use intensity distribution at different planes / I. A. Shevkunov, N. V. Petrov // *Journal of Physics: 1st International Scientific School on Methods of Digital Image Processing in Optics and Photonics 8–11 April 2014, St Petersburg, Russia*. 2014. V. 536. – № 1. – P. 1–3. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/536/1/012028>.

1.80. Комар В. Г. Информационная оценка качества изображения кинематографических систем / В. Г. Комар // *Техника кино и телевидения*. – 1971. – № 10. – С. 9–22.

1.81. АО «Компания Славич». Пластинки фотографические [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.slavich.ru/?id=24> (дата обращения: 18.01.2023).

1.82. Kolb A. Time-of-Flight Cameras in Computer Graphics / A. Kolb, E. Barth, R. Koch, R. Larsen // *Computer Graphics Forum*. – 2010. – Т. 29. – № 1. – С. 141–159. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8659.2009.01583.x>.

1.83. Foix S. Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey / S. Foix, G. Alenya, C. Torras // *IEEE Sensors Journal*. – 2011. – Т. 11. – № 9. – С. 1917–1926. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2010.2101060>.

1.84. 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: 18.01.2023).

1.85. Cui B. High-Precision 3D Reconstruction for Small-to-Medium-Sized Objects Utilizing Line-Structured Light Scanning: A Review / B. Cui, W. Tao, H. Zhao // Remote Sensing. – 2021. – Т. 13. – № 21. – С. 4457. <https://doi.org/10.3390/rs13214457>.

1.86. Rubinsztein-Dunlop H. Roadmap on structured light / H. Rubinsztein-Dunlop, A. Forbes, M. V. Berry, M. R. Dennis, D. L. Andrews, M. Mansuripur, C. Denz, C. Alpmann, P. Banzer, T. Bauer, E. Karimi, L. Marrucci, M. Padgett, M. Ritsch-Marte, N. M. Litchinitser, N. P. Bigelow, C. Rosales-Guzmán, A. Belmonte, J. P. Torres, T. W. Neely, M. Baker, R. Gordon, A. B. Stilgoe, J. Romero, A. G. White, R. Fickler, A. E. Willner, G. Xie, B. McMorran, A. M. Weiner // Journal of Optics. – 2016. – Т. 19. – № 1. – С. 013001. <http://doi.org/10.1088/2040-8978/19/1/013001>.

1.87. Fofi D. A comparative survey on invisible structured light / D. Fofi, T. Sliwa, Y. Voisin // Proceedings of SPIE. – 2004. – Т. 5303. – С. 90–98. <https://doi.org/10.1117/12.525369>.

1.88. Schmalz C. An endoscopic 3D scanner based on structured light / C. Schmalz, F. Forster, A. Schick, E. Angelopoulou // Medical Image Analysis. – 2012. – Т. 16. – № 5. – С. 1063–1072. <https://doi.org/10.1016/j.media.2012.04.001>.

1.89. Poux F. Voxel-based 3D Point Cloud Semantic Segmentation: Unsupervised Geometric and Relationship Featuring vs Deep Learning Methods / F. Poux, R. Billen // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2019. – Т. 8. – № 5. – С. 213. <https://doi.org/10.3390/ijgi8050213>.

1.90. Borghese N. A. Autoscan: a flexible and portable 3D scanner / N. A. Borghese, G. Ferrigno, G. Baroni, A. Pedotti, S. Ferrari, R. Savare // IEEE Computer Graphics and Applications. – 1998. – Т. 18. – № 3. – С. 38–41. <https://doi.org/10.1109/38.674970>.

1.91. Аксенов А. Ю. 3D-Сканирование для технологии прототипирования / А. Ю. Аксенов, В. В. Александрова, А. А. Зайцева // Информационно-измерительные и управляющие системы. – 2014. – Т. 12. – № 6. – С. 20–24.

1.92. Михайлов В. П., Крейнс В. М., Сарнадский В. Н., Вильбергер С. Я., Фёдоров Ю. С.; Государственный научно-клинический центр охраны здоровья

шахтёров. Способ выявления пострурального дисбаланса. Патент RU2136209C1, Российская Федерация, МПК А61В 5/107; заявл. 20.11.1997; опубл. 10.09.1999.

1.93. Сарнадский В. Н., Садовой М. А., Фомичев Н. Г. Способ компьютерной оптической топографии формы тела человека и устройство для его осуществления. Патент ЕА199600068, Евразийская патентная организация, IPC А61В 5/103; заявл. 26.08.1996; опубл. 26.02.1998.

1.94. Шойдин С. А.; Способ дистанционного формирования голографической записи. Патент RU2707582C1, Российская Федерация, МПК G03Н 1/00; заявл. 03.07.2018; опубл. 28.11.2019.

1.95. Lee S. Airborne laser communications and performance enhancement by equalization / S. Lee, B. Hamzeh, M. Kavehrad // Proceedings of SPIE. – 2006. – Т. 6105. – С. 61050Р. <https://doi.org/10.1117/12.644833>.

1.96. Bouchet O. Free-Space Optics: Propagation and Communication / O. Bouchet, H. Sizun, C. Boisrobert, F. de Fornel, P.-N. Favennec. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. – 221 с. ISBN-13: 978-1-905209-02-6.

1.97. Шойдин С. А. Влияние параметров лазера на информационную ёмкость канала связи / С. А. Шойдин // Сборник тезисов 24-й международной конференции Лазеры, измерения, информация, 9–11 июня 2014 г. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный политехнический университет. – 2014. – Т. 1. – С. 117–118.

1.98. АО «Мостком» [Электронный ресурс] // «Мостком» – мировой лидер в области создания систем беспроводной оптической связи на базе технологии Free-Space Optics. – Режим доступа: <http://www.mostkom.ru/> (дата обращения: 18.01.2023).

1.99. Shoydin, S. A. Influence of laser parameters on information capacity of communication channel / S. A. Shoydin // Optical Memory and Neural Networks. – 2014. – Т. 23. – № 4. – С. 287–294. <https://doi.org/10.3103/S1060992X14040122>.

1.100. Рапопорт Б. И. Возможности передачи голографического изображения малокадровой телевизионной системой / Б. И. Рапопорт // Техника кино и телевидения. – 1971. – № 9. – С. 42.

1.101. Федоров Б. Ф. Голография / Б. Ф. Федоров, Л. М. Цибулькин. – Москва: Радио и связь, 1989. –144 с. ISBN: 5-256-00229-5.

1.102. Onural L. Holographic 3-D Television. Patent US20060187297A1, United States of America, IPC H04N 13/00, H04N 5/89, Publication Date: 24.08.2006.

1.103. Попсулин С. Samsung и LG сворачивают выпуск 3D-телевизоров [Электронный ресурс] // CNews – крупнейшее издание в сфере высоких технологий в России и странах СНГ. 2016. – Режим доступа: [https://www.cnews.ru/news/top/2016-02-09\\_samsung\\_i\\_lg\\_svorachivayut\\_vypusk\\_3dtelevizorov](https://www.cnews.ru/news/top/2016-02-09_samsung_i_lg_svorachivayut_vypusk_3dtelevizorov) (дата обращения: 18.01.2023).

1.104. Muhamad R. K. JPEG Pleno holography: scope and technology validation procedures / R. K. Muhamad, T. Birnbaum, A. Gilles, S. Mahmoudpour, K.-J. Oh, M. Pereira, C. Perra, A. Pinheiro, P. Schelkens // Applied Optics. – 2021. – Т. 60. – № 3. – С. 641–651. <https://doi.org/10.1364/AO.404305>.

1.105. Валюс Н. А. Стереоскопия / Н. А. Валюс. – Москва: Издательство Академии Наук СССР, 1962. – 379 с.

1.106. Aerial Burton – мобильный 3D-дисплей без экрана [Электронный ресурс] // Новости технологий – Достижения науки и техники. 2014. Режим доступа: <http://techvesti.ru/node/7651> (дата обращения: 18.01.2023).

1.107. Комар В. Г. О возможности создания театрального голографического кинематографа с цветным объёмным изображением / В. Г. Комар // Техника кино и телевидения. – 1975. – № 4. – С. 5, 31, 34.

1.108. Комар В. Г. О принципиальной схеме кинопроекции цветных объёмных голографических изображений / В. Г. Комар // Труды НИКФИ. – 1976. –№ 82. – С. 5–32.

1.109. Комар В. Г. Системы голографического кинематографа, совместимые с системами стереоскопического и обычного кинематографа / В. Г. Комар // Техника кино и телевидения. – 1978. –№ 10. – С. 3.

1.110. Schelkens, P. JPEG Pleno: Providing representation interoperability for holographic applications and devices / P. Schelkens, T. Ebrahimi, A. Gilles, P. Gioia,

K.-J. Oh, F. Pereira, C. Perra, A. M. G. Pinheiro // ETRI Journal. – 2019. – Vol. 41. – № 1. – P. 93–108. – <https://doi.org/10.4218/etrij.2018-0509>.

1.111. Adelson E. H. Single lens stereo with a plenoptic camera / E. H. Adelson, J. Y. A. Wang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1992. – T. 14. – № 2. – C. 99–106. <https://doi.org/10.1109/34.121783>.

1.112. Schelkens, P. JPEG Pleno light field coding technologies / P. Schelkens, P. Astola, E. A. B. da Silva, C. Pagliari, C. Perra, I. Tabus, O. Watanabe // Proceedings of SPIE 11137, Applications of Digital Image Processing XLII, 111371G (6 September 2019). – <https://doi.org/10.1117/12.2532049>.

1.113. Ebrahimi T. JPEG Pleno: Toward an Efficient Representation of Visual Reality / T. Ebrahimi, S. Foessel, F. Pereira, P. Schelkens // IEEE MultiMedia. – 2016. – T. 23. – № 4. – C. 14–20. <https://doi.org/10.1109/mmul.2016.64>.

1.114. Adelson E. H. The Plenoptic Function and the Elements of Early Vision / E. H. Adelson, J. R. Bergen // Computational models of visual processing. – Cambridge, MA, US: The MIT Press, 1991. – C. 3–20. <https://doi.org/10.7551/mitpress/2002.003.0004>. ISBN: 9780262290890.

1.115. Yaraş F. State of the Art in Holographic Displays: A Survey / F. Yaraş, H. Kang, L. Onural // Journal of Display Technology. – 2010. – T. 6. – № 10. – C. 443–454. <https://doi.org/10.1109/JDT.2010.2045734>.

1.116. Thanou D. Graph-Based Compression of Dynamic 3D Point Cloud Sequences / D. Thanou, P. A. Chou, P. Frossard // IEEE Trans Image Process. – 2016. – Vol. 25. – № 4. – P. 1765–1778. – <https://doi.org/10.1109/TIP.2016.2529506>.

1.117. Meiju L. Application of Improved Point Cloud Streamlining Algorithm in Point Cloud Registration / L. Meiju, Z. Junrui, G. Xifeng and Z. Rui // 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). – 2020. – P. 4824–4828. – <https://doi.org/10.1109/CCDC49329.2020.9164177>.

1.118. Zhang Y.-P. Fast generation of full analytical polygon-based computer-generated holograms / Y.-P. Zhang, F. Wang, T.-C. Poon, S. Fan, W. Xu // Optics Express. – 2018. – T. 26. – № 15. – C. 19206–19224. <https://doi.org/10.1364/oe.26.019206>.

1.119. Haumont D. Complete Polygonal Scene Voxelization / D. Haumont, N. Warzée // Journal of Graphics Tools. – 2002. – Т. 7. – № 3. – С. 27–41. <https://doi.org/10.1080/10867651.2002.10487563>.

1.120. Huang M. An Efficient Encoding Voxel-Based Segmentation (EVBS) Algorithm Based on Fast Adjacent Voxel Search for Point Cloud Plane Segmentation / M. Huang, P. Wei, X. Liu // Remote Sensing. – 2019. – Т. 11. – № 23. – С. 2727. <https://doi.org/10.3390/rs11232727>.

1.121. Ferley E. Practical volumetric sculpting / E. Ferley, M.-P. Cani, J.-D. Gascuel // The Visual Computer. – 2000. – Т. 16. – № 8. – С. 469–480. <https://doi.org/10.1007/PL00007216>.

1.122. Karabassi E.-A. A Fast Depth-Buffer-Based Voxelization Algorithm / E.-A. Karabassi, G. Papaioannou, T. Theoharis // Journal of Graphics Tools. – 1999. – Т. 4. – № 4. – С. 5–10. <https://doi.org/10.1080/10867651.1999.10487510>.

1.123. Lee, S. Voxel-Based Scene Representation for Camera Pose Estimation of a Single RGB Image / S. Lee, H. Hong, C. Eem // Appl. Sci. – 2020. – Vol. 10. – № 24. – P. 8866. – <https://doi.org/10.3390/app10248866>.

1.124. Cuboro AG. Marble runs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://cuboro.ch/en/kugelbahnen/> (дата обращения: 18.01.2023).

1.125. Okada N. Band-limited double-step Fresnel diffraction and its application to computer-generated holograms / N. Okada, T. Shimobaba, Y. Ichihashi, R. Oi, K. Yamamoto, M. Oikawa, T. Kakue, N. Masuda, T. Ito // Optics Express. – 2013. – Т. 21. – № 7. – С. 9192–9197. <https://doi.org/10.1364/oe.21.009192>.

1.126. Belashov, A. V. Experimental evaluation of inhomogeneous nonlinear refractive index distribution using time-resolved inline digital holography / A. V. Belashov, S. S. Nalegaev, I. A. Shevkunov, S. E. Putilin, Y. C. Lin, C. J. Cheng, N. V. Petrov // Frontiers in Optics + Laser Science 2021: Technical Digest Series. – Washington, DC: Optica Publishing Group. – 2021. – С. JW7A.119.

1.127. Lazarev G. LCOS Spatial Light Modulators: Trends and Applications / G. Lazarev, A. Hermerschmidt, S. Krüger, S. Osten // Optical Imaging and Metrology:

Advanced Technologies. – 2012. – C. 1–29.  
<https://doi.org/10.1002/9783527648443.ch1>.

1.128. Haist T. Holography using pixelated spatial light modulators — Part 1: theory and basic considerations / T. Haist, W. Osten // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2015. – Т. 14. – № 4. – С. 041310.  
<https://doi.org/10.1117/1.JMM.14.4.041310>.

1.129. Haist T. Holography using pixelated spatial light modulators — Part 2: applications / T. Haist, W. Osten // Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS. – 2015. – Т. 14. – № 4. – С. 041311.  
<https://doi.org/10.1117/1.JMM.14.4.041311>.

1.130. Geng J. Three-dimensional display technologies / J. Geng // Advances in Optics and Photonics. – 2013. – Т. 5. – № 4. – С. 456–535.  
<https://doi.org/10.1364/AOP.5.000456>.

1.131. Son J. Y. Holographic and Light-Field Imaging as Future 3-D Displays / J. Y. Son, H. Lee, B. R. Lee, K. H. Lee // Proceedings of the IEEE. – 2017. – Т. 105. – № 5. – С. 789–804. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2017.2666538>.

1.132. Smalley D. Volumetric Displays: Turning 3-D Inside-Out / D. Smalley, T.-C. Poon, H. Gao, J. Kvavle, K. Qaderi // Optics and Photonics News. – 2018. – Т. 29. – № 6. – С. 26–33. <https://doi.org/10.1364/OPN.29.6.000026>.

1.133. Компанец И. Н. Микродисплеи в системах пространственной модуляции света / И. Н. Компанец, А. Л. Андреев // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 4. – С. 294–302.

1.134. Воскобойник Г. А. Применение когерентных оптических вычислительных устройств для решения задач информационного поиска / Г. А. Воскобойник, И. С. Гибин, Е. С. Неживенко, П. Е. Твердохлеб // Автометрия. – 1971. – Т. 7. – № 1. – С. 77–81.

1.135. Шойдин С. А. Метод достижения максимальной дифракционной эффективности голограмм на основе оптимизации формфактора / С. А. Шойдин // Компьютерная оптика. – 2016. – Т. 40. – № 4. – С. 501–507.  
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-2016-40-4-501-507>.

1.136. Шойдин С. А. Формфактор голограмм и модификация статистики / С. А. Шойдин // Сборник материалов XIV Международного научного конгресса Интерэкспо ГЕО-Сибирь: Международная научная конференция «СибОптика-2018», 23–27 апреля 2018 г. – Новосибирск: СГУГиТ. – 2018. – Т. 2. – С. 258–265.

1.137. Шойдин С. А. Требования к лазерному излучению и формфактор голограмм / С. А. Шойдин // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83. – № 5. – С. 65–75.

1.138. Шойдин С. А. Формфактор голограмм сложных изображений / С. А. Шойдин, А. В. Трифанов // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42. – № 3. – С. 362–368. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-2018-42-3-362-368>.

1.139. Мешалкин А. Ю. Формфактор голограмм в режиме дифракции Рамана – Ната / А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин // Тезисы докладов XVI международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HOLOEXPO-2019, 10–12 сентября 2019 г. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, ООО «Микро и наноголографические системы». – 2019. – С. 279–289. ISBN: 978-5-7038-5251-4.

1.140. Привалов В. Е. Формфактор и временная когерентность излучения / В. Е. Привалов, С. А. Шойдин, А. В. Трифанов // Оптический журнал. – 2018. – Т. 85. – № 9. – С. 25–30. <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2018-85-09-25-30>.

1.141. Lucente M. Computational holographic bandwidth compression / M. Lucente // IBM Systems Journal. – 1996. – Т. 35. – № 3.4. – С. 349–365. <https://doi.org/10.1147/sj.353.0349>.

1.142. Lucente M. Diffraction-Specific Fringe Computation for Electro-Holography // Thesis (Ph. D.), Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science. – 1994. – 175 p. <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/11621> (дата обращения: 18.01.2023).

1.143. Products – Motion Displays – Zebra Imaging [Электронный ресурс] // Zebra Imaging, Inc. 2011. – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20110504033615/http://www.zebraimaging.com/products/motion-displays> (дата обращения: 18.01.2023).

1.144. DARPA successfully completes 3D holographic display technology demonstration program [Электронный ресурс] // Zebra Imaging, Inc. 2011. – Режим доступа: [https://web.archive.org/web/20110810074845/http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2011/2011/03/24\\_DARPA\\_Successfully\\_Completes\\_3D\\_Holographic\\_Display\\_Technology\\_Demonstration\\_Program.aspx](https://web.archive.org/web/20110810074845/http://www.darpa.mil/NewsEvents/Releases/2011/2011/03/24_DARPA_Successfully_Completes_3D_Holographic_Display_Technology_Demonstration_Program.aspx) (дата обращения: 18.01.2023).

1.145. Zebra Imaging Awarded Phase II SBIR Contract for Holographic Display by the U.S. Air Force Research Laboratory [Электронный ресурс] // Zebra Imaging, Inc. 2010. – Режим доступа: <https://www.prnewswire.com/news-releases/zebra-imaging-awarded-phase-ii-sbir-contract-for-holographic-display-by-the-us-air-force-research-laboratory-95406384.html> (дата обращения: 18.01.2023).

1.146. Products – Digital Prints – Zebra Imaging [Электронный ресурс] // Zebra Imaging, Inc. 2011. – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20110609012634/http://www.zebraimaging.com/products/digital-prints> (дата обращения: 18.01.2023).

1.147. Kim S.-K. Evaluation of the monocular depth cue in 3D displays / S.-K. Kim, D.-W. Kim, Y. M. Kwon, J.-Y. Son // Optics Express. – 2008. – Т. 16. – № 26. – С. 21415–21422. <https://doi.org/10.1364/OE.16.021415>.

1.148. Teng D. Super multi-view three-dimensional display through spatial-spectrum time-multiplexing of planar aligned OLED microdisplays / D. Teng, L. Liu, B. Wang // Optics Express. – 2014. – Т. 22. – № 25. – С. 31448–31457. <https://doi.org/10.1364/OE.22.031448>.

1.149. Susami K. Ocular vergence and accommodative state to super multi-view stereoscopic image / K. Susami, S. Abe, Y. Kajiki, T. Endo, T. Hatada, T. Honda // 3 Dimensional Image Conf. 2000 by Operating Committee of 3 Dimensional Image Conf. – 2000. – С. 155–158.

1.150. Balogh T. The Holovizio System–New Opportunity Offered by 3D Displays / T. Balogh, P. T. Kovács, Z. Dobrányi, A. Barsi, Z. Megyesi, Z. Gaál, G. G. Balogh // Proceedings of the TMCE. – 2008. – С. 79–89.

[https://www.academia.edu/47764063/The\\_Holovizio\\_System\\_New\\_Opportunity\\_Offer\\_ed\\_by\\_3D\\_Displays](https://www.academia.edu/47764063/The_Holovizio_System_New_Opportunity_Offer_ed_by_3D_Displays) (дата обращения: 18.01.2023).

1.151. Takaki Y. Multi-projection of lenticular displays to construct a 256-view super multi-view display / Y. Takaki, N. Nago // *Optics Express*. – 2010. – Т. 18. – № 9. – С. 8824–8835. <https://doi.org/10.1364/OE.18.008824>.

1.152. Гибин И. С. Экспериментальное исследование макета системы генерации динамической сцены для тестирования тепловизионных приборов / И. С. Гибин, В. И. Козик, Е. С. Нежевенко // *Автоматрия*. – 2013. – Т. 49. – № 1. – С. 80–85.

1.153. DLP5500 DLP® 0.55 XGA Series 450 DMD [Электронный ресурс]: Datasheet // Texas Instruments Incorporated. – Режим доступа: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/dlp5500.pdf> (дата обращения: 18.01.2023).

1.154. de Bougrenet de la Tocnaye J. L. Complex amplitude modulation by use of liquid-crystal spatial light modulators / J. L. de Bougrenet de la Tocnaye, L. Dupont // *Applied Optics*. – 1997. – Т. 36. – № 8. – С. 1730–1741. <https://doi.org/10.1364/AO.36.001730>.

1.155. Mok F. Real-time computer-generated hologram by means of liquid-crystal television spatial light modulator / F. Mok, J. Diep, H.-K. Liu, D. Psaltis // *Optics Letters*. – 1986. – Т. 11. – № 11. – С. 748–750. <https://doi.org/10.1364/OL.11.000748>.

1.156. Maeno K. Electro-holographic display using 15mega pixels LCD / K. Maeno, N. Fukaya, O. Nishikawa, K. Sato, T. Honda // *Proceedings of SPIE*. – 1996. – Т. 2652. – С. 15–23. <https://doi.org/10.1117/12.236065>.

1.157. Senoh T. Viewing-Zone-Angle-Expanded Color Electronic Holography System Using Ultra-High-Definition Liquid Crystal Displays With Undesirable Light Elimination / T. Senoh, T. Mishina, K. Yamamoto, R. Oi, T. Kurita // *Journal of Display Technology*. – 2011. – Т. 7. – № 7. – С. 382–390. <https://doi.org/10.1109/JDT.2011.2114327>.

1.158. Falldorf C. 3D Display System Based on Spherical Wave Field Synthesis / C. Falldorf, P.-Y. Chou, D. Prigge, R. B. Bergmann // Applied Sciences. – 2019. – T. 9. – № 18. – C. 3862. <https://doi.org/10.3390/app9183862>.

1.159. Senoh T. Multiview image and depth map coding for holographic TV system / T. Senoh, K. Wakunami, Y. Ichihashi, H. Sasaki, R. Oi, K. Yamamoto // Optical Engineering. – 2014. – T. 53. – № 11. – C. 1–11. <https://doi.org/10.1117/1.OE.53.11.112302>.

1.160. Häussler R. Large real-time holographic 3D displays: enabling components and results / R. Häussler, Y. Gritsai, E. Zschau, R. Missbach, H. Sahm, M. Stock, H. Stolle // Applied Optics. – 2017. – T. 56. – № 13. – C. F45–F52. <https://doi.org/10.1364/AO.56.000F45>.

1.161. Chen J.-S. Realization of real-time interactive 3D image holographic display [Invited] / J.-S. Chen, D. Chu // Applied Optics. – 2016. – T. 55. – № 3. – C. A127–A134. <https://doi.org/10.1364/AO.55.00A127>.

1.162. Blanche P.-A. Holographic three-dimensional telepresence using large-area photorefractive polymer / P.-A. Blanche, A. Bablumian, R. Voorakaranam, C. Christenson, W. Lin, T. Gu, D. Flores, P. Wang, W.-Y. Hsieh, M. Kathaperumal, B. Rachwal, O. Siddiqui, J. Thomas, R. A. Norwood, M. Yamamoto N. Peyghambarian // Nature. – 2010. – T. 468. – № 7320. – C. 80–83. <https://doi.org/10.1038/nature09521>.

1.163. Blanche P.-A. Review of Organic Photorefractive Materials and Their Use for Updateable 3D Display / P.-A. Blanche, J.-W. Ka, N. Peyghambarian // Materials. – 2021. – T. 14. – № 19. <https://doi.org/10.3390/ma14195799>.

1.164. Yang X. A Fast Computer-Generated Holographic Method for VR and AR Near-Eye 3D Display / X. Yang, H. Zhang, Q.-H. Wang // Applied Sciences. – 2019. – T. 9. – № 19. – C. 4164. <https://doi.org/10.3390/app9194164>.

1.165. Chen, H.-M. P. Pursuing High Quality Phase-Only Liquid Crystal on Silicon (LCoS) Devices / H.-M. P. Chen, J.-P. Yang, H.-T. Yen, Z.-N. Hsu, Y. Huang, S.-T. Wu // Appl. Sci. – 2018. – Vol. 8. – P. 2323. – <https://doi.org/10.3390/app8112323>.

1.166. Yamashita S. Spatial Light Phase Modulator With Bidirectional Tilt–Piston Micromirror Array — Part II: Fabrication and Experiment / S. Yamashita, M. Mita, H. Fujita, T. Yamamoto, M. Kawai, M. Yano // *Journal of Microelectromechanical Systems*. – 2011. – Т. 20. – № 1. – С. 279–287. <https://doi.org/10.1109/JMEMS.2010.2090497>.

1.167. Márquez A. Anamorphic and spatial frequency dependent phase modulation on liquid crystal displays. Optimization of the modulation diffraction efficiency / A. Márquez, C. Iemmi, I. Moreno, J. Campos, M. J. Yzuel // *Optics Express*. – 2005. – Т. 13. – № 6. – С. 2111–2119. <https://doi.org/10.1364/OPEX.13.002111>.

1.168. Что такое OLED-дисплеи и правда ли это – прорыв на рынке экранов [Электронный ресурс] // РБК Тренды. 2021. – Режим доступа: <https://trends.rbc.ru/trends/industry/6059c3c19a7947d1675bf7f6#p1> (дата обращения: 18.01.2023).

1.169. Stanley M. Novel electro-optic modulator system for the production of dynamic images from giga-pixel computer-generated holograms / M. Stanley, P. B. Conway, S. D. Coomber, J. C. Jones, D. C. Scattergood, C. W. Slinger, R. W. Bannister, C. V. Brown, W. A. Crossland, A. R. L. Travis // *Proceedings of SPIE*. – 2000. – Т. 3956. – С. 13–22. <https://doi.org/10.1117/12.379994>.

1.170. Smalley D. E. Anisotropic leaky-mode modulator for holographic video displays / D. E. Smalley, Q. Y. J. Smithwick, V. M. Bove, J. Barabas, S. Jolly // *Nature*. – 2013. – Т. 498. – № 7454. – С. 313–317. <https://doi.org/10.1038/nature12217>.

1.171. Jiang Q. When metasurface meets hologram: principle and advances / Q. Jiang, G. Jin, L. Cao // *Advances in Optics and Photonics*. – 2019. – Т. 11. – № 3. <https://doi.org/10.1364/AOP.11.000518>.

1.172. Мешалкин А. Ю. Реверсивная поляризационная голографическая запись в многослойных наноструктурах As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>-Se / А. Ю. Мешалкин // *Электронная обработка материалов*. – 2017. – Т. 53. – № 6. – С. 97–104. <https://doi.org/10.5281/zenodo.1051276>.

1.173. Shang G. Metasurface Holography in the Microwave Regime / G. Shang, Z. Wang, H. Li, K. Zhang, Q. Wu, S. N. Burokur, X. Ding // *Photonics*. – 2021. – Т. 8. – № 5. <https://doi.org/10.3390/photonics8050135>.

1.174. Ванников А. В., Гришина А. Д., Перешивко Л. Я., Кривенко Т. В.; Институт электрохимии им. А. Н. Фрумкина РАН. Фоторефрактивный полимерный материал. Патент RU2242782С2, Российская Федерация, МПК G03С 1/72, G03G 5/07; заявл. 28.11.2002; опубл. 20.12.2004.

1.175. Kang H. Computer-generated 3D holograms of depth-annotated images / H. Kang, C. Ahn, S. Lee, S. Lee // *Proceedings of SPIE*. – 2005. – Т. 5742. – С. 234–241. <https://doi.org/10.1117/12.587422>.

1.176. Shoydin S. A. Transmission of 3D Holographic Information via Conventional Communication Channels and the Possibility of Multiplexing in the Implementation of 3D Hyperspectral Images / S. A. Shoydin, A. L. Pазоев // *Photonics*. – 2021. – Vol. 8. – № 10. – P. 448–473. <https://doi.org/10.3390/photonics8100448>.

1.177. Шойдин, С. А. Передача голографической информации супергетеродинамированием / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // HOLOEXPO 2020: XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2020. – С. 87–97.

## Литература главы 2

2.1. Верхогляд А. Г. Автоматизированная система синтеза ИК-изображений для тестирования характеристик матричных фотоприёмных устройств / Верхогляд А. Г., Гибин И. С., Елесин А. Г., Касторский Л. Б., Кокарев С. А., Солдатенко А. В., Ступак М. Ф. // *Успехи прикладной физики*. – 2018. – Т. 6. – № 3. – С. 260–268.

2.2. Чугуй Ю. В. Объёмные эффекты при формировании изображения 3D асимметричного края / Ю. В. Чугуй // Сб. матер. XVI Междунар. науч. конгр. Интерэкспо ГЕО-Сибирь: Национальн. конф. с междунар. участ. «СибОптика-

2020». – 2020. – Т. 8. – № 1. – С. 65–81. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-8-1-65-81>. ISSN: 2618-981X.

2.3. Кольер Р. Дж. Оптическая голография / Р. Дж. Кольер, К. Б. Беркхардт, Л. Х. Лин; пер. с англ. под ред. Ю. И. Островского. – Москва: Мир, 1973. – 688 с.

2.4. Sobolewska A. On the long time holographic grating recording process in azo-polymer / A. Sobolewska, S. Bartkiewicz // Applied Physics Letters. – 2009. – Т. 95. – № 12. – С. 123302. <https://doi.org/10.1063/1.3232223>.

2.5. Raman C. V. The diffraction of light by high frequency sound waves: Part I / C. V. Raman, N. S. N. Nath // Proceedings of the Indian Academy of Sciences. – 1936. – Т. 2. – С. 568–574. <http://dspace.rii.res.in/bitstream/2289/2045/1/1936%20Proc%20Indian%20Acad%20Sci%20A%20V2%20p406-412.pdf> (дата обращения: 18.01.2023).

2.6. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский // Учебник для вузов. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Радио и связь, 1986. – 512 с.: ил.

2.7. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы / С. И. Баскаков. – Стереотипное: Изд. 4, испр. и доп. – Москва: URSS, 2022. – 528 с. ISBN: 978-5-9519-2628-9.

2.8. Geng J. Structured-light 3D surface imaging: a tutorial / J. Geng // Advances in Optics and Photonics. – 2011. – Т. 3. – № 2. – С. 128–160. <https://doi.org/10.1364/AOP.3.000128>.

2.9. Шойдин С. А. Способ дистанционного формирования голографической записи / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Автометрия. – 2021. – Т. 57. – № 1. – С. 92–102. <https://doi.org/10.15372/AUT20210110>.

2.10. Гребенюк К. А. Восстановление изображения с цифровой фурье-голограммы в условиях превышения частоты Найквиста / К. А. Гребенюк, А. А. Гребенюк, В. П. Рябухо // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – Т. 78. – № 2. – С. 24–28.

2.11. Zhang H. Scaling of Three-Dimensional Computer-Generated Holograms with Layer-Based Shifted Fresnel Diffraction / H. Zhang, L. Cao, G. Jin // *Applied Sciences*. – 2019. – Т. 9. – № 10. <https://doi.org/10.3390/app9102118>.

2.12. Schnars U. Digital Holography: Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques / U. Schnars, W. Jüptner. – Heidelberg: Springer-Verlag, 2005. – 164 с. ISBN: 3-540-21934-X.

2.13. Schelkens, P. JPEG Pleno / P. Schelkens // *Proceedings of ITU Workshop on „The Future of Media“*, 8 October 2019 – Geneva, Switzerland: International Telecommunication Union (ITU).

2.14. Shoydin S. A. Use of spatial symmetries for problems of modeling of image transfer processes / S. A. Shoydin, A. L. Pazojev // *Proceedings of SPIE 11208, 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics*. – 2019. – Т. 11208. – С. 112081A. <https://doi.org/10.1117/12.2539833>.

2.15. Котельников В. А. О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет // *Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботорочной промышленности*, 1933. Репринт статьи в журнале УФН. – Т. 176. – № 7. – 2006. – С. 762–770.

2.16. Nyquist H. Certain Topics in Telegraph Transmission Theory / H. Nyquist // *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*. – 1928. – Т. 47. – № 2. – С. 617–644. <https://doi.org/10.1109/T-AIEE.1928.5055024>.

2.17. Huang H. Y. H. Path-independent phase unwrapping using phase gradient and total-variation (TV) denoising / H. Y. H. Huang, L. Tian, Z. Zhang, Y. Liu, Z. Chen, G. Barbastathis // *Optics Express*. – 2012. – Т. 20. – № 13. – С. 14075–14089. <https://doi.org/10.1364/oe.20.014075>.

2.18. Xie X. Iterated unscented Kalman filter for phase unwrapping of interferometric fringes / X. Xie // *Optics Express*. – 2016. – Vol. 24. – № 17. – P. 18872–18897. <https://doi.org/10.1364/oe.24.018872>.

2.19. Шевкунов И. А. Метод фазовой развёртки сдвигом восстановленного поля / И. А. Шевкунов // Вестник Санкт-Петербургского университета. – 2015. – Сер. 4. – Т. 2(60). – № 4.

2.20. Su X. Reliability-guided phase unwrapping algorithm: a review / X. Su, W. Chen // Optics and Lasers in Engineering. – 2004. – Т. 42. – № 3. – С. 245–261. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2003.11.002>.

2.21. Белашов А. В. Метод вычисления динамического фазового набега в голографической интерферометрии без ликвидации фазовых разрывов / А. В. Белашов, Н. В. Петров, И. В. Семёнова // Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38. – № 4. – С. 710–716. <https://doi.org/10.18287/0134-2452-2014-38-4-710-716>.

2.22. Кодирование JPEG [Электронный ресурс] // Национальная библиотека им. Н. Э. Баумана. – Режим доступа: [https://ru.bmstu.wiki/Кодирование\\_JPEG](https://ru.bmstu.wiki/Кодирование_JPEG) (дата обращения: 18.01.2023).

2.23. ISO/IEC 21794. Information technology – Plenoptic image coding system (JPEG Pleno).

2.24. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. Книга 1 / У. Прэтт; пер. с англ. под ред. Д. С. Лебедева. – Москва: Мир, 1982. – 312 с.

2.25. Шойдин С. А. Коррекция проекционных деформаций 3D объекта на этапе формирования голограммы / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Сб. матер. XVI Междунар. науч. конгр. Интерэкспо ГЕО-Сибирь: Национальн. конф. с междунар. участ. «СибОптика-2020». – 2020. – Т. 8. – № 1. – С. 97–107. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2020-8-1>.

2.26. Bracewell R. N. The Fourier Transform and Its Applications. 3rd Edition / R. N. Bracewell // McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 1999. – 640 с. ISBN: 978-0-07-303938-1.

2.27. Заказнов Н. П. Теория оптических систем / Н. П. Заказнов, С. И. Кирюшин, В. И. Кузичев // Учебник для студентов приборостроительных специальностей вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Машиностроение, 1992. – 448 с.

2.28. Жимулёва Е. С. Методологические разработки телецентрических объективов для систем размерного контроля / Е. С. Жимулёва, П. С. Завьялов, М. С. Кравченко // Автометрия. – 2018. – Т. 54. – № 1. – С. 61–70. <https://doi.org/10.15372/AUT20180109>.

### Литература главы 3

3.1. Sabel T. Volume Holography: Novel Materials, Methods and Applications / T. Sabel // Holographic Materials and Optical Systems / под ред. М. С. Lensen, I. Naydenova, D. Nazarova, T. Babeva. – Rijeka: IntechOpen, 2017. – P. Ch. 1. <https://doi.org/10.5772/67001>. ISBN: 978-953-51-3038-3.

3.2. Барачевский В. А. Современное состояние разработки светочувствительных сред для голографии (обзор) / В. А. Барачевский // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124. – № 3. – С. 371–399. <http://doi.org/10.21883/OS.2018.03.45659.238-17>.

3.3. Шойдин С. А. Дифракционная эффективность голограмм, записанных гауссовыми пучками / С. А. Шойдин // Сборник материалов XI Международного научного конгресса Интерэкспо ГЕО-Сибирь: Международная научная конференция «СибОптика-2015», 13–25 апреля 2015 г. – Новосибирск: СГУГиТ. – 2015. – Т. 1. – С. 71–76.

3.4. Shoydin, S. A. Requirements to Lasers and Form Factor of Holograms // Optical Memory and Neural Networks (Information Optics). – 2014. – Vol. 23. – №. 4. – P. 287–294. – ISSN: 1060-992X.

3.5. Шойдин С. А. О требованиях к параметрам источника излучения для голографии / С. А. Шойдин // Лазеры. Измерения. Информация. 2013: сборник докладов – Санкт-Петербург: Издательство Санкт-Петербургского политехнического университета. – 2013. – Т. 1. – С. 94–107.

3.6. Meshalkin A. Direct photoinduced surface relief formation in carbazole-based azopolymer using polarization holographic recording / A. Meshalkin, S. Robu, E.

Achimova, A. Prisacar, D. Shepel, V. Abashkin, G. Triduh // *Journal of Optoelectronics and Advanced Materials*. – 2016. – Т. 18. – № 9–10. – С. 763–768.

3.7. Cazac V. Surface relief and refractive index gratings patterned in chalcogenide glasses and studied by off-axis digital holography / V. Cazac, A. Meshalkin, E. Achimova, V. Abashkin, V. Katkovnik, I. Shevkunov, D. Claus, G. Pedrini // *Applied Optics*. – 2018. – Т. 57. – № 3. – С. 507–513.  
<https://doi.org/10.1364/AO.57.000507>.

3.8. Апрель Ж. Оптическая голография / Ж. Апрель, А. Арсено, Н. Баласубраманьян; под ред. Г. Колфилда; пер. с англ. С. Б. Гуревича. – Москва: Мир, 1982. – Т. 1. – 376 с.

3.9. Хинчин А. Я. Понятие энтропии в теории вероятностей / А. Я. Хинчин // *Успехи математических наук*. – 1953. – Т. 8. – № 3(55). – С. 3–20.

3.10. Знаменский В. В. Общий курс полевой геофизики: Учебник для вузов / В. В. Знаменский. – Ленинград: Недра, 1989. – 520 с. ISBN: 5-247-00666-6.

3.11. Миронов В. С. Курс гравиразведки. 2-е изд., перераб. и доп. / В. С. Миронов. – Ленинград: Недра, 1980. – 543 с.

3.12. Фейнман Р. Ф. Квантовая механика и интегралы по траекториям / Р. Ф. Фейнман, А. Хибс; пер. с англ. Ю. Л. Обухова и Э. М. Барлита; под ред. В. С. Барашенкова. – Москва: Мир, 1968. – 384 с.

3.13. Вест А. Р. Химия твёрдого тела. Теория и приложения: В 2-х ч. Ч. 1 / А. Р. Вест; пер. с англ. А. Р. Кауля и И. Б. Куценка; под ред. Ю. Д. Третьякова. – Москва: Мир, 1988. – 558 с. ISBN: 5-03-000056-9.

3.14. Биленькая, С. И. Электромагнитный формфактор протона и тяжёлые гипотетические частицы / С. И. Биленькая, С. М. Биленький, Ю. М. Казаринов, Л. И. Лapidус // *Письма в ЖЭТФ*. – 1974. – Т. 19. – № 9. – С. 613–616.

3.15. Stolz D. One-step fabrication of surface relief dot-matrix holograms using supramolecular azopolymer thin films / D. Stolz, J. Strobel, M. Leven, L. Kurlandski, H. Abourahma, D. J. McGee // *Proceedings of SPIE*. – 2021. – Т. 11710. – С. 1171008.  
<http://doi.org/10.1117/12.2582763>.

3.16. Achimova E. Direct surface relief formation on As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>–Se nanomultilayers in dependence on polarization states of recording beams / E. Achimova, A. Stronski, V. Abaskin, A. Meshalkin, A. Paiuk, A. Prisacar, P. Oleksenko, G. Triduh // *Optical Materials*. – 2015. – Т. 47. – С. 566–572. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.06.044>.

3.17. Matsushima K. Band-Limited Angular Spectrum Method for Numerical Simulation of Free-Space Propagation in Far and Near Fields / K. Matsushima, T. Shimobaba // *Optics Express*. – 2009. – Т. 17. – № 22. – С. 19662–19673. <https://doi.org/10.1364/OE.17.019662>.

3.18. Ciapurin I. V. Modeling of Gaussian beam diffraction on volume Bragg gratings in PTR glass / I. V. Ciapurin, L. B. Glebov, V. I. Smirnov // *Proceedings of SPIE*. – 2005. – Т. 5742. – С. 183–194. <https://doi.org/10.1117/12.591215>.

3.19. Шойдин С. А., Мешалкин А. Ю.; Способ экспресс анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала. Патент RU2734093C1, Российская Федерация, МПК G03H 1/00, G01M 11/00; заявл. 07.04.2020; опубл. 12.10.2020, Бюл. № 29.

3.20. Мешалкин, А. Ю. Дифракционный способ измерения динамического диапазона фотоотклика голографического фазового материала / А. Ю. Мешалкин, С. А. Шойдин // *HOLOEXPO 2020: XVII международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов*. – Москва: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. – С. 235–245. ISBN: 978-5-7038-5516-4.

3.21. Привалов, В. Е. Лазеры и экологический мониторинг атмосферы: учебное пособие. 1-е изд. / В. Е. Привалов, А. Э. Фотиади, В. Г. Шеманин. – Санкт-Петербург: Лань, 2013. – 288 с. – ISBN: 978-5-8114-1370-6.

3.22. Michelson A. A. On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether / A. A. Michelson, E. W. Morley // *American Journal of Science*. – 1887. – Т. s3-34. – № 203. – С. 333–345. <https://doi.org/10.2475/ajs.s3-34.203.333>.

3.23. Машков Г. И. Объёмные фазовые регистрирующие среды с физическим проявлением скрытого изображения / Г. И. Машков, А. П. Попов, О. Б. Ратнер // *Оптика и спектроскопия*. – 1982. – Т. 52. – № 4. – С. 585–588.

3.24. Шойдин С. А. Методика выполнения измерений дифракционной эффективности голограммы Денисюка на ПФГ-04 / С. А. Шойдин, В. Ю. Кондаков, Г. О. Смольский // Сборник материалов научно-технической конференции: Проблемы метрологического обеспечения топографо-геодезического производства и землеустроительных работ, 17–21 декабря 2001 г. – Новосибирск: СГГА. – 2001. – С. 62.

3.25. Шойдин С. А. Оценка энергетических характеристик голографических визиров / С. А. Шойдин, В. Ю. Кондаков // Сборник материалов ЛШ международной научно-технической конференции, посвящённой 70-летию СГГА: Современные проблемы геодезии и оптики, 11–21 марта 2003 г. – Новосибирск: СГГА. – 2003. – Т. 2. – С. 157.

3.26. Шойдин С. А. Влияние параметров лазеров на информационную ёмкость канала связи / С. А. Шойдин // Тез. конф. Лазеры, измерения, 9–11 июня 2014 г. – Санкт-Петербург: СПбПУ. – 2014. – С. 117–118.

3.27. Волостников В. Г. Методы анализа и синтеза когерентных световых полей / В. Г. Волостников; под ред. Е. Б. Гугля. – Москва: Физматлит, 2014. – 256 с. ISBN: 978-5-9221-1586-5.

3.28. Погода А. П. Способы управления параметрами решёток коэффициента усиления в лазерах с многопетлевыми ОВФ-резонаторами // Дисс. канд. физ.-мат. наук. Политехнический Университет Петра Великого. Санкт-Петербург, 2015. 155 с.

3.29. Shoydin S. A. Formfactor of a hologram on a chalcogenide glassy semiconductor and azopolymer / S. A. Shoydin, A. Yu. Meshalkin, M. S. Kovalev // Optical Materials Express. – 2020. – Vol. 10. – № 8. – P. 1819–1825. <https://doi.org/10.1364/OME.399017>.

3.30. Шойдин С. А. Влияние нелинейности фотоотклика на дифракционную эффективность голограмм / С. А. Шойдин // Автометрия. – 2019. – Т. 55. – № 1. – С. 35–39. <https://doi.org/10.15372/AUT20190105>.

3.31. De Jong T. M. Surface-relief and polarization gratings for solar concentrators / T. M. de Jong, D. K. G. de Boer, C. W. M. Bastiaansen // Optics

Express. – 2011. – Т. 19. – № 16. – С. 15127–15142.  
<https://doi.org/10.1364/OE.19.015127>.

3.32. Bian S. Photoinduced surface deformations on azobenzene polymer films / S. Bian, J. M. Williams, D. Y. Kim, L. Li, S. Balasubramanian, J. Kumar, S. Tripathy // Journal of Applied Physics. – 1999. – Т. 86. – № 8. – С. 4498–4508.  
<https://doi.org/10.1063/1.371393>.

#### Литература главы 4

4.1. Takeda M. Fourier fringe analysis and its application to metrology of extreme physical phenomena: a review [Invited] / M. Takeda // Applied Optics. – 2013. – Т. 52. – № 1. – С. 20–29.

4.2. Bryngdahl O. Interferograms are Image Holograms / O. Bryngdahl, A. W. Lohmann // Journal of the Optical Society of America. – 1968. – Т. 58. – № 1. – С. 141–142. <https://doi.org/10.1364/JOSA.58.000141>.

4.3. Шойдин, С. А. Особенности синтеза SSB голограмм (SSBH) / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Тезисы докладов XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HoloExpo 2021. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2021. – С. 207–218.

4.4. Stroke, G. W. White-light reconstruction of holographic images using transmission holograms recorded with conventionally-focused images and „in-line“ background / G. W. Stroke // Physics Letters. – 2017. – Vol. 23. – № 5. – P. 325–327.  
[https://doi.org/10.1016/0031-9163\(66\)90022-9](https://doi.org/10.1016/0031-9163(66)90022-9).

4.5. Benton, S. A. Hologram reconstruction with extended incoherent sources / S. A. Benton // JOSA. – 1969. – Vol. 59. – P. 1545–1547.

4.6. Власов, Н. Г. Современное состояние и перспективы развития радужной голографии: Обзорная информация / Н. Г. Власов, А. Н. Заборов, А. В. Яновский; Сер. «Образцовые и высокоточные средства измерений» Вып. 3 – М.: Госстандарт СССР. ВНИИКИ, 1990. – 42 с.

4.7. Рябухо, В. П. Радужные голограммы / В. П. Рябухо // Физическое образование в вузах. – 2003. – Vol. 9. – № 4. – P. 88–99.

4.8. St-Hilaire, P. Color Images With The MIT Holographic Video Display / P. St-Hilaire, S. A. Benton, M. E. Lucente, P. M. Hubel // Practical Holography VI. – 1992. – Vol. 1. – № 2. – P. 12–34. <https://doi.org/10.1117/12.59642>.

4.9. Бессмельцев, В. П. Метод измерения основных параметров цифровых защитных голограмм для экспертного анализа и оперативного контроля их качества / В. П. Бессмельцев, В. В. Вилейко, М. В. Максимов // Автометрия. – 2020. – Т. 56. – № 2. – P. 20–33. <https://doi.org/10.15372/AUT20200202>.

4.10. Шойдин, С. А. Запись голограммы, переданной по каналу связи на одной боковой полосе / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев, И. К. Цыганов, Е. А. Дроздова // Тезисы докладов XVII международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HoloExpo 2021. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2021 С.109–117.

4.11. Shoydin S. A. Recording a Hologram Transmitted over a Communication Channel on One Sideband / S. A. Shoydin, S. B. Odinokov, A. L. Pazoev, I. K. Tsyganov, E. A. Drozdova // Applied Sciences. – 2021. – Т. 11. – № 23. – С. 11468. <https://doi.org/10.3390/app112311468>.

4.12. Шойдин С. А. Передача голографической информации на одной боковой полосе / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Сб. матер. XVII Междунар. науч. конгр. Интерэкспо ГЕО-Сибирь: Национальная. науч. конф. с междунар. участием «СибОптика-2021. Актуальные вопросы высокотехнологичных отраслей». – 2021. – Т. 8. – № 1. – С. 109–117. <https://doi.org/10.33764/2618-981X-2021-8-109-117>.

4.13. Шойдин, С. А. Синтез голограмм на приёмном конце канала связи с объектом голографирования / С. А. Шойдин // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44. – № 4. – С. 547–551. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-694>.

4.14. Смык, А. Ф. Асимметричные профили в поверхностно-рельефных голограммах / А. Ф. Смык, А. В. Шурыгин // Мир техники кино. – 2018. – Т. 12. – № 1. – С. 23–30.

4.15. Odinsonov, S. B. A technique of asymmetrical profiles in surface-relief holograms recording / S. B. Odinsonov, A. F. Smyk, A. V. Shurygin // Digital Holography and Three-Dimensional Imaging 2019, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2019), paper Th3A.27. – <https://doi.org/10.1364/DH.2019.Th3A.27>.

4.16. Порай-Кошиц, М. А. Основы структурного анализа химических соединений: Учеб. пособие. – 2-е изд., перераб. и доп. / М. А. Порай-Кошиц. – М.: Высш. школа, 1989. – 192 с. – ISBN: 5-06-000074-5.

4.17. Botsch, M. Geometric modeling based on polygonal meshes / M. Botsch, M. Pauly, L. Kobbelt, P. Alliez, B. Lévy, S. Bischoff, C. Rössl / ACM SIGGRAPH 2007 Courses on – SIGGRAPH '07. – 2007. – <https://doi.org/10.1145/1281500.1281640>.

4.18. Nasri A. H. Constructing polygonal complexes with shape handles for curve interpolation by subdivision surfaces // Computer-Aided Design. – 2001. – Vol. 33. – № 11. – P. 753–765. – [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(01\)00093-8](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(01)00093-8).

4.19. Кирьянов В. П. Моделирование процесса формирования отвесных участков кусочно-непрерывного профиля ДОО при одностадийной технологии их записи наклонными лазерными пучками / В. П. Кирьянов, В. Г. Никитин // Автометрия. – 2017. – Т. 53. – № 6. – С. 15–22. – <https://doi.org/10.15372/AUT20170602>.

4.20. Вейко, В. П. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. 1. изготовление дифракционных оптических элементов и фотошаблонов с амплитудным пропусканием / В. П. Вейко, В. П. Корольков, А. Г. Полещук, Д. А. Синев, Е. А. Шахно // Автометрия. – 2017. – Т. 53. – № 5. – С. 66–77. – <https://doi.org/10.15372/AUT20170507>.

4.21. Полещук, А. Г. Лазерные технологии в микрооптике. Ч. II. изготовление элементов с трёхмерным микрорельефом / А. Г. Полещук, В. П. Корольков, В. П. Вейко, Р. А. Заколдаев, М. М. Сергеев // Автометрия. – 2018. – Т. 54. – № 2. – С. 3–19. – <https://doi.org/10.15372/AUT20180201>.

4.22. Бессмельцев В. П. Контроль качества отражающих голограмм методами конфокальной микроскопии / В. П. Бессмельцев // Голография. Наука и практика: Сб. тр. 11-й Междунар. конф. «HOLOEXPO-2014», 16–17 сентября 2014 г. – Сочи, Россия, С. 80–85.

4.23. Бессмельцев, В. П. Высокоразрешающая система измерения основных параметров защитных голограмм для оперативного контроля качества и экспертного анализа / В. П. Бессмельцев, В. В. Вилейко, М. В. Максимов // HOLOEXPO 2019: XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям: Тезисы докладов. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2019. – С. 102–108.

4.24. Богданова Т. В. Проблемы создания телевизионных голографических систем / Т. В. Богданова, Г. С. Сафронов, В. П. Титарь // Тезисы докл. Всесоюзн. конф. «Развитие и совершенствование технических средств телевизионного вещания». – М.: Радио и связь. – 1988. – С. 15–16.

4.25. Пазоев, А. Л. Передача 3D голографической информации по радиоканалу / А. Л. Пазоев, С. А. Шойдин // Сб. трудов XXXII междунар. Школы-симп. по голографии, когерентной оптике и фотонике (HOLOSCHOOL XXXII). – 2022. – С. 132–134.

4.26. Крылов Ю. Стандарт IEEE 802.11n: особенности и возможности реализации / Ю. Крылов // Беспроводные технологии. – 2006. – Т. 4. – № 3. – С. 25–29. [https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/bt\\_04-2006-03.pdf](https://wireless-e.ru/wp-content/uploads/bt_04-2006-03.pdf) (дата обращения: 18.01.2023).

4.27. Шойдин, С. А. Качество восстановленного 3D голографического контента после передачи динамической голографической информации методом сжатия, аналогичным SSB / С. А. Шойдин, А. Л. Пазоев // Тезисы докладов XIX международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям HoloExpo 2022. – М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана. – 2022. – С. 172–176.

4.28. 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 // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46. – № 2. – С. 204–213. <https://doi.org/10.18287/2412-6179-CO-1037>.

**ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ 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. Пазоев – 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 Communication Channels and the Possibility of Multiplexing in the Implementation of 3D Hyperspectral Images / S. A. Shoydin, A. L. Puzov – 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. Pazoev, 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 Denisyuk'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 RU2707582C1, Россия, МПК G03H 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 RU2734093C1, Россия, МПК G03H 1/00, G01M 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».

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ДИССЕРТАЦИИ

2D, 3D	размерность отображаемого пространства (от англ. 2-dimensional и 3-dimensional)
4D	размерность массивов данных (от англ. 4-dimensional) – 3 пространственные и 1 временная координата
3G, 4G, 4G LTE, 5G	технологии мобильной связи 3, 4 и 5 поколений (от англ. Third Generation, Fourth Generation, Fourth Generation Long-Term Evolution, Fifth Generation)
4K UHD	стандарт цифрового телевидения высокой чёткости 3840×2160 пикселей (от англ. Ultra High Definition Television)
8K UHD	стандарт цифрового телевидения высокой чёткости 7680×4320 пикселей (от англ. Ultra High Definition Television)
BMP	формат хранения растровой графической информации (от англ. Bitmap Picture)
CGH	компьютерно-сгенерированная голограмма (от англ. Computer-Generated Hologram)
D-FFT	способ вычисления преобразования Френеля на основе быстрого преобразования Фурье (от англ. Double Fast Fourier Transform)
DLP	цифровой световой проектор (от англ. Digital Light Projector)
DMD	цифровая матрица зеркал (от англ. Digital Micromirror Device)
DSP	цифровой сигнальный процессор (от англ. Digital Signal Processor)
FLA	сфокусированный световой массив (от англ. Focus Light Array)
FoV	поле обзора (от англ. Field of View)
FTP	протокол передачи данных по сети (от англ. File Transfer Protocol)
Full HD	стандарт цифрового телевидения высокой чёткости 1920×1080 пикселей (от англ. Full High Definition)
HD	стандарт цифрового телевидения высокой чёткости 1280×720 пикселей (от англ. High Definition)
JPEG	формат хранения растровой графической информации (от англ. Joint Photographic Experts Group)
LED	технология матрицы светоизлучающих диодных экранов (от англ. Light-Emitting Diode)
MID	дисплей нескольких изображений (от англ. Multi Image

	Display)
MPEG	стандарт сжатия и передачи цифровой видео- и аудиоинформации (от англ. Moving Picture Experts Group)
OLED	технология матрицы светоизлучающих диодных экранов (от англ. Organic Light-Emitting Diode)
PC	персональный компьютер (от англ. Personal Computer)
PNG	формат хранения растровой графической информации (от англ. Portable Network Graphics)
PRP	фоторефрактивный полимер (от англ. Photorefractive Polymer)
RGB	способ кодирования цвета с помощью трёх цветов – красный, зелёный, синий (от англ. Red, Green, Blue)
SD	стандарт цифрового телевидения 720×576 пикселей (от англ. Standard Definition)
SECAM	стандарт аналогового цветного телевидения 720×576 пикселей (от фр. Séquentiel Couleur À Mémoire)
SLM	пространственный модулятор света (от англ. Spatial Light Modulator)
SSB	однополосная модуляция (амплитудная модуляция с одной боковой полосой) – метод кодирования одномерного радиосигнала на одной боковой полосе (от англ. Single-Sideband Modulation)
ToF	технология измерения расстояний, основанная на измерении времени пролёта, отражённого зондируемым объектом излучения (от англ. Time of Flight)
TV	телевидение (от англ. Television)
VZFO	оптика, формирующая зону обзора на основе матрицы микролинз (от англ. Viewing Zone Forming Optics)
АСМ	атомно-силовая микроскопия
Байт (Б)	1 байт = 2 <sup>3</sup> бит
БПФ (FFT)	быстрое преобразование Фурье (от англ. Fast Fourier Transform)
БПФр	быстрое преобразование Френеля
БХЖ	бихромат желатины
ВРП	высокоразрешающие пластинки
ГБ	Гигабайт (1 ГБ = 2 <sup>30</sup> байт = 2 <sup>33</sup> бит)
ДСП	дискретное спектральное преобразование
ДЭ	дифракционная эффективность

ЖК	технология матрицы светоизлучающих диодных экранов на основе жидких кристаллов
ЖКД	жидкокристаллический дисплей
ИК	инфракрасное излучение
МБ	Мегабайт ( $1 \text{ МБ} = 2^{20} \text{ байт} = 2^{23} \text{ бит}$ )
Мб	Мегабит ( $1 \text{ Мб} = 2^{20} \text{ бит}$ )
ОЗУ	оперативное запоминающее устройство (оперативная память)
ОС	операционная система
пикс.	пиксель – наименьший логический элемент цифрового изображения в растровой графике, либо элемент матрицы дисплея, формирующего изображение
ПСП	паттерн структурированных полос
ПФГ	пластинки фотографические высокоразрешающие для голографии
СВЧ	сверхвысокочастотное излучение
СИН	стол интерференционный
ТУ	технические условия
УФ	ультрафиолетовое излучение
ФО	фотоотклик
ХСП	халькогенидные стеклообразные полупроводники
ЦПТ	центральная предельная теорема

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Патент РФ № 2707582. Способ дистанционного формирования голографической записи / Шойдин С. А., Оpubл. 28.11.2019



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



(19) **RU** (11) **2 707 582** (13) **C1**  
 (51) МПК  
*G03H 1/00* (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК  
*G03H 1/00 (2019.02); G03H 1/08 (2019.02); G03H 1/0866 (2019.02)*

<p>(21)(22) Заявка: <b>2018124440</b>, <b>03.07.2018</b></p> <p>(24) Дата начала отсчета срока действия патента: <b>03.07.2018</b></p> <p>Дата регистрации: <b>28.11.2019</b></p> <p>Приоритет(ы): (22) Дата подачи заявки: <b>03.07.2018</b></p> <p>(45) Опубликовано: <b>28.11.2019</b> Бюл. № 34</p> <p>Адрес для переписки: <b>630501, Новосибирская обл., р/п Краснообск, ул. Западная, 226-73, Шойдин С.А.</b></p>	<p>(72) Автор(ы): <b>Шойдин Сергей Александрович (RU)</b></p> <p>(73) Патентообладатель(и): <b>Шойдин Сергей Александрович (RU)</b></p> <p>(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: <b>US 7782510 B2, 24.08.2010. JP 3155265 B2, 09.04.2001. SU 1368624 A1, 23.01.1988. US 2010/118117 A1, 13.05.2010.</b></p>
--	---

(54) Способ дистанционного формирования голографической записи

(57) Формула изобретения

1. Способ дистанционного формирования голографической записи, заключающийся в освещении 3D объекта, формировании по рассеянному им излучению и по опорному пучку интерференционной картины, представляющей собой голограмму, отличающийся тем, что объект голографирования поочередно освещают некогерентным светом и светом со сформированными заранее интерференционными полосами, чей период соответствует инфракрасному диапазону или более длинноволновому диапазону электромагнитного излучения, или ультрафиолетовому в зависимости от требований точности передачи топографии объекта, фотографируют объект без полос и со спроецированными на него полосами, создают по искривлению этих полос топографическую карту поверхности голографируемого объекта и затем передают эти два изображения (фотографию и топографическую карту) на расстояние по каналу связи, в том числе и по радиоканалу, с последующим на приемном конце линии связи соединением этих двух изображений в объемное 3D изображение объекта, которое далее используется в качестве объектного изображения при компьютерном вычислении голограммы, состоящей из полос интерференции между сформированным таким образом компьютерным объектным пучком с 3D изображением объекта и компьютерно синтезированным опорным пучком, а в дальнейшем, после записи полученной таким образом голограммы на материальный носитель, последняя при освещении опорным восстанавливающим пучком восстанавливает голографическое изображение.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что топографическую карту поверхности

объекта создают лазерным сканером и далее передают на расстояние по каналу связи с последующим соединением фотографии объекта и его топографической карты в объемную 3D картину, которая служит в качестве объектного изображения при компьютерном вычислении голограммы на приемном конце связи.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что проецируемые на объект полосы формируют излучением вне видимого диапазона длин волн, например инфракрасным, ультрафиолетовым или радиоизлучением.

4. Способ по п. 1, отличающийся тем, что проецируемые на объект полосы формируют короткими импульсами излучения, не различимыми глазом, тем самым остающимися невидимыми при фотографировании.

5. Способ по п. 1, отличающийся тем, что фотографирование объекта (без наложения полос) происходит в цвете в цветопередающем формате RGB, а после передачи этой фотографии по каналу связи на приемном конце создают необходимое для полноцветной передачи количество голограмм, в каждой из которых используют только один цвет исходной фотографии, что соответствует трем цветам и трем голограммам с одной и той же топографической картой, а каждую из созданных таким образом голограмм освещают лазером с соответствующей ей по цветам RGB длиной волны - красной, зеленой и голубой, создавая, таким образом, цветное, объемное (3D) изображение.

6. Способ по любому из пп. 1-5, отличающийся тем, что фотографирование и создание топографической карты объекта происходит регулярно, создается последовательность 3D изображений, также регулярно передаваемых на приемный конец линии связи, из которых, в свою очередь, создается последовательность голограмм, представляющих при воспроизведении ими 3D изображений голографическое кино или голографическое телевидение.

R U 2 7 0 7 5 8 2 C 1

R U 2 7 0 7 5 8 2 C 1

Приложение Б. Патент РФ № 2734093. Способ экспресс-анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала / Шойдин С. А., Мешалкин А. Ю., Оpubл. 12.10.2020



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 734 093**<sup>(13)</sup> **C1**(51) МПК  
G03H 1/00 (2006.01)  
G01M 11/00 (2006.01)ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**(52) СПК  
G03H 1/00 (2020.08); G01M 11/00 (2020.08)

(21)(22) Заявка: 2020113048, 07.04.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
07.04.2020

Дата регистрации:  
12.10.2020

Приоритет(ы):  
(22) Дата подачи заявки: 07.04.2020

(45) Опубликовано: 12.10.2020 Бюл. № 29

Адрес для переписки:  
630501, Новосибирская обл., р/п Краснообск,  
2-й микрорайон, ул. Западная, 226, кв.73,  
Шойдин Сергей Александрович

(72) Автор(ы):  
Шойдин Сергей Александрович (RU),  
Мешалкин Алексей Юрьевич (MD)

(73) Патентообладатель(и):  
Шойдин Сергей Александрович (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете о поиске: С. А. Бабин и др. "Методы и устройства тестирования голографических фотополимерных материалов", АВТОМЕТРИЯ, т. 39, No 2, 2003 г., стр. 57-70. Alexei Meshalkin и др. "Carbazole-based azopolymers as media for polarization holographic recording", ADVANCED PHYSICAL RESEARCH, т.1, No.2, 2019 г., стр. 86-98. US 7605911 B2, 20.10.2009. SU 1254428 A1, (см. прод.)

(54) Способ экспресс-анализа величины динамического диапазона фотоотклика фазового голографического материала

## (57) Формула изобретения

1. Способ экспресс-анализа величины динамического диапазона фазового фотоотклика голографического материала, заключающийся в определении максимальной величины фазовой модуляции материала ( $\Delta\varphi$ ), определяющей величину дифракционной эффективности ( $\eta$ ) в области записи голограммы на голографической среде согласно (1) и (2) для первого и нулевого порядков дифракции объемных Брэгговских голограмм и (3) для  $m$ - порядков дифракции плоских голограмм Рамана-Ната соответственно:

$$\eta_1 = \sin^2 \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \quad (1)$$

$$\eta_0 = \cos^2 \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \quad (2)$$

$$\eta_m = J_m^2 \left( \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \quad (3)$$

отличающийся тем, что фазовая модуляция, возникающая при регистрации интерференционной картины объектного и опорного пучков, называемая далее фазовый

RU 2 7 3 4 0 9 3 C 1

RU 2 7 3 4 0 9 3 C 1

фотоотклик среды ( $\Delta\varphi$ ), формируется при записи голограммы пучками с гауссовым распределением интенсивности и изменяет значения локальной по полю голограммы дифракционной эффективности, проходя значения, соответствующие ( $N$ ) корням уравнений (1), (2) или (3) (при  $\eta_l=0$ ,  $\eta_0=0$  и  $\eta_m=0$  соответственно), причём этот фазовый фотоотклик на записанном участке голографической среды определяется по количеству колец ( $N$ ) в одном из ( $m$ ) порядков дифракции, соответствующих локальным минимумам дифракционной эффективности и корням  $\Delta\varphi_N$  уравнений (1,2,3), которые равны:

для первого порядка дифракции ( $\eta_l$ ) объемной Брэгговской решетки

$$\Delta\varphi_N = 2\pi N \quad (4)$$

для нулевого порядка дифракции ( $\eta_0$ ) объемной Брэгговской решетки

$$\Delta\varphi_N = 2\pi N - \pi \quad (5)$$

для первого порядка дифракции ( $\eta_{(m=1)}$ ) плоской решетки Рамана-Ната

$$\Delta\varphi_N = 2\pi N + \pi/2 \quad (6)$$

для нулевого порядка дифракции ( $\eta_{(m=0)}$ ) плоской решетки Рамана-Ната

$$\Delta\varphi_N = 2\pi N - \pi/2 \quad (7),$$

а далее по найденной величине фазового фотоотклика  $\Delta\varphi_N$  определяется величина динамического диапазона фотоиндуцированного изменения показателя преломления  $\Delta n$  для объемных фазовых голограмм из (8):

$$\frac{2\pi\Delta n T}{\lambda \cos(\theta)} = \Delta\varphi_N \quad (8),$$

где  $T$  – толщина голографического материала,  $\lambda$  – длина волны света, восстанавливающего голограмму,  $\theta$  – угол падения считывающего пучка;

а также определяется величина динамического диапазона фотоиндуцированного изменения глубины поверхностного рельефа  $\Delta h$  рельефно-фазовых голограмм из (9) в случае пропускания излучения сквозь решетку либо (10) в случае отражения от решётки:

$$\frac{2\pi}{\lambda \cos(\theta)} (n-1)\Delta h = \Delta\varphi \quad (9),$$

$$\frac{4\pi}{\lambda \cos(\theta)} \Delta h = \Delta\varphi \quad (10),$$

где  $n$  – показатель преломления голографического материала,  $\lambda$  – длина волны света, восстанавливающего голограмму,  $\theta$  – угол падения считывающего пучка.

2. Способ по п. 1, отличающийся тем, что запись голограмм идёт актиничным излучением, поглощаемым в голографическом материале при записи голограмм, а для восстановления дифракционной картины используется лазер, работающий на длине волны в области прозрачности голографического материала.

3. Способ по п. 1, отличающийся тем, что динамический диапазон фотоотклика голографического материала определяется по суммарному количеству колец  $N_s$  во всех наблюдаемых положительных, включая нулевой, либо во всех наблюдаемых отрицательных, включая нулевой, порядках дифракции и определяет величину динамического диапазона фотоотклика фазовой модуляции для объемных и плоских

голограмм согласно формулам (11) и (12) соответственно:

$$\Delta\varphi_{N_s} = \pi N_s \quad (11),$$

$$\Delta\varphi_{N_s} = 5.7\sqrt{N_s} \quad (12).$$

(56) (продолжение):  
30.08.1986.

R U 2 7 3 4 0 9 3 C 1

R U 2 7 3 4 0 9 3 C 1

**Приложение В. АКТ О практическом применении полученных результатов  
диссертационного исследования в Ministry of Education and Research of  
Republic of Moldova, Institute of Applied Physics № 11-310 от 30.12.2022**

MINISTERUL EDUCAȚIEI ȘI CERCETĂRII  
AL REPUBLICII MOLDOVA



MINISTRY OF EDUCATION AND RESEARCH  
OF REPUBLIC OF MOLDOVA

INSTITUTUL DE FIZICĂ APLICATĂ

INSTITUTE OF APPLIED PHYSICS



В диссертационный совет Д 003.005.02  
630090, г. Новосибирск, проспект Академика Коптюга, д. 1

**АКТ**

О практическом применении полученных результатов  
диссертационного исследования Шойдина С. А. на тему  
«Голографические методы преобразования оптической информации в  
задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений»

Настоящим актом удостоверяется, что в Институте прикладной физики (Министерства Образования и Исследований Республики Молдова, Кишинев) тщательно изучены теоретические разработки и практические рекомендации диссертационного исследования Шойдина С. А., по специальности 1.3.6 (01.04.05) Оптика на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, в том числе работы третьей главы по формфактору голограмм. Следует отметить как новизну полученных Шойдиным С. А. результатов, так и их актуальность. Эти работы позволили:

1. Объяснить полученные в ИПФ результаты кинетики дифракционной эффективности при записи голограмм на разрабатываемых голографических материалах, в т. ч. халькогенидных стеклообразных полупроводниках и азополимерах.
2. Послужили основой для проведения научно – исследовательских работ, что отражено в ряде совместных публикаций в журналах Web of Science Q2 и Q3.
3. Разработать технологию дифракционного метода измерения фазовой модуляции голограмм в процессе их записи.
4. Защитить патентом технологию дифракционного метода измерения фазовой модуляции голограмм в процессе их записи (RU2734093C1).

По нашему мнению, полученные результаты, несомненно, являются новым качественным скачком в научном понимании основ физического процесса и методов измерения кинетики голографических материалов.

Результаты диссертационного исследования Шойдина С. А. уже используются и будут использоваться в дальнейшем в исследовательских работах ИПФ Молдовы по разработке новых голографических материалов, голограмм на их основе и по их промышленному применению.

Заместитель директора по научной работе  
Института прикладной физики  
Мешалкин Алексей Юрьевич  
Тел: +(373)79911510  
Email: [alexei.meshalkin@ifa.md](mailto:alexei.meshalkin@ifa.md)  
[www.ifa.md](http://www.ifa.md)



# Приложение Г. АКТ О практическом применении полученных результатов диссертационного исследования в Акционерном обществе «Новосибирский приборостроительный завод»



**НПЗ**

Акционерное общество  
«Новосибирский приборостроительный завод»  
(АО «НПЗ»)



УТВЕРЖДАЮ

Технический директор АО «НПЗ»

Ю.А. Трясов

» 03 2023г.

## АКТ

О практическом применении полученных результатов диссертационного исследования Шойдина С. А. на тему «Голографические методы преобразования оптической информации в задачах удалённого воспроизведения динамических объёмных изображений»

Настоящим актом подтверждаем, что на АО "Новосибирский приборостроительный завод" (630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 179/2) были внимательно изучены теоретические разработки и практические рекомендации диссертационного исследования Шойдина С. А. по специальности 1.3.6 (01.04.05) Оптика на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, в том числе работы второй и четвёртой глав по синтезу голограмм.

Нами отмечается актуальность и новизна полученных Шойдиным С. А. результатов, которые выражаются:

1. В разработке нового способа формирования цифровой голографической записи, в том числе и удалённого объекта голографирования на основе анализа спектрального состава пространственной структуры голограммы.
2. В обосновании выделения группы несущих пространственных частот и их девиации, как имеющих разную физическую природу, что позволило существенно сократить объём необходимой для синтеза голограммы информации. Результат защищён патентом RU2707582C1.
3. В выделении принципиально не устранимых причин шумов алиасинга при записи цифровых голограмм и определения путей их уменьшения при формировании и обработке оптических 3D изображений.
4. В разработке способа существенного упрощения расчёта голограмм 3D сфокусированных изображений методом использования паттернов структурированного света.

Перечисленные результаты позволили глубже подойти к пониманию технологических процессов записи цифровых голограмм и методов упрощения их цифрового синтеза. Это принципиально важно для формирования структуры и элементной базы оборудования, необходимого для синтеза голограмм. Предложенный, более технологичный, подход для записи цифровых голограмм и голографических дифракционных структур ранее не использовался как в традиционных разработках НПЗ, так и в известных технологиях других предприятий. Понимание структуры необходимого оборудования и других материальных средств, оптических систем и инструментов, необходимых для синтеза таких голограмм, а также их методика расчёта, будут использованы в дальнейших новых, перспективных разработках НПЗ.

Начальник отдела главного оптика АО «НПЗ»

Н. А. Гурин

## Приложение Д. Изображения не из «Зловещей долины»

Качество восстановленного голограммой 3D изображения существенно ближе всех известных ранее способов представления изображения человека. Динамическое виртуальное голографическое изображение ещё ближе к реальности.

И тут существует опасность – так называемая «Зловещая долина» [Mori M. *The Uncanny Valley [From the Field]* / M. Mori, K. F. MacDorman, N. Kageki // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. – 2012. – Vol. 19. – № 2. – С. 98–100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>], когда степень похожести изображения робота, или 3D модели, приближаясь к изображению живого оригинала ещё не доходит до стопроцентного совпадения, но уже достаточно близко. Количественно это «близко» измерить трудно, но не дойдя до этой границы 3D модель эмоционально вдруг начинает восприниматься человеком как опасность, как существо иного, непонятного и даже загробного мира (рисунок Д.1).

Существует целый ряд исследований такой эмоциональной реакции людей на внешний вид роботов. Поначалу результаты были предсказуемыми: чем больше робот похож на человека, тем симпатичнее он кажется – но лишь до определённого предела. Наиболее человекоподобные роботы неожиданно оказались неприятны людям из-за мелких несоответствий реальности, вызывающих чувство дискомфорта и страха (рисунок Д.1).

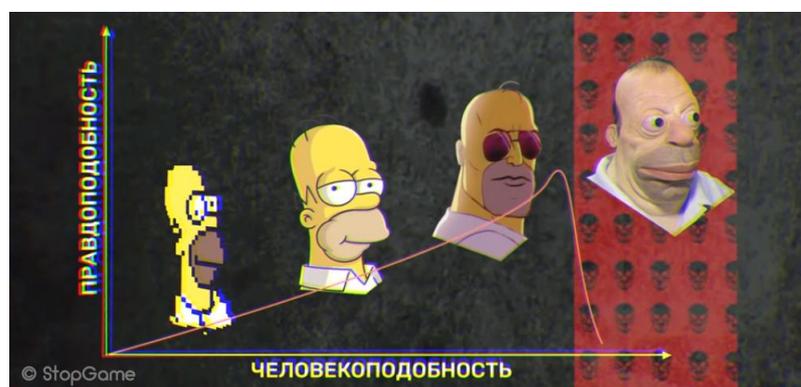


Рисунок Д.1 – Увеличение степени человекоподобности приводит на определённом уровне к провалу правдоподобности

Неожиданный спад на графике «симпатии» (рисунок Д.2) и был назван «зловещей долиной», притом было обнаружено, что анимация усиливает и позитивное, и негативное восприятие, проявляющееся вблизи «Зловещей долины». Отрицательные эмоции нам сначала подсказывают, что таких деталей у живого объекта быть не может, это что-то неживое, затем, при приближении к изображению живого человека отрицательные эмоции зашкаливают.

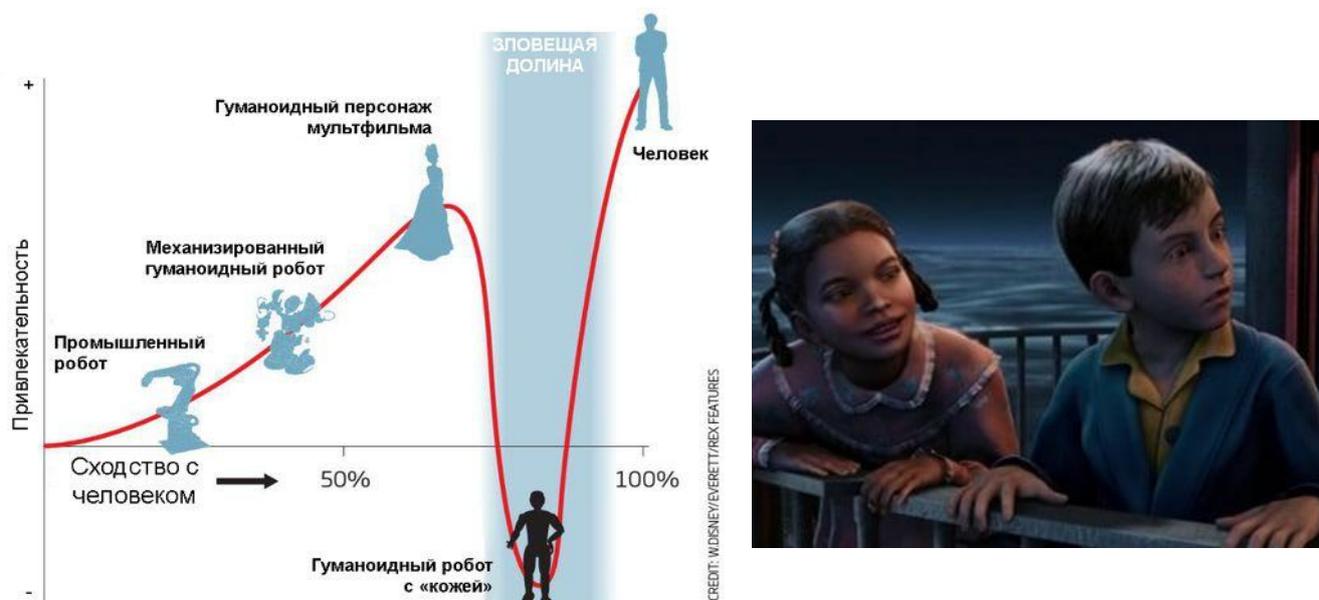


Рисунок Д.2 – Эмоциональная оценка человека с увеличением степени человекоподобности изображения или наблюдаемого объекта имеет резкий спад вблизи полного сходства

И лишь потом, при дальнейшем увеличении степени похожести эмоции довольно резко поднимаются, выходя на уровень полноценного доброжелательного восприятия.

Конечно, в своём исследовании мы не могли не затронуть этой проблемы, хотя на протяжении всей нашей работы в последние 10 лет ни разу не было обнаружено ничего подобного касательно полученных нами 3D изображений. Вероятно, это связано с взятой с самого начала высокой планкой разрешающей способности изображений, сравнимой или даже превышающей стандарты сегодняшнего телевидения высокой чёткости, как, например, Full HD и 4K UHD. Конечно, получаемая текстура реальных, обрабатываемых в настоящей работе 3D изображений нам уже давно известна по современным фото и видеоматериалам.

На рисунке Д.3 показана сборка изображений цветного кадра, переданного в серии кадров как короткое ТВ. Видно и изображение живого человека, видно и вертикальный, и горизонтальный параллакс.



Рисунок Д.3 – Раскадровка переданного по радиоканалу видео изображения

Также явно отсутствует эффект «зловещей долины». Нет чувства дискомфорта и страха при восприятии этих изображений ни в статике, ни в динамике. Это означает, что отличие переданного и восстановленного виртуального 3D изображения находится существенно правее так называемой «зловещей долины».

Также следует отметить, что получаемые в настоящей работе карты глубин объекта голографирования и текстура его поверхности тоже не воспринимаются как изображения враждебных человекоподобных существ.

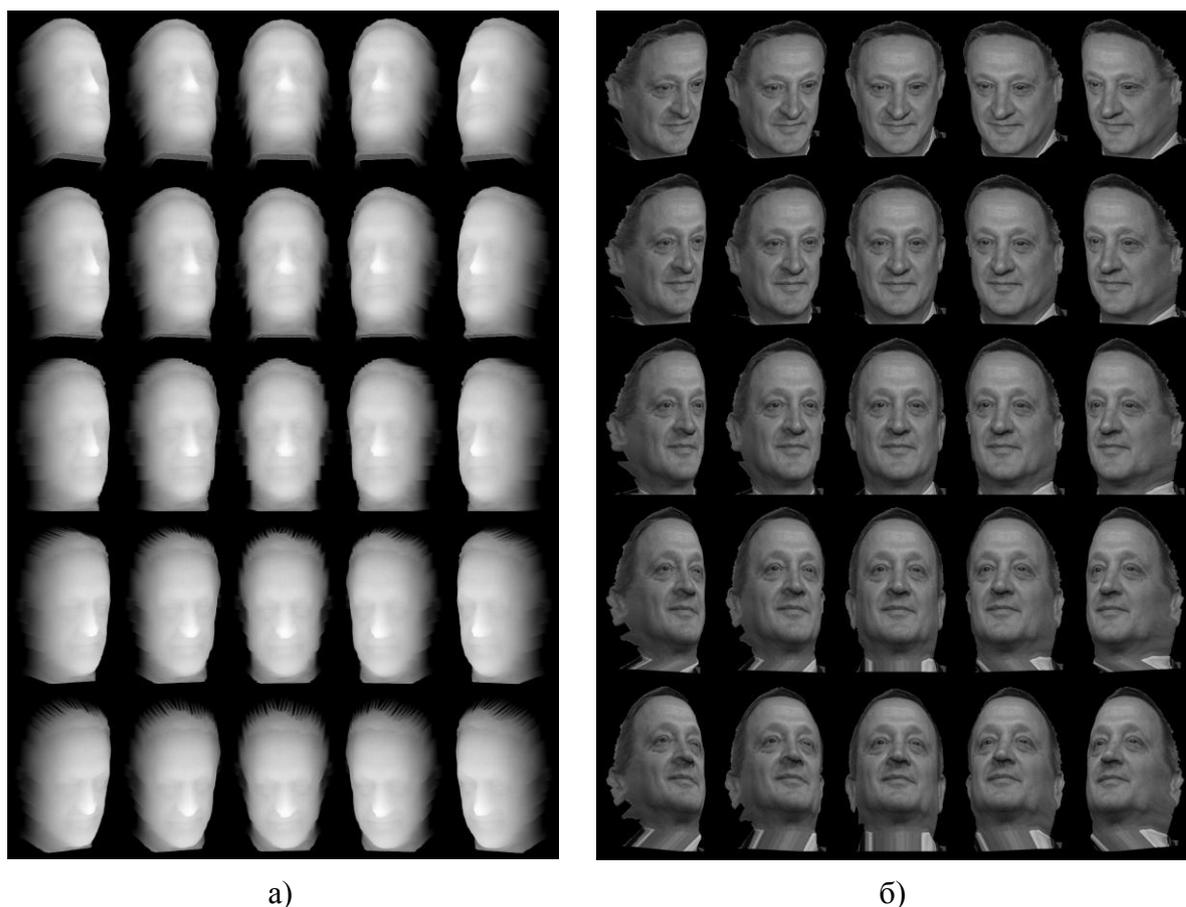


Рисунок Д.4 – Раскадровка переданного по радиоканалу видео изображения: а) карты глубин (рисунок 2.7); б) текстуры (рисунок 2.3)

Причём сборка на рисунке Д.4а, на которой показан параллакс одной лишь карты глубин 3D объекта (маски) действительно воспринимается как маска, похожая на посмертную маску, которую мы знаем, например, по известной маске А. С. Пушкина, и поэтому несколько настораживает, хотя и не вызывает значительных отрицательных эмоций. Это можно объяснить тем же эффектом «зловещей долины», поскольку изображение уже близко к реальному, но, всё же отличается, напоминая гладкие поверхности полигональной технологии (рисунок 1.11б). А вот сборка изображений текстуры на рисунке Д.4б, претерпевших аффинные преобразования, соответствующие изопроекциям предыдущих двухборок изображений, совершенно не вызывает отрицательных эмоций. Сравнивая приведённые выше изображения с изображениями на рисунке 1.11, можно увидеть, что полигональное представление 3D, несмотря на то, что оно создаёт существенно большую вычислительную нагрузку, чем 3D

изображения по патенту РФ № 2707582, значительно уступает последним, имеющим меньший объём передаваемой по каналу связи информации. Взяв за основу график, разработанный [Mori M. *The Uncanny Valley [From the Field]* / M. Mori, K. F. MacDorman, N. Kageki // *IEEE Robotics & Automation Magazine*. – 2012. – Vol. 19. – № 2. – С. 98–100. <https://doi.org/10.1109/MRA.2012.2192811>], мы можем добавить своё место на этом графике.

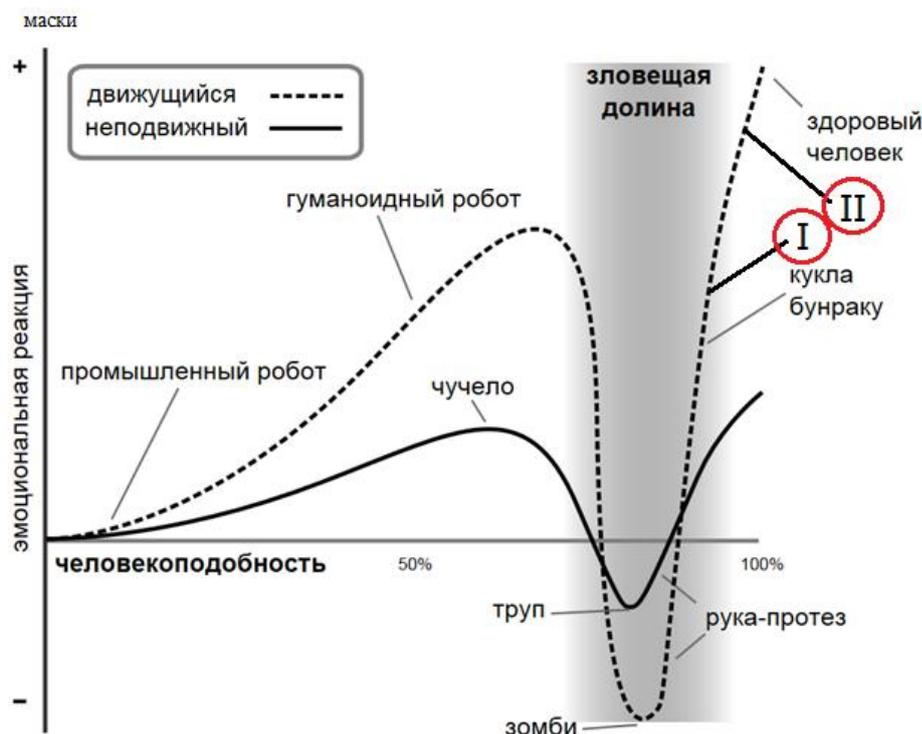


Рисунок Д.5 – Эмоциональная реакция человека с увеличением степени человекоподобности изображения наблюдаемого объекта имеет резкий спад вблизи полного сходства.

Точки I и II соответствуют диапазону восприятия изображений из рисунка Д.4б

Приведённые на графике отметки I и II соответствуют эмоциональной оценке изображения раскадровки карты глубин (рисунок Д.4б). Интересно, что и цветные (рисунок Д.3) и чёрно-белые кадры (рисунок Д.4б) у опрошенных вызвали примерно одинаковое чувство восприятия. Метки I и II на графике эмоционального восприятия полного 3D цветного изображения (рисунок Д.3), представляют диапазон представлений группы из 64 опрошенных студентов СГУГиТ разных курсов. Метка I соответствует самому низкому эмоциональному восприятию (рисунок Д.4б), а метка II – наиболее высокому как на рисунке Д.4б,

так и на рисунке Д.3. Диапазон разброса оценочных меток I и II на графике (рисунок Д.5) не превышал 5,7 %.

По результатам опроса можно сделать вывод, что представленные изображения изопрооекций 3D портрета человека, воспринимаются как изображение реального, живого объекта, эмоционально более близкого к живому человеку, чем к человекоподобной кукле бунраку, которая сама уже оценивается без чувства страха и стоит на графике в области положительных эмоций.

По-видимому, такой хороший результат оценки представленных изображений связан с высокой разрешающей способностью используемого стандарта фотоизображения текстуры передающего даже маленькие морщинки на лице человека, приближая его восприятие к реальному. В совокупности с изображением 3D маски это позволяет создавать вполне адекватный TV контент, более приближенный к 3D дополненной реальности, чем 3D контент с полигональной графикой, уже не говоря о воксельной.

Это ещё раз, теперь с учётом психологии человеческого восприятия, подтверждает жизнеспособность применяемого в настоящей работе метода представления 3D динамического потока голографического изображения в виде двух потоков 2D динамического, согласованного между собой контента, в котором каждый 3D голографический кадр цифровым образом синтезируется по двум соответствующим 2D кадрам, один из которых представляет карту поверхности объекта (сюжета), а другой – текстуру его поверхности.