

На правах рукописи

Черёмхин Павел Аркадьевич

Влияние характеристик регистрирующих фотосенсоров
на качество восстановления изображений
цифровыми голограммами Френеля

01.04.21 - лазерная физика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Автор



Москва 2013

Работа выполнена в Национальном исследовательском ядерном университете
«МИФИ»

Научный руководитель:

Евтихий Николай Николаевич, доктор физико-математических наук,
профессор

Официальные оппоненты:

Компанец Игорь Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор,
Физический институт РАН, зав. отделом оптоэлектроники;

Штанько Александр Евгеньевич, кандидат технических наук, старший научный
сотрудник, МГТУ «Станкин», доцент кафедры физики

Ведущая организация:

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт оптико-
физических измерений» (ВНИИОФИ)

Защита состоится 22 мая 2013 г. в 15:00 в аудитории К-608 на заседании дис-
сертационного совета Д 212.130.05 при Национальном исследовательском
ядерном университете «МИФИ» по адресу: 115409, Москва, Каширское шоссе,
д.31.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Национального исследова-
тельского ядерного университета «МИФИ»

Автореферат разослан 17 апреля 2013 г.

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



Стариков Р.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

При регистрации на цифровой матричный фотоприёмник интерференционных картин от объектного и опорного пучков (т.е. цифровых голограмм) невозможно избежать потерь информации об объекте по нескольким причинам. Главными информационными ограничениями являются разрешение и число отсчётов фотоприёмников. Данные ограничения в ближайшем будущем не смогут коренным образом измениться, несмотря на совершенствование цифровых матричных фотоприёмников.

Другое ограничение – недостаточная точность методов численного восстановления изображений с цифровых голограмм. В литературе описано значительное количество методов численного восстановления изображений с цифровых голограмм: прямой расчёт дифракции Френеля, распространение углового спектра, приближение метода распространения углового спектра для зоны дифракции Френеля и др. Однако при этом присутствуют лишь оценки границ применимости различных методов, а сравнение качества восстановления практически отсутствует. Важна также и вычислительная ресурсоёмкость алгоритмов, что особенно критично при использовании голографического видео.

Следующее ограничение – необходимость пространственного отделения «+1» (информативного) дифракционного порядка, содержащего восстановленное изображение объекта, от «0» и «-1» (неинформативных) при численном восстановлении изображений с цифровых голограмм. Это приводит к дополнительному уменьшению числа элементов разрешения в регистрируемом изображении объекта. Чтобы избежать дополнительного уменьшения числа элементов разрешения, используют осевую схему записи цифровых голограмм с применением метода фазовых шагов. Использование таких элементов, как фазовые пластинки, позволяет снять четыре интерференционные картины с разными фазовыми набегами и отделить программными средствами «+1» порядок дифракции от «0» и «-1». Главным недостатком данной схемы является необходимость устойчивого положения экспериментальной установки при записи цифровых голограмм. Данная проблема решалась главным образом путём добавления различных элементов, таких как матричные фазовые пластинки, что приводит к усложнению экспериментальной схемы, а также к ухудшению качества восстановленных изображений. Другой вариант решения проблемы пространственного разделения порядков дифракции – использование методов численного подавления неинформативных дифракционных порядков при восстановлении полей с голограмм. В литературе описано множество методов фильтрации нежелательных порядков дифракции: фильтрация в частотной плоскости выбором области обнуления пространственных частот, обнулением частот по порогу; фильт-

рация в пространственной плоскости вычитанием из голограммы её среднего значения, значений, полученных медианной фильтрацией голограммы и др. Однако литература, касающаяся сравнения качества восстановления по результатам применения методов фильтрации, также практически отсутствует.

Ещё одним ограничением, являющимся общим для классической и цифровой голографии, является наличие спеклов на восстановленных изображениях, вследствие использования когерентного излучения. Данная проблема широко исследуется, и для её решения предлагаются либо оптические методы (съёмка нескольких голограмм объекта при различных условиях), либо методы цифровой фильтрации одиночной голограммы.

Следующим важным фактором, определяющим качество восстановленных изображений, является наличие шумов и ограниченность динамического диапазона фотосенсоров регистрирующих камер. В классической, или аналоговой, голографии влияние характеристик регистрирующих сред на качество восстановления широко исследовалось и подробно описано. В цифровой голографии в качестве «регистрирующей среды» выступает матричный фоторегистратор камеры. Однако в литературе присутствует только анализ влияния разрядности АЦП на восстановление изображений объектов, а также световых временных шумов камер на качество восстановления для случая фазовых объектов. Оценки влияния темнового и светового пространственного шума, ограниченности линейного динамического диапазона камер на качество восстановления изображений с цифровых голограмм в литературе отсутствуют. Также отсутствуют оценки совокупного влияния шумовых и радиометрических характеристик конкретных цифровых камер на качество восстановления. Помимо этого, не рассмотрены методы улучшения качества восстановления изображений за счёт уменьшения влияния временных и пространственных шумов камер.

Таким образом, количественный анализ влияния характеристик фотосенсоров камер на качество восстановления изображений с цифровых голограмм и разработка методов повышения качества представляются весьма актуальными и практически важными.

Цель работы и основные задачи исследования

Целью работы являлось получение расчётных и экспериментальных оценок влияния характеристик фотосенсоров регистрирующих камер на качество восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля.

Для достижения данной цели были поставлены следующие задачи:

1. Получение расчётных оценок предельных параметров объектов при регистрации их цифровыми голограммами Френеля, в зависимости от количества и размера пикселей фотосенсоров камер. Сравнение существующих численных методов восстановления изображений и методов улучшения качества восстановленных изображений.

2. Создание экспериментальной установки и запись цифровых голограмм Френеля. Экспериментальная проверка полученных расчётных оценок предельных параметров регистрируемых объектов, результатов сравнения методов численного восстановления и улучшения качества восстановления изображений с цифровых голограмм.

3. Измерение радиометрических характеристик, временных и пространственных шумов фото- и видеокамер различного типа для оценки их влияния на качество восстановления изображений с цифровых голограмм. Построение численной модели цифровой голограммы с учётом реальных характеристик фотосенсоров.

4. Анализ влияния шумовых и радиометрических характеристик камер на отношение сигнал/шум в цифровых голограммах и восстановленных изображениях, получение расчётных зависимостей и экспериментальных оценок. Исследование возможностей увеличения отношения сигнал/шум при использовании одиночной и многократной экспозиций.

Научная новизна

1. Впервые систематизированы, дополнены и подтверждены как численным моделированием, так и экспериментально расчётные оценки, характеризующие качество изображений, восстановленных с цифровых голограмм Френеля, в зависимости от количества и размеров элементов фотосенсора.

2. Предложены и экспериментально подтверждены методики, позволяющие одновременно измерять временные шумы для всех уровней сигнала фотосенсора, снижать требования к однородности освещения при измерении пространственных шумов.

3. Предложена и экспериментально апробирована модификация методики нахождения портрета световых пространственных шумов фотосенсора, использующая итерационный способ создания освещения, адаптивного к конструкции анализируемой камеры, и улучшенный метод удаления темновых шумов.

4. Впервые получены аналитические выражения для зависимостей отношений сигнал/шум в цифровых голограммах Френеля и восстановленных с них изображениях диффузных объектов от шумов и радиометрических характеристик регистрирующих фотосенсоров.

5. Предложены и экспериментально обоснованы два метода увеличения отношения сигнал/шум в регистрируемых световых распределениях и в восстановленных с цифровых голограмм изображениях, основанные на:

- пространственном усреднении по соседним пикселям фотосенсора,
- компенсации пространственных шумов с помощью их портретов.

Научная и практическая значимость

1. Применённые в работе подходы и полученные результаты могут быть использованы:
 - для оценки качества восстановления изображений с цифровых голограмм, достижи-

мого при использовании конкретной камеры;

- для обоснованного выбора типа цифровой камеры при решении научных и прикладных задач с использованием цифровой голографии;
- для анализа типов цифровых голограмм, отличных от голограмм Френеля, таких как Фурье, сфокусированных изображений и других;
- в качестве основы для оценки сигнал/шум в случае регистрации на цифровые голограммы объектов, отличных от диффузных.

2. Разработанные методы увеличения отношения сигнал/шум могут быть использованы не только для повышения качества восстановленных с цифровых голограмм изображений, но и при регистрации произвольных пространственных световых распределений, в том числе сфокусированных изображений.

3. Разработанные и экспериментально апробированные методики измерения временных и пространственных шумов фото- и видеокамер позволяют оперативно и на доступном оборудовании измерять характеристики камер различного назначения: от веб- и бытовых камер до научных измерительных камер для оценки возможностей их применения в научных и прикладных задачах, включая использование в оптико-цифровых системах отображения и обработки информации.

4. Методика измерения портрета световых пространственных шумов фото- и видеокамер может быть использована в различных прикладных задачах, включая охрану авторских прав, для идентификации источников снимков (цифровых камер) и анализа достоверности изображений.

Методы исследования

Поставленные в работе задачи решались численным моделированием и экспериментальным исследованием, а также их комплексным сочетанием. Аналитические задачи решались главным образом в рамках скалярной теории дифракции в приближении Френеля. Экспериментальное исследование включает в себя создание установок по измерению шумовых и радиометрических характеристик фото- и видеокамер, записи цифровых голограмм и оптическому восстановлению изображений с них, проведение исследований и сравнение полученных результатов с результатами численного моделирования.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Совокупность экспериментально подтверждённых расчётных оценок предельных значений размеров и пространственного разрешения объектов, регистрируемых цифровой голограммой Френеля, в зависимости от количества и размеров элементов фотосенсора.

2. Разработанная и экспериментально проверенная на камерах четырёх различных типов методика измерения временных шумов фотосенсоров. Методика позволяет по результа-

там съёмки одной сцены измерять временные шумы для всех уровней сигнала фотосенсора при использовании только 2 кадров сцены.

3. Разработка методики получения портрета световых пространственных шумов фотосенсора камеры. Экспериментально показана возможность её использования для идентификации камеры как источника снимков и получено минимальное отношение коэффициентов корреляции свой снимок / чужой снимок 60.

4. Для цифровых голограмм Френеля получены и подтверждены аналитические зависимости среднего отношения сигнал/шум в восстановленных изображениях диффузных объектов от размеров объектов и характеристик фотосенсора. Показано, что сигнал/шум не зависит от распределения интенсивности по объекту, а только от площади объекта.

5. Разработка и экспериментальное обоснование метода увеличения отношения сигнал/шум в восстановленных с цифровых голограмм изображениях за счёт компенсации пространственных шумов с помощью их портретов. Метод обеспечивает увеличение отношения сигнал/шум до 10 раз при компенсации измеренными портретами.

Личный вклад

Все результаты получены лично автором работы или в соавторстве при его непосредственном участии.

Апробация работы

Основные результаты диссертационного исследования были представлены на международных конференциях IS&T/SPIE Electronic Imaging (Берлингейм, США, 2012), SPIE Photonics Europe (Брюссель, Бельгия, 2012), Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and Microelectronics (Москва-Самара, 2011); 7, 8, 9 Международных конференциях «ГОЛОЭКСПО» (Москва, 2010; Минск, 2011; Суздаль, 2012); VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011» (Санкт-Петербург, 2011); Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2012» (Санкт–Петербург, 2012); I и II Всероссийских конференциях по фотонике и информационной оптике (Москва, 2012, 2013); XLVI Всероссийской научной конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии (Москва, 2010); XIII, XIV, XV и XVI конференциях «Молодежь и наука» (Москва, 2010–2013); Научных сессиях НИЯУ МИФИ-2010, 2011 (Москва, 2010, 2011); XLVII и XLVIII Всероссийских конференциях по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники (Москва, 2011, 2012); IX и X Всероссийских молодежных Самарских конкурсах-конференциях научных работ по оптике и лазерной физике (Самара, 2011, 2012); 2-й Школе-семинаре «Фотоника нано- и микроструктур» (Владивосток, 2013).

Публикации по теме работы

По теме работы опубликовано 26 печатных работ, среди них 4 статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК, 10 - в трудах международных конференций, 12 - в трудах всероссийских конференций.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Общий объём диссертации составляет 126 страниц, включая 54 рисунка, 8 таблиц и список литературы из 82 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность работы, формулируется цель и основные задачи. Излагается научная новизна, основные положения, выносимые на защиту. Отмечена теоретическая и практическая ценность и некоторые другие основные результаты.

Первая глава посвящена систематизации и дополнению оценок параметров регистрируемых объектов, а также сравнению методов улучшения качества цифровых голограмм и численного восстановления изображений объектов. В § 1.1 систематизированы и дополнены оценки параметров регистрируемых объектов при записи цифровых голограмм. В качестве оцениваемых параметров были выбраны максимальный поперечный размер голографируемого объекта L и размер элемента разрешения объекта Δx , которые определяют число отсчётов на объекте $M = L/\Delta x$ в поперечном направлении. Исходными параметрами являлись размер элемента разрешения голограммы Δh (размер пикселя фоторегистратора), число отсчётов голограммы $N \times N$, расстояние от голограммы до ближайшей точки объекта z , длина волны излучения λ . Для схемы записи с наклонным пучком получены оценки для случаев допущения (выражение (1)) и недопущения циклического сдвига порядков дифракции (выражение (2)) на численно восстановленном поле:

$$L \leq \frac{\lambda \cdot z}{2 \cdot \Delta h} - \frac{3}{2} N \cdot \Delta h, \quad M \leq \frac{N}{2} \left(1 - 3 \frac{N(\Delta h)^2}{\lambda \cdot z} \right), \quad \Delta x = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}; \quad (1)$$

$$L \leq \frac{\lambda \cdot z}{2 \cdot \Delta h} - N \cdot \Delta h, \quad M \leq \frac{N}{2} \left(1 - 2 \frac{N(\Delta h)^2}{\lambda \cdot z} \right), \quad \Delta x = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}. \quad (2)$$

При записи цифровых голограмм Френеля в случае использовании схемы с осевыми пучками и реализацией метода фазовых шагов ограничения на предельные значения параметров голографируемой объёмной сцены имеют следующий вид:

$$L \leq \frac{\lambda \cdot z}{\Delta h} - N \cdot \Delta h, \quad M \leq N \left(1 - \frac{N(\Delta h)^2}{\lambda \cdot z} \right), \quad \Delta x = \frac{\lambda \cdot z}{N \cdot \Delta h}. \quad (3)$$

С использованием теории зон Френеля получены оценки размера отсчёта и числа от-

счётов регистрируемых объектов в продольном направлении.

В § 1.2 приведены результаты сравнения методов численного восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля. При численном моделировании использовались диффузные объекты, отличающиеся по линейным размерам до 4 раз, расстояние между объектом и голограммой варьировалось в 100 раз, число отсчётов голограммы – $512 \times 512 \div 2048 \times 2048$. Получено, что наилучшим по критерию наименьшего нормированного среднеквадратического отклонения восстановленного изображения объекта от оригинала (НСКО) является метод прямого расчёта дифракции Френеля (ПР).

В § 1.3 проведено сравнение методов улучшения качества восстановленных изображений путём подавления нежелательных дифракционных порядков: фильтрация в пространственной плоскости вычитанием из голограммы её среднего значения (СЗ), средних значений по группам элементов голограммы, значений, полученных медианной фильтрацией голограммы (МФ); фильтрация в частотной плоскости выбором области обнуления частот (ВО), обнулением частот по порогу (ОЧП), вычислением лапласиана, использованием оконного фильтра (ОФ₁, ОФ₂); нелинейная фильтрация по квадрантам в частотной плоскости. Методы ВО, МФ, ОЧП, ОФ₁ и СЗ показали наилучшие результаты в серии численных экспериментов.

Экспериментальная проверка полученных расчётных оценок и результатов сравнения методов численного восстановления и улучшения качества восстановления изображений с цифровых голограмм описывается в следующей главе.

В главе 2 приведены результаты по записи цифровых голограмм и восстановлению изображений объектов с них численно и оптически, а также экспериментальная проверка полученных в главе 1 оценок и результатов сравнения методов. В § 2.1 описана экспериментальная установка для записи цифровых голограмм Френеля «плоских» объектов и объёмных сцен и её тестирование. Основные характеристики установки: а) источник излучения - неодимовый лазер с длиной волны 532 нм, длиной когерентности 50 м, мощностью 50 мВт, б) число отсчётов в голограммах до 2048×2048 , элемент разрешения голограммы – $3,5 \div 11,4$ мкм в зависимости от используемой камеры, в) расстояние от объекта до голограммы - $200 \div 1400$ мм. Выполнена запись цифровых голограмм, проведено численное восстановление изображений различными методами. Как и при численном моделировании, метод ПР показал наилучшие результаты, поэтому он использовался при дальнейших экспериментах.

В § 2.2 проведена экспериментальная проверка оценок предельных параметров регистрируемых на голограммы объектов. Полученные результаты свидетельствуют о правильности зависимостей для ограничений поперечных размеров регистрируемых объектов, как в случае допущения, так и недопущения циклического сдвига части «-1» порядка дифракции. Также получено согласие величин поперечного и продольного пространственного разре-

ния в восстановленных изображениях с расчётными. Так, на восстановленном изображении миры разрешаются поперечные элементы с размером $0,12 \pm 0,02$ мм (расчётная величина - $0,12$ мм), а размер отчёта в продольном направлении составляет $12 \pm 0,5$ мм (расчёт - 12 мм).

В § 2.3 продемонстрированы записанные цифровых голограмм объёмных сцен в режимах освещения объекта «на просвет» и «на отражение». Проведено сравнение методов фильтрация от нежелательных порядков дифракции. Лучшие результаты продемонстрировали методы, использующие обнуление области пространственных частот и оконный фильтр.

В § 2.4 описаны эксперименты по записи цифровых голограмм в монохроматическом пространственно-некогерентном излучении. Период интерференционных полос составлял 10 пикселей. Проведены эксперименты по записи голограмм и численному восстановлению.

В § 2.5 описаны результаты по оптическому восстановлению изображений с цифровых голограмм и динамическому отображению объёмных сцен с помощью цифровой голографии. На рисунке 1 приведены результаты численного (а), оптического восстановления изображения с голограммы путём печати на плёнке (б) и с использованием фазового ЖК пространственно-временного модулятора света (ПВМС) (в). Оптически восстановленные изображения имеют более высокий уровень шума. Это связано главным образом с бинаризацией голограмм (б) и отсутствие обработки голограмм перед выводом на ПВМС (в). Для улучшения качества оптического восстановления изображений объектов с помощью фазового ПВМС предложено использовать преобразование цифровой голограммы в киноформ.

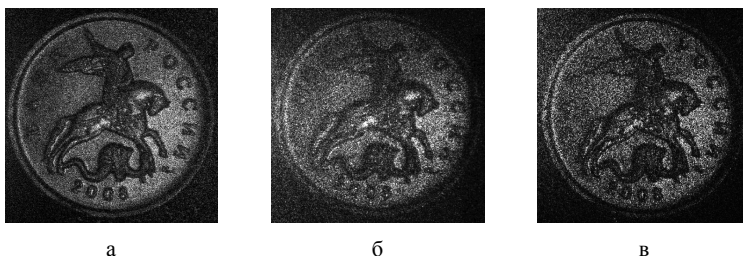


Рисунок 1 – Численно (а) и оптически восстановленные изображения с записанной цифровой голограммы Френеля путём печати на плёнке (б) и при помощи ПВМС (в)

Проведены эксперименты по динамическому отображению объёмных сцен с помощью видеопоследовательностей цифровых голограмм численно и оптически. Голограммы регистрировались при освещении лазерным излучением с длиной волны 532 нм, а восстанавливались излучением лазера с длиной волны 633 нм. Частота смены кадров составляла 2 Гц.

Таким образом, в главе 2 получены расчётные и экспериментальные результаты по оценке влияния количества пикселей и пространственного разрешения фотосенсоров камер

на качество восстановления изображений с цифровых голограмм. Это позволило перейти к исследованию влияния следующих основных характеристик фотосенсоров: временных и пространственных шумов, радиометрических параметров.

Глава 3 посвящена измерению характеристик цифровых фото- и видеокамер. В § 3.1 описано измерение радиометрических характеристик камер четырёх типов: бытовой цифровой камеры Canon EOS 400D, научной измерительной камеры MegaPlus II ES11000, камеры технического зрения PixeLink PL-B781F и камеры видеонаблюдения с аналоговым выходом Watec LCL-902C. Для всех четырёх камер полученные радиометрические функции линейны на большей части динамического диапазона.

В § 3.2 описана разработанная методика измерения временных шумов камер и её экспериментальная апробация. Методика позволяет по результатам съёмки одной сцены находить как темновые, так и световые временные шумы для всех уровней сигнала фотосенсора. При этом необходимо, чтобы регистрируемое изображение данной сцены на сенсоре имело диапазон освещённости, превышающий динамический диапазон сенсора. В регистрируемом изображении сцены должны присутствовать все возможные значения яркости в пределах динамического диапазона. Измерены временные шумы указанных камер четырёх типов. Полученные экспериментальные и расчётные корневые (исходя из падения фотонов на поверхность фотоприёмника по распределению Пуассона) зависимости для камер находятся в согласии, исключая область вблизи насыщения, что объясняется эффектом «блуминга». Используя полученные зависимости получены константы пересчёта числа электронов в цифровой сигнал: $9,2 \pm 0,2$ эл./ц.е. (Canon), $11,88 \pm 0,11$ эл./ц.е. (MegaPlus), $10,94 \pm 0,11$ эл./ц.е. (PixeLink) и 41 ± 3 эл./ц.е. (Watec). Экспериментально показано, что достаточно съёмки только 2 кадров для получения оценочной зависимости временного шума от уровня сигнала.

В § 3.3 представлена разработанная методика измерения пространственных шумов и результаты её применения на камерах четырёх типов. Методика отличается пониженными требованиями к пространственной однородности используемого освещения. Получены величины неоднородности фоточувствительности исследуемых камер: $0,0042 \pm 0,0002$ (Canon), $0,0053 \pm 0,0008$ (MegaPlus), $0,0067 \pm 0,0003$ (PixeLink) и не более $0,0053 \pm 0,0002$ (Watec). Использовалось освещение с пространственной неоднородностью $0,015 \div 0,03$, что примерно в три-шесть раз выше, чем неоднородности фоточувствительностей.

Помимо знания характеристик шумов фото- и видеокамер, необходимо знать вид статистических распределений шумов, в том числе для возможности их моделирования. В § 3.4 проведена экспериментальная оценка статистических распределений шумов камер. Получено, что распределения пространственных и темновых временных шумов можно считать гаус-

совыми. Распределение световых временных шумов подчиняется статистике Пуассона, которой описывается дробовой фотонный шум.

В § 3.5 описана методика получения портрета световых пространственных шумов фото- и видеокамер и полученные результаты. Методика отличается способом создания освещения стандартным компьютерным монитором и улучшенным методом удаления темновых шумов. С использованием предложенной методики получен портрет световых пространственных шумов экземпляра камеры Canon EOS 400D. Относительная погрешность определения элементов портрета составила $15 \div 20$ %. С использованием портрета проведена идентификация экземпляра камеры по снимкам, сделанным различными камерами. Результаты идентификации были успешными для всех снимков. При использовании одного цветового канала минимальное отношение коэффициентов корреляции свой снимок / чужой снимок 60.

В § 3.6 проведён анализ и сравнение характеристик цифровых камер для целей цифровой голографии. Все параметры, из числа предоставляемых производителями камер, совпадали с полученными величинами в пределах погрешности измерений.

Полученные результаты позволили перейти к анализу влияния шумов и радиометрических характеристик фотосенсоров на качество восстанавливаемых изображений.

В главе 4 получены расчётные оценки отношения сигнал/шум (ОСШ) и его увеличения для восстановленных изображений с цифровых голограмм Френеля и для регистрируемых световых распределений. В § 4.1 приведена разработанная методика моделирования снимка цифровой камерой с учётом измеренных в главе 3 характеристик камер.

В § 4.2 приведены расчётные оценки ОСШ при регистрации одиночных кадров и результаты численного моделирования. Получены расчётные оценки величины ОСШ в регистрируемых световых распределениях, в том числе цифровых голограммах, при однократной экспозиции. Результаты, полученные при численном моделировании с использованием цифровой камеры MegaPlus, хорошо согласуются с расчётными оценками.

С использованием статистического распределения комплексных амплитуд объектной волны в плоскости голограммы как суммы случайных фазоров, получены аналитические зависимости величины ОСШ в восстановленных с цифровых голограмм изображениях диффузных объектов от их размеров и характеристик фотосенсора. При заданном соотношении средней интенсивности объектного и опорного пучков и полном использовании линейного динамического диапазона фотосенсора, ОСШ зависит только от шумов камеры и площади регистрируемого объекта, нормированной на площадь восстановленного поля.

Проведены численные эксперименты по оценке качества восстановления изображений объектов с цифровых голограмм и проверке полученной аналитической зависимости для ОСШ. При моделировании использовались диффузные объекты, отличающиеся по линей-

ным размерам до 8 раз, расстояние между объектом и голограммой варьировалось в 25 раз, число отсчётов голограмм составляло 1024×1024 . При регистрации цифровых голограмм интенсивность опорной волны считалась равной средней интенсивности объектной волны. В результате подтверждены предположения о том, что в случае диффузных объектов ОСШ для интенсивности восстановленных изображений не зависят ни от расстояния между объектом и голограммой, ни от конкретного вида распределения интенсивности по объекту. Показано, что ОСШ в восстановленных изображениях определяются только шумовыми характеристиками камеры и величиной площади объекта $N_0 \times M_0$, отнесённой к площади восстановленного поля $N \times M$. Результаты численных экспериментов согласуются с полученной аналитической зависимостью для ОСШ. Для всех камер получено выражение для ОСШ вида:

$$SNR = SNR_0 \sqrt{\frac{N \cdot M}{N_0 \cdot M_0}}, \quad (4)$$

где SNR_0 - постоянная для каждой камеры, которую можно получить путём аппроксимации зависимостей ОСШ до значений, когда $N_0=N$ и $M_0=M$.

В § 4.3 описывается разработанный и обоснованный метод увеличения ОСШ за счёт пространственного усреднения по соседним пикселям фотосенсора при однократной и многократной экспозициях. При усреднении по N_p пикселям максимальное увеличение ОСШ составит $\sqrt{N_p}$ раз по сравнению со случаем однократной экспозиции. Результаты численного моделирования согласуются с расчётными величинами.

Получено выражение, определяющее ОСШ в восстановленных с цифровых голограмм изображениях, при использовании пространственного усреднения по группам пикселей. Результаты численного моделирования согласуются с расчётами. Получено, что использование пространственного усреднения по 2×2 , 3×3 , 4×4 пикселя позволяет увеличить ОСШ до 2, 3 и 4 раза соответственно.

В § 4.4 описана разработанная методика увеличения ОСШ за счёт компенсации пространственных шумов с помощью их портретов при однократной и многократной экспозициях. Получены расчётные оценки ОСШ. В случае относительных погрешностей определения портретов, составляющих 20 %, максимальное ОСШ при компенсации пространственных шумов будет в 5 раз выше, чем при подавлении только временных шумов. Результаты проведённого численного моделирования хорошо согласуются с расчётами.

Получены расчётные оценки увеличения ОСШ в изображениях, восстановленных с цифровых голограмм, при использовании компенсации пространственных шумов с помощью их портретов. Результаты, полученные при численном моделировании с использованием характеристик камеры Canon EOS 400D, хорошо согласуются с расчётными оценками. При

компенсации точно измеренными портретами пространственных шумов с многократной экспозицией голограммы, можно ожидать увеличения ОСШ до 50 раз по сравнению с однократной экспозицией голограмм и до 20 раз по сравнению со случаем подавления только временных шумов. При компенсации приближёнными (относительная погрешность 20 %) портретами пространственных шумов максимальное увеличение ОСШ может составлять до 10 раз по сравнению с голограммой, полученной однократной экспозицией.

В § 4.5 описаны результаты экспериментальной проверки полученных оценок ОСШ в регистрируемых световых распределениях и в восстановленных с цифровых голограмм изображениях и методов увеличения ОСШ. Проведена проверка увеличения ОСШ при использовании многократной экспозиции (т.е. подавления только временных шумов). Так, для случая усреднения по 9 снимкам увеличение отношения сигнал/(временной шум) составило $2,98 \pm 0,02$ (при расчётном значении 3).

Получены обоснования увеличения ОСШ с помощью пространственного усреднения по соседним пикселям. Использовались тестовый объект с набором полос (обоснование увеличения сигнал/(временной шум), см. рисунок 2а) и портрет световых пространственных шумов камеры Canon EOS 400D (обоснование увеличения сигнал/(пространственный шум)). Так, при усреднении по 2×2 отсчётам увеличения составили $1,98 \pm 0,01$ и $1,91 \pm 0,17$ раз (расчётное максимальное 2) соответственно.

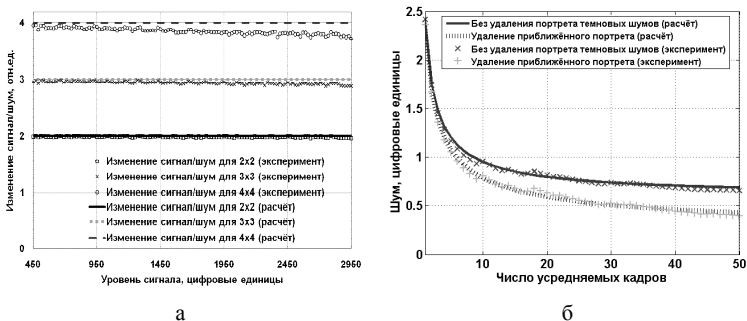


Рисунок 2 – Экспериментальные и расчётные зависимости: относительного изменения отношения сигнал/(временной шум) за счёт пространственного усреднения по 2×2 , 3×3 и 4×4 пикселя от уровня сигнала (а) и величины шума от числа усреднённых темновых снимков как без удаления, так и с удалением портретов темновых пространственных шумов (б)

Для проверки увеличения ОСШ за счёт компенсации пространственных шумов с помощью их портретов проведён эксперимент по съёмке 400 темновых снимков камерой MegaPlus II ES1 1000. На рисунке 2б приведены полученные расчётно и экспериментально зави-

симости шума от числа усредняемых снимков как без удаления, так и с удалением портретов темновых пространственных шумов. Зависимости согласуются между собой.

Для сопоставления результатов численного моделирования по определению расчётных зависимостей ОСШ с характеристиками реальных цифровых голограмм проведены эксперименты по записи цифровых голограмм с использованием нескольких камер из числа исследовавшихся: MegaPlus и Watec. Качество восстановления изображения объекта с голограммы, записанной камерой MegaPlus, превосходит результат восстановления изображения с голограммы, зарегистрированной камерой Watec, что согласуется с полученными значениями. Экспериментальные оценки ОСШ составляют 34 ± 2 (MegaPlus) и 17 ± 2 (Watec). Результат для камеры Watec близок к результатам моделирования (ОСШ=18) и расчётов (ОСШ=21). Для камеры MegaPlus он оказался в 1,5 раза меньше ожидаемого (ОСШ=51). Степень согласования результатов с расчётными обуславливается наличием спеклов и отсутствием возможности проведения усреднения восстановленных изображений по совокупности реальных голограмм.

Заключение

В работе получены следующие основные результаты и выводы:

1. Для основных схем записи цифровых голограмм Френеля систематизированы и дополнены расчётные оценки предельных значений поперечного и продольного размеров и пространственного разрешения регистрируемых объектов, характеризующих качество восстановленных изображений, в зависимости от количества и размеров элементов фотосенсора. Расчётные оценки подтверждены экспериментально.

2. Численным моделированием и экспериментально выполнено сравнение различных методов численного восстановления изображений с цифровых голограмм Френеля и численных методов подавления неинформативных порядков дифракции.

3. На экспериментальной установке, созданной для оценки качества восстановленных изображений, выполнена запись цифровых голограмм Френеля (с числом отсчётов до 2048×2048) «плоских» объектов и объёмных сцен глубиной до 480 мм. Проведены эксперименты по динамическому (2 кадра/с) отображению объёмных сцен с помощью видеопоследовательностей цифровых голограмм численно и оптически. На модифицированном варианте установки осуществлена запись цифровых голограмм при монохроматическом пространственно-некогерентном освещении.

4. Разработаны и экспериментально проверены методики для измерения характеристик камер. Методика измерения временных шумов позволяет по результатам съёмки одной сцены измерять временные шумы для всех уровней сигнала фотосенсора. Экспериментально показано, что достаточно съёмки только 2 кадров сцены. Методика измерения простран-

венных шумов отличается пониженными требованиями к пространственной однородности освещения, что позволило измерить неоднородности фоточувствительности, в три-шесть раз меньше неоднородности используемого освещения.

5. Разработана оригинальная модификация методики нахождения портрета световых пространственных шумов фотосенсора камеры. Методику отличает способ создания освещения, адаптивный к конструкции камеры, и улучшенный метод удаления темновых шумов. С её помощью получен портрет световых пространственных шумов (относительная погрешность $15\div 20\%$) для экземпляра камеры Canon EOS 400D. С использованием измеренного портрета проведён эксперимент по идентификации экземпляра камеры по 9 снимкам, сделанным различными камерами. Минимальное отношение коэффициентов корреляции свой снимок / чужой снимок составило 60.

6. Для получения количественных оценок ОСШ в изображениях, восстановленных с цифровых голограмм, измерены шумовые и радиометрические характеристики камер четырёх различных типов. Все параметры, из числа предоставляемых производителями камер, совпадали с полученными в пределах погрешности измерений.

7. Показано, что при заданном соотношении средней интенсивности объектного и опорного пучков и полном использовании линейного динамического диапазона фотосенсора, ОСШ в изображениях, восстановленных с цифровых голограмм, зависит только от шумов камеры и площади регистрируемого диффузного объекта, нормированной на площадь восстановленного поля. Результаты численных экспериментов согласуются с полученной аналитической зависимостью. Проведено качественное сравнение результатов моделирования с характеристиками реальных цифровых голограмм, записанных камерами MegaPlus II ES11000 и Watec LCL-902C.

8. Предложено использование пространственного усреднения для увеличения ОСШ в регистрируемых световых распределениях и восстановленных изображениях. Получены расчётные оценки и выполнена экспериментальная проверка их обоснованности. Так, при использовании одиночной экспозиции с пространственным усреднением по 16 пикселям экспериментально получено увеличение ОСШ в регистрируемых световых распределениях в $3,9\pm 0,4$ раза (при расчётном 4).

9. Разработан метод увеличения ОСШ в регистрируемых световых распределениях и в восстановленных с голограмм изображениях за счёт компенсации пространственных шумов с помощью их портретов. Получены расчётные оценки увеличения ОСШ и выполнена экспериментальная проверка их обоснованности.

Список работ по теме диссертации

1. Стариков С.Н., Черёмхин П.А., Краснов В.В. Запись и численное восстановление цифровых голограмм Френеля // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». 2011. № 4. С. 113–123.
2. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Увеличение отношения сигнал/шум за счёт пространственного усреднения при регистрации изображений // Вестник РУДН, Серия «Математика. Информатика. Физика». 2012. № 4. С. 122–136.
3. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Получение портрета световых пространственных шумов фотосенсора камеры для идентификации цифровых камер и увеличения отношения сигнал/шум при регистрации изображений // Научно-технические технологии. 2013. № 4. С. 47–55.
4. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Оценка влияния динамического диапазона и шумов регистрирующих камер на качество цифровых голограмм // Оптический журнал. 2013. Т. 80, № 5. С. 53–64.
5. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheryomkhin P.A. [et al.]. Numerical and optical reconstruction of digital off-axis Fresnel holograms // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8429. P. 84291M.
6. Evtikhiev N.N., Starikov S.N., Cheryomkhin P.A. [et al.]. Measurement of noises and modulation transfer function of cameras used in optical-digital correlators // Proceedings of SPIE. 2012. Vol. 8301. P. 830113.
7. Черёмхин П.А., Ропяной А.А., Стариков С.Н. Запись и восстановление цифровых голограмм Френеля // Сборник трудов XIII Международной телекоммуникационной конференции молодых ученых и студентов «Молодежь и наука». М., 2010. Ч. 3. С. 130–131.
8. Черёмхин П.А., Стариков С.Н. Запись и численное восстановление цифровых голограмм Френеля // Тезисы докладов 46 Всероссийской научной конференции по проблемам математики, информатики, физики и химии. М., 2010. С. 58–59.
9. Маныкин Э.А., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Исследование характеристик матричных фоторегистраторов для записи цифровых голограмм // Сборник трудов 7 Международной конференции «ГОЛОЭКСПО–2010». М., 2010. С. 306–310.
10. Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Методы восстановления цифровых голограмм Френеля // Сборник трудов научно-технической конференции-семинара по фотонике и информационной оптике. М., 2011. С. 212–213.
11. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Создание методики измерения модуляционной передаточной функции, радиометрической функции, шумов фото- и видеокамер // Сборник трудов научно-технической конференции-семинара по фотонике и

- информационной оптике. М., 2011. С. 230–231.
12. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Создание методики измерения шумов и радиометрической функции фото- и видеокамер // Тезисы докладов 47 Всероссийской конференции по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники. М., 2011. С.36–37.
 13. Cheryomkhin P.A., Evtikhiev N.N., Starikov S.N. Development of technique for measurements of noises and radiometric function of photo and video camera // Proc. of APCOM–2011. Moscow - Samara, 2011. P. MOSP12.
 14. Стариков С.Н., Черёмхин П.А. Численное и оптическое восстановление внеосевых цифровых голограмм Френеля // Сборник трудов 8 Международной конференции «ГОЛОЭКСПО-2011». Минск, 2011. С. 283–286.
 15. Черёмхин П.А., Стариков С.Н. Численное и оптическое восстановление цифровых голограмм Френеля внеосевого типа // Сборник трудов VII Международной конференции молодых ученых и специалистов «Оптика-2011». СПб., 2011 С. 98–100.
 16. Черёмхин П.А., Краснов В.В. Создание методики измерения шумовых характеристик и радиометрической функции фото- и видеокамер // Сборник докладов IX Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. Самара, 2011. С. 259–265.
 17. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Измерение шумовых и радиометрических характеристик фото- и видеокамер с использованием методики оперативного нахождения временного шума // Сборник трудов Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2012. С. 211–212.
 18. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Использование пространственного усреднения для увеличения отношения сигнал/шум при регистрации изображений // Сборник трудов Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2012. С. 233–234.
 19. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Измерение временных флуктуаций модуляции фазы в ЖК ПВМС HoloEye PLUTO VIS // Тезисы докладов 48 Всероссийской конференции по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники. М., 2012. С. 250–253.
 20. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Фильтрация цифровых голограмм Френеля для подавления нежелательных дифракционных порядков // Тезисы докладов 48 Всероссийской конференции по проблемам физики частиц, физики плазмы и конденсированных сред, оптоэлектроники. М., 2012. С. 254–258.
 21. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Восстановление и фильтрация

- цифровых голограмм Френеля // Сборник трудов 9 Международной конференции «ГОЛОЭКСПО–2012». Суздаль, 2012. С. 111–115.
22. Черёмхин П.А. Измерение динамического диапазона, шумовых характеристик фото- и видеокамер и их влияния на качество цифровых голограмм // Сборник трудов Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики–2012». СПб., 2012. С. 537–538.
23. Поршнева Л.А., Черёмхин П.А. Методы численного восстановления и фильтрации синтезированных и цифровых голограмм Френеля // Сборник докладов X Всероссийского молодежного Самарского конкурса-конференции научных работ по оптике и лазерной физике. Самара, 2012. С. 208–214.
24. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Влияние динамического диапазона и шумов регистрирующих камер на отношение сигнал/шум при восстановлении цифровых голограмм // Сборник трудов II Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2013. С. 173–174.
25. Краснов В.В., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Оценка количества разрешимых градаций сигнала цифровых камер // Сборник трудов II Всероссийской конференции по фотонике и информационной оптике. М., 2013. С. 281–282.
26. Евтихийев Н.Н., Стариков С.Н., Черёмхин П.А. [и др.]. Идентификация цифровых камер по шумовому портрету фотосенсора // Сборник трудов XVI Международной телекоммуникационной конференции молодых ученых и студентов «Молодежь и наука». М., 2013. Ч. 2. С. 85–86.