#### М.А. Волынский, И.П. Гуров, Н.Б. Маргарянц

#### ФОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ И ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Учебно-методическое пособие



#### Санкт-Петербург

#### МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

#### М.А. Волынский, И.П. Гуров, Н.Б. Маргарянц

#### ФОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ И ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Учебно-методическое пособие

#### РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО

по направлению подготовки 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» в качестве учебно-методического пособия для реализации основных профессиональных программ высшего образования магистратуры

**УНИВЕРСИТЕТ ИТМО** 

Санкт-Петербург

2019

Волынский М.А., Гуров И.П., Маргарянц Н.Б. Формирование и анализ изображений в оптической когерентной томографии и цифровой голографии. Учебно-методическое пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2019. – 54 с.

Рецензент: д.т.н., проф. Тропченко Александр Ювенальевич

В пособии приведено описание лабораторных работ по тематике обработки и анализа сигналов и изображений в когерентных системах на примере оптической когерентной томографии и цифровой голографии.

Пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 12.04.03 – Фотоника и оптоинформатика, а также аспирантов, занимающихся проблематикой анализа данных в когерентных системах.

### ЭНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Университет ИТМО – ведущий вуз России в области информационных и фотонных технологий, один из немногих российских вузов, получивших в 2009 году статус национального исследовательского университета. С 2013 года Университет ИТМО – участник программы повышения конкурентоспособности российских университетов среди ведущих мировых научно-образовательных центров, известной как проект «5 в 100». Цель Университета ИТМО – становление исследовательского университета мирового уровня, предпринимательского по типу, ориентированного на интернационализацию всех направлений деятельности.

© Университет ИТМО, 2019

© Волынский Максим Александрович, 2019

© Гуров Игорь Петрович, 2019

© Маргарянц Никита Борисович, 2019

#### Оглавление

#### Введение

Оптические методы анализа формы и внутренней структуры объектов различной природы весьма актуальны, поскольку являются бесконтактными и позволяют получать информацию об объекте с малой погрешностью, определяемой длиной волны оптического излучения. В современной науке и технологиях активно развиваются оптическая когерентная томография (ОКТ) и цифровая голография (ЦГ). Оба метода используют свойство когерентности света, однако подходы к обработке и анализу сигналов и изображений, получаемых указанными методами, различны.

ОКТ - это современная технология бесконтактного исследования внутренней микроструктуры объектов с высоким разрешением (порядка нескольких микрометров) на глубине проникновения оптического излучения. Технология ОКТ была предложена в 1991 г. Дж. Фуджимото применительно к биомедицинским исследованиям, хотя начало ее развития восходит к работам А. Майкельсона (начало XX века) по интерферометрии малой когерентности. ОКТ широко используется в материаловедении, биомедицинских приложениях (офтальмология, дерматология, гастроэнтерология и др.), исследованиях предметов искусства и других областях. Разрешение и глубина сканирования объектов в ОКТ часто превосходят характеристики существующих оптических и других методов исследований. С помощью ОКТ можно анализировать не только трехмерную микроструктуру исследуемого объекта (основное применение ОКТ), но и его поляризационные и спектральные свойства. ОКТ применяется также для динамического анализа параметров кровотока в сосудах с помощью доплеровской ОКТ.

В основе ОКТ лежит принцип оптического радара, т.е. при исследовании измеряется степень отражения оптического излучения на различных расстояниях по глубине объекта. Очевидно, что отражение можно наблюдать на границах раздела слоев исследуемого объекта, которые характеризуются различными значениями показателя преломления, и от отдельных неоднородностей.

Получаемые в результате исследований данные принято представлять в виде так называемых *сканов*. Различают *А*-, *B*- и *С*-сканы (или, соответственно, *A*-, *B*- и *Г*-сканы, если исследователь предпочитает греческий алфавит). *А*-скан (рис. 1, а) показывает степень отражения оптического излучения по глубине объекта в одной точке поверхности объекта. Совокупность *А*-сканов, полученных в точках, расположенных вдоль одной линии в латеральной плоскости объекта и представленных в виде изображения, в котором интенсивность пикселей в каждом столбце пропорциональна отражению зондирующего излучения по глубине, называется *B*-сканом (рис. 1, б) и может интерпретироваться как изображение вертикального сечения объекта. Совокупность *B*-сканов представляет собой трехмерное облако точек (рис. 1, в), которое можно визуализировать при помощи специального программного обеспечения. Горизонтальное сечение такого облака точек называется *C*-сканом.

Важной задачей обработки данных в ОКТ является получение сканов на основе регистрируемых сигналов, которые могут иметь различную физическую природу в зависимости от типа используемой схемы ОКТ.



Рис. 1. *А*-скан (а) и *В*-скан (б) сетчатки глаза и трехмерная томограмма кожи (в)

В 1948 г. Д. Габором был предложен голографический способ записи и воспроизведения амплитуды и фазы объектной волны. Методы ЦГ, позволяющие получать информацию о форме объекта с помощью использования когерентного излучения, начали свое развитие благодаря новым возможностям вычислительной техники. В 1967 г. Дж. Гудменом и Р. Лоуренсом была высказана идея применения компьютерной обработки для восстановления голографически записанного изображения. Далее ЦГ получила развитие в работах Р.В. Кронрода, Н.С. Мерзлякова и Л.П. Ярославского (1972 г.). В современных прикладных исследованиях методы ЦГ весьма активно используются для анализа формы и свойств биологических микрообъектов (эмбрионы, эритроциты и другие биологические клетки, бактерии), при разработке методов таргетной доставки лекарственных средств, а также в технических системах для контроля микроэлектромеханических узлов и элементов микроэлектроники, для анализа формы макрообъектов, в том числе для бесконтактного исследования ценных предметов искусства, а также в системах защиты информации.

Можно выделить четыре вида систем ЦГ:

- Системы с компьютерным синтезом голограммы и оптическим восстановлением изображения из синтезированной голограммы (например, с помощью вывода голограммы на амплитудный, фазовый или амплитудно-фазовый транспарант (например, LCoS<sup>1</sup>) и освещения когерентным излучением, в результате чего наблюдается мнимое изображение объекта, которое можно наблюдать глазом или зарегистрировать на матрицу видеокамеры).
- Системы с оптической записью голограммы, в которых вместо традиционной регистрирующей среды (например, фотопластинки) используется видеокамера, с последующей цифровой реконструкцией изображения объекта из цифровой голограммы.
- Системы с оптической записью голограммы на видеокамеру, выводом ее на амплитудный, фазовый или амплитуднофазовый транспарант для оптического восстановления изображения. Такие системы являются аналогом классической голографии, в которых видеокамера использована вместо регистрирующей среды.
- Системы с цифровым синтезом голограммы и цифровой реконструкция изображения объекта из нее. Такие системы являются полностью виртуальными (компьютерными) и часто используются для защиты графической информации.

Перечисленные методы ЦГ по сравнению с классической обладают рядом преимуществ (не требуется регистрирующая среда, доступна количественная информация об объекте), однако имеют и недостатки, в числе которых ограниченное разрешение (размер пикселей матриц современных видеокамер больше размера зерна фотоэмульсии в регистрирующих средах для записи классических голограмм) и невозможность получения объемных голограмм (голограмм Денисюка). Несмотря на указанные особенности, методы ЦГ активно используются в современных научных исследованиях и имеют широкие перспективы развития.

Настоящее пособие предназначено для магистрантов, обучающихся по направлению подготовки 12.04.03 «Фотоника и оптоинформатика» по программам магистратуры «Компьютерная фотоника» и

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> LCoS – Liquid Crystal on Silicon – жидкие кристаллы на кремнии – получили широкое распространение в видеопроекторах.

«Биофотоника», которые предусматривают освоение дисциплин «Принципы преобразования и формирования световых полей», «Анализ изображений в оптической когерентной томографии и цифровой голографии», «Оптическая томография», «Цифровая голография». Пособие также может быть рекомендовано аспирантам, занимающимся проблематикой анализа данных в оптических когерентных системах.

В лабораторном практикуме кратко описаны физические принципы формирования сигналов в системах ОКТ и ЦГ различных типов и подробно рассмотрены применяемые в тех или иных случаях алгоритмы обработки данных. Обучающимся предлагается самостоятельно реализовать и протестировать описанные алгоритмы на модельных и экспериментальных данных.

Описание всех лабораторных работ включает цель работы, задание по работе, описание теоретической и экспериментальной частей работы, а также контрольные вопросы для самопроверки. Контроль знаний предполагает оформление студентом отчета в соответствии с требованиями, изложенными в Приложении к настоящему пособию, а также его защиту преподавателю, включающую развернутые ответы на вопросы для самопроверки. Целью защиты является контроль приобретенных студентом компетенций, предусмотренных направлением подготовки «Фотоника и оптоинформатика» и формируемых в рамках осваиваемой дисциплины (модуля), включая уровень достижения студентом конкретных результатов обучения (умений, навыков). При необходимости, в ходе подготовки к защите отчета студенту может потребоваться изучение дополнительной литературы, список которой приведен в конце настоящего пособия, а также литературы, рекомендованной преподавателем.

Настоящее пособие является развитием ранее изданного пособия [1], откуда частично заимствованы описания лабораторных работ по ОКТ с исправлениями и дополнениями. При работе с настоящим пособием учащимся будет полезно изучение пособий [2, 3], изданных авторами ранее, в которых описываются основные принципы формирования, регистрации и обработки данных в когерентных оптических системах. Основой для создания лабораторных работ по ЦГ послужили также исследования, проведенные в рамках диссертационной работы [4].

# Работа 1. Формирование изображений, анализ и обработка сигналов в корреляционной оптической когерентной томографии

Цель работы: ознакомление с методами формирования изображений и обработки сигналов в корреляционной оптической когерентной томографии.

#### Задание по работе

- 1. Изучить теоретическую часть работы.
- 2. Реализовать компьютерную программу, принимающую на вход набор видеокадров и формирующую на выходе набор *B*-сканов исследуемого объекта.
- 3. Провести апробацию реализованной программы на различных наборах видеокадров, оценить правильность построения *B*-сканов и их контраст.
- 4. При помощи методов улучшения изображений (увеличение контраста, модификация гистограмм и др.) повысить качество визуализации полученных *B*-сканов.

#### 1.1 Теоретическая часть

#### Корреляционная ОКТ

Для отображения внутренней структуры исследуемого объекта необходимо определить величину отражения зондирующего излучения по глубине объекта. Прямое измерение задержки отраженного оптического излучения невозможно ввиду большой скорости света. Для решения этой проблемы в системах ОКТ применяются двухлучевые интерферометры, в которых параметры одной из волн (опорной волны) известны, что позволяет оценить параметры измерительной волны по отношению к опорной при помощи анализа интерферометрического сигнала, полученного при сложении этих волн.

Если используется источник низкокогерентного излучения с широким спектром (например, галогенная лампа), то максимум видности интерференционной картины в некоторой точке будет наблюдаться при нулевой разности хода опорной и измерительной волн (при совпадении их оптических длин путей). Искусственно изменяя оптическую длину пути, который проходит одна из волн, можно по изменению интерферометрического сигнала оценить отражение излучения по глубине исследуемого объекта (получить *A*-скан).

Системы корреляционной ОКТ (time domain OCT) – это системы ОКТ первого поколения. Большинство систем ОКТ используют схему двухлучевого интерферометра Майкельсона с источником излучения, который обладает широким спектром. Выбор глубины, на которой оценивается степень отражения, происходит путем физического перемещения опорного отражателя или объекта в одном из плеч интерферометра. Схема такой системы ОКТ изображена на рис. 2.



Рис. 2. Схема системы корреляционной ОКТ

Волна от источника излучения с широким спектром разделяется при помощи светоделителя на две взаимно когерентные волны, которые, отразившись от опорного зеркала и слоя объекта, интерферируют. Эти волны можно представить в комплексной форме

$$E_{1i}(t) = ra_i(t) \exp[j2\pi v_i(t)], \qquad (1.1)$$

$$E_{2i}(t) = a_i(t+\tau) \exp[-j2\pi v_i(t+\tau)], \qquad (1.2)$$

где индексом *i* обозначены различные волновые цуги,  $a_i$  и  $v_i$  – амплитуды и частоты световых колебаний различных цугов, r – коэффициент отражения измерительной волны по интенсивности ( $r \le 1$ ),  $\tau = \Delta/c$  – время запаздывания измерительной волны,  $\Delta$  – оптическая разность хода, c – скорость света, j – мнимая единица.

Интенсивность излучения на выходе интерферометра определяется выражением:

$$I(\tau) = \left\langle \left| E_{1i}(t) E_{2i}^{*}(t+\tau) \right|^{2} \right\rangle_{i} = I_{0} + 2\sqrt{I_{1}I_{2}} \operatorname{Re}V(\tau), \qquad (1.3)$$

где  $I_0 = I_1 + I_2$  – фоновая составляющая,  $I_1$ ,  $I_2$  – интенсивности волн, отраженных от опорного отражателя и объекта,  $V(\tau)$  – нормированная функция взаимной когерентности:

$$V(\tau) = \left\langle E_{1i}(t) E_{2i}^*(t+\tau) \right\rangle / \sqrt{I_1 I_2} , \qquad (1.4)$$

где \* обозначает комплексное сопряжение.

Если интервал частот излучения  $\Delta v$  узкий,  $\Delta v / \langle v \rangle \ll 1$ , где  $\Delta v -$  ширина спектра источника излучения,  $\langle v \rangle -$  среднее значение частоты, а значения  $\tau$  достаточно малы, так что выполняется условие ( $\Delta v$ ) $\tau \ll 1$ , то выражение (1.3) можно переписать в виде

$$I(\tau) = I_0 + 2\sqrt{I_1 I_2} |V(\tau)| \cos(2\pi \langle v \rangle \tau), \qquad (1.5)$$

где  $|V(\tau)|$  – модуль функции временной когерентности излучения. Если в среде отсутствует дисперсия, то функция взаимной когерентности интерферирующих волн (1.4) совпадает с функцией когерентности излучения источника:

$$V(\tau) = \left\langle E(t)E^*(t+\tau) \right\rangle / \left\langle E(t)E^*(t) \right\rangle.$$
(1.6)

Выражение (1.6) можно рассматривать как нормированную функцию автокорреляции случайного процесса излучения волновых цугов.

Автокорреляционная функция достигает своего максимума при  $\tau = 0$ . Волна, отраженная от слоя объекта, имеет задержку  $\tau = 2\pi nz/c$ , где z – значение координаты по глубине среды, n – показатель преломления.

Перемещая объект или опорный отражатель вдоль оптической оси, по степени отражения можно оценить относительное положение границ слоев исследуемого объекта в каждой точке широкого поля зрения по набору видеокадров, регистрируемых матричным фотодетектором на выходе интерферометра. В качестве таких детекторов используются ПЗС- и КМОП-матрицы.

На рис. З представлен пример набора видеокадров, полученных при различных положениях опорного отражателя, и сигнал, соответствующий изменению интенсивности в некотором пикселе в зависимости от номера видеокадра. Анализируя изменение сигналов при различном положении опорного отражателя (или объекта) можно получить информацию о степени отражения измерительной волны по глубине исследуемой среды (*A*-скан) в данной точке.



Рис. 3. Набор регистрируемых матрицей видеокадров (а) и экспериментальный сигнал, характеризующий изменения интенсивности в одном пикселе (б)

Интерферометрический сигнал, как видно на рис. 3, б, состоит из фоновой и интерференционной составляющих. Информация о расположении слоев внутри исследуемого образца содержится в амплитуде интерференционной составляющей, причем расположение максимумов амплитуды соответствует расположению границ слоев внутри объекта. Обработка данных в системах корреляционной ОКТ сводится к выделению огибающей (амплитуды) сигналов, полученных во всех точках поля зрения на участке исследуемого объекта.

#### Разрешение в системах ОКТ

Важнейшими параметрами систем ОКТ являются аксиальное (по глубине) и латеральное (в боковой плоскости) разрешение. В системах ОКТ аксиальное разрешение определяется длиной когерентности источника излучения, которая может быть вычислена как полуширина функции когерентности. Известно, что функция когерентности может быть получена в результате обратного преобразования Фурье от спектра источника. Для источника с гауссовским спектром разрешение по глубине оценивается как

$$\Delta z = \frac{2\ln 2}{\pi} \left( \frac{\langle \lambda \rangle^2}{\Delta \lambda} \right), \tag{1.7}$$

где  $\Delta\lambda$  – ширина спектра источника излучения, а  $\langle\lambda\rangle$  – центральная длина волны. Видно, что увеличение относительной ширины спектра источника приводит к повышению аксиального разрешения.

Латеральное разрешение определяется числовой апертурой используемого объектива:

$$\Delta x = \frac{4\langle \lambda \rangle}{\pi} \frac{f}{d} = \frac{4\langle \lambda \rangle}{\pi} NA, \qquad (1.8)$$

где NA – числовая апертура (отношение фокусного расстояния f к диаметру зрачка d объектива).

#### Алгоритм обработки данных в корреляционной ОКТ

Наблюдаемый сигнал в зависимости от координаты *z* опорного отражателя (или объекта, если движущий элемент установлен в измерительном плече интерферометра), см. рис. 3, б, можно представить как

$$s(z) = B(z) + A(z)\cos(\Phi(z)) + n(z), \qquad (1.9)$$

где B(z) – фоновая составляющая, A(z) – огибающая,  $\Phi(z)$  – полная фаза, n(z) – случайный белый гауссовский шум с нулевым средним. Возможный алгоритм выделения огибающей (амплитуды) такого сигнала состоит из следующих шагов:

- оценка фоновой составляющей сигнала при помощи низкочастотной фильтрации и ее вычитание из исходного сигнала;
- возведение результата в квадрат;
- повторная низкочастотная фильтрация сигнала с целью выделения огибающей сигнала;
- извлечение квадратного корня для приведения полученного результата к начальному диапазону значений.

Полученный результат можно интерпретировать как A-скан в одной точке. Для получения B-скана (см. рис. 1) необходимо представить результат обработки набора сигналов вдоль одной линии в латеральной плоскости объекта в виде изображения, то есть набора параллельных A-сканов. Трехмерную томограмму (набор A-сканов для всех точек исследуемого объекта) можно визуализировать при помощи компьютерных приложений для отображения трехмерных облаков точек (например, при помощи программы Voxx<sup>2</sup>).

#### 1.2 Экспериментальная часть

- 1. Получить файл с набором экспериментальных видеокадров у преподавателя.
- Написать программу, реализующую алгоритм обработки данных в корреляционной ОКТ, используя любой язык программирования или математический пакет.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> http://www.indiana.edu/~voxx/

- 3. Провести обработку набора видеокадров.
- 4. Сделать выводы и оформить отчет по лабораторной работе, в котором отобразить все шаги работы алгоритма на примере обработки одномерного интерферометрического сигнала с целью получения А-скана и результат обработки таких сигналов вдоль одной строки с целью получения B-скана.

#### Вопросы для самопроверки

- 1. Опишите принцип работы систем корреляционной ОКТ.
- За счет какого физического явления и каким образом в системах корреляционной ОКТ происходит измерение степени отражения по глубине исследуемой среды?
- Почему в системах ОКТ используются источники излучения с широким спектром? Приведите примеры таких источников.
- 4. Какие элементы систем ОКТ влияют на разрешение? В чем различие между аксиальным и латеральным разрешением?
- 5. Что представляют собой исходные (не подвергнутые компьютерной обработке) данные, регистрируемые в системах корреляционной ОКТ?
- 6. Опишите алгоритм выделения огибающей интерферометрического сигнала. В чем, по вашему мнению, заключаются достоинства и недостатки этого алгоритма?
- 7. Какой эффект обеспечивает низкочастотная фильтрация сигнала?

#### Работа 2. Формирование изображений, анализ и обработка сигналов в спектральной оптической когерентной томографии

**Цель работы:** ознакомление с методами получения сигналов в спектральной оптической когерентной томографии и реализация алгоритма обработки данных.

#### Задание по работе

- 1. Изучить теоретическую часть работы.
- 2. Реализовать компьютерную программу, осуществляющую обработку спектрального ОКТ-сигнала с целью получения *A*-скана.
- 3. Апробировать реализованную программу на различных сигналах.
- 4. Реализовать получение В-скана из набора ОКТ-сигналов.

#### 2.1 Теоретическая часть

#### Спектральная ОКТ

Излучение источника с широким спектром представляет собой совокупность световых волн с различной длиной волны (частотой). В системах спектральной OKT (spectral/frequency/Fourier domain OCT) сигнал на выходе двулучевого интерферометра является суперпозицией интерферометрических сигналов, полученных для различных длин волн. При фиксированной оптической разности хода (OPX) в интерферометре результат интерференции на каждой длине волны зависит от количества длин волн, укладывающихся в OPX. Интенсивность света в зависимости от длины волны изменяется от максимальной (при целом количестве m длин волн) до минимальной (при m+1/2 длин волн). В результате в зависимости от длины волны формируется так называемый канавчатый спектр, в котором частота изменения периодической составляющей интенсивности пропорциональна OPX.

При нескольких отражениях по глубине среды канавчатые спектры имеют различные частоты и некогерентно складываются, и для наблюдения доступна их суперпозиция. На выходе интерферометра устанавливают спектральный прибор, обеспечивающий разложение излучения на компоненты с различными длинами волн. В схеме, представленной на рис. 4, эту функцию выполняет дифракционная решетка. Основными преимуществом систем спектральной ОКТ является возможность одновременной регистрации интенсивности отраженного излучения по всей глубине. Сигнал *А*-скана при спектральной интерференции регистрируется линейкой фотодетекторов и при однократном отражении на фиксированной глубине имеет вид, представленный на рис. 5. Использование вместо линейки матрицы фотодетекторов в качестве приемника излучения позволяет одновременно регистрировать набор сигналов вдоль одной линии в латеральной плоскости. Результатом обработки является изображение аксиального сечения исследуемого объекта – *B*-скана.



**Рис. 5.** Пример сигнала, регистрируемого в системе спектральной ОКТ при отражении излучения на фиксированной глубине

Если пренебречь дисперсией света в образце, сигнал на выходе интерферометра можно представить в виде

$$I(k) = S(k) \left| a_R e^{j2kr} + \int_0^\infty a(z) e^{j2k[r+n(z)z]} dz \right|^2,$$
(2.1)

где S(k) – спектральное распределение интенсивности излучения источника,  $a_R = 1$  – амплитуда опорной волны, a(z) – амплитуда измерительной волны на глубине  $z, k = 2\pi/\lambda$  – волновое число, 2r – длина пути в опорном плече (поскольку на интерференционную составляющую сигнала влияет разность хода, а не расстояние r), z – координата по глубине среды, n – показатель преломления (n = 1 для  $z < z_0$ ,  $z_0$  – координата по слубине среды, n – показатель преломления (n = 1 для  $z < z_0$ ,  $z_0$  – координата по слубине среды, n – показатель преломления (n = 1 для  $z < z_0$ ,  $z_0$  – координата поверхности объекта, и n > 1 для продольного направления в образце  $z > z_0$ ). Отметим, что интерферометрический сигнал (2.1) зависит от разности фаз измерительной и опорной волн, поэтому общий для них фазовый сдвиг, определяемый множителем  $e^{j2kr}$ , можно опустить. При этом сигнал представляется в виде

$$I(k) = S(k) |1 + \int_{0}^{\infty} a(z)e^{j2knz}dz|^{2} = S(k) \times \\ \times [1 + 2\int_{0}^{\infty} a(z)\cos(2knz)dz + \int_{0}^{\infty} \int_{0}^{\infty} a(z)a(z')e^{-j2kn[z-z']}dzdz'].$$
(2.2)

Из (2.2) видно, что I(k) представляет собой сумму трех слагаемых. Второе слагаемое содержит информацию о степени отражения по глубине a(z). Для каждого значения глубины косинусоидальная функция описывает хорошо известные в спектральной интерферометрии полосы Мюллера. Можно заметить, что величина a(z) может быть получена при помощи преобразования Фурье этой составляющей сигнала спектральной интерференции. Третья (автокорреляционная) составляющая описывает взаимную интерференцию волн, отраженных от различных слоев объекта и является неинформативной.

Функцию a(z) можно найти с помощью преобразования Фурье функции I(k) полагая, что a(z) симметрична относительно нуля по оси z. Так как для любого  $z < z_0$  функция a(z) = 0, то можно дополнить a(z) симметричной относительно начала координат составляющей  $\hat{a}(z) = a(z) + a(-z)$ . Теперь выражение (2.2) примет вид

$$I(k) = S(k)[1 + \int_{-\infty}^{\infty} \hat{a}(z)\cos(2knz)dz + \frac{1}{4}\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \hat{a}(z)\hat{a}(z')e^{-j2kn[z-z']}dzdz'] =$$
  
=  $S(k)[1 + \int_{-\infty}^{\infty} \hat{a}(z)e^{-j2knz}dz + \frac{1}{4}\int_{-\infty}^{\infty} AC[\hat{a}(z)]e^{-j2knz}dz],$  (2.3)

где  $AC[\hat{a}(z)]$  – автокорреляционная функция. Выражение (2.3) может быть записано в форме

$$I(k) = S(k) \left( 1 + \frac{1}{2} \operatorname{FT}_{z} \{ \hat{a}(z) \} + \frac{1}{8} \operatorname{FT}_{z} \{ \operatorname{AC}[\hat{a}(z)] \} \right),$$
(2.4)

где  $FT_{z}$  – оператор прямого преобразования Фурье. Обратное преобразование Фурье от I(k) дает следующий результат:

$$FT_{z}^{-1}{I(k)} = FT_{z}^{-1}{S(k)} \otimes \left(\delta(z) + \frac{1}{2}\hat{a}(z) + \frac{1}{8}AC[\hat{a}(z)]\right) = A \otimes (B + C + D), \qquad (2.5)$$

где знак ⊗ обозначает операцию свертки.

Типичный результат обратного преобразования Фурье от сигнала в системе спектральной ОКТ представлен на рис. 6. Полезная составляющая сигнала a(z) содержится в выражении (2.5), однако помимо полезной составляющей в нем присутствуют еще три компоненты A, B и D. Первое слагаемое  $A \otimes B$  – это Фурье-образ спектра источника излучения, который расположен в низкочастотной части спектра. Для выделения полезной составляющей C этот участок не учитывается.



Рис. 6. Характерный результат преобразования Фурье от сигнала в системе спектральной ОКТ

Вклад слагаемого  $A \otimes D$  для сильно рассеивающей среды незначителен, поскольку автокорреляционное слагаемое намного меньше полезной составляющей и располагается главным образом в области низких частот.

#### ОКТ с перестраиваемой длиной волны

Альтернативным подходом к формированию изображений является использование систем спектральной ОКТ с перестраиваемой длиной волны (swept-source OCT). В этих системах используются перестраиваемые по длине волны лазеры, которые получили широкое распространение в последнее время. Оптическая схема такой системы представлена на рис. 7.

В системах ОКТ с перестраиваемой длиной волны происходит регистрация сигналов спектральной интерференции (сигналов в частотной области), для которых также справедливы уравнения (2.1)–(2.5). Однако в таких системах на каждой длине волны перестраиваемого лазера возможна регистрация отраженного излучения сразу для всех точек поля зрения. При этом выходными данными в системах ОКТ полного поля с перестраиваемой длиной волны является набор видеокадров, в которых изменение интенсивности в каждом пикселе в зависимости от длины волны представляет собой сигнал спектральной интерференции. Однако в целях повышения быстродействия обычно регистрируют не видеокадры, а сигналы, сформированные в отдельных точках при боковом сканировании с помощью сканирующего зеркала (см. рис. 7).



Рис. 7. Схема системы ОКТ с перестраиваемой длиной волны

#### Проблема неэквидистантного по частоте снятия отсчетов

Интерферометрические сигналы регистрируются с постоянным шагом по длине волны, что обеспечивается определенным расположением фотодетекторов на линейке в системах спектральной ОКТ и фиксированным шагом перестройки лазера в системах ОКТ с перестраиваемой длиной волны. Такие измерения называются эквидистантными по длине волны. Так как волновые числа обратно пропорциональны длинам волн  $k_i = 2\pi/\lambda_i$ , очевидно, что при фиксированном приращении длины волны  $\Delta\lambda$  сигналы регистрируются с изменяющимся шагом по волновому числу (отсчеты сигнала неэквидистантны)  $\Delta k_i = -2\pi\Delta\lambda/\lambda_i^2$ .

Для получения корректного результата преобразования Фурье необходимо, чтобы отсчеты сигнала по волновому числу были эквидистантными. Эта проблема может быть решена при помощи передискретизации исходного сигнала после перевода его в пространство волновых чисел.

Пусть  $\lambda_{\min}$  и  $\lambda_{\max}$  – начальная и конечная длины волн, которыми определяется диапазон перестройки лазера, N – количество отсчетов по длинам волн. Приращение по длине волны для регистрируемых дискретных отсчетов сигнала можно выразить как

$$\Delta \lambda = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{N} \,. \tag{2.6}$$

Волновые числа находятся в диапазоне от  $k_{\min} = 2\pi/\lambda_{\max}$  до  $k_{\max} = 2\pi/\lambda_{\min}$  с переменным приращением  $\Delta k_i$ . Для корректной работы преобразования Фурье необходимо, чтобы это приращение было постоянным и равнялось

$$\Delta k = \frac{k_{\max} - k_{\min}}{N} \,. \tag{2.7}$$

Пусть i = 0..N-1 – номер дискретного отсчета. Тогда  $\lambda_i = \lambda_{\min} + i\Delta\lambda$  – сетка в пространстве длин волн с постоянным приращением. Чтобы приращения в пространстве волновых чисел были постоянными, нужно ввести новую сетку в пространстве длин волн:  $\lambda_i = 2\pi/k_i$ , где  $k_i = k_{\min} + i\Delta k$ .

Если приращение длины волны при переходе к новой сетке не превышает постоянного шага изменения длины волны  $\Delta\lambda$ , то значение сигнала в точке  $\lambda'_i$  между точками  $\lambda_i$  и  $\lambda_{i+1}$  может быть найдено методом линейной интерполяции в форме

$$I(\lambda'_{i}) = \frac{I(\lambda_{i+1}) - I(\lambda_{i})}{\Delta \lambda} (\lambda'_{i} - \lambda_{i}) + I(\lambda_{i}), \qquad (2.8)$$

полагая, что  $I(\lambda'_1) = I(\lambda_1)$ .

Окончательно, при замене  $I(\lambda'_i)$  и  $I(\lambda_i)$  на  $I'_i$  и  $I_i$ , соответственно, формула для передискретизации принимает вид

$$I'_{i} = \frac{I_{i+1} - I_{i}}{\Delta \lambda} \left( \frac{\lambda_{\min} \lambda_{\max} N}{\lambda_{\min} N + i(\lambda_{\max} - \lambda_{\min})} - \lambda_{\min} - i\Delta \lambda \right) + I_{i}.$$
(2.9)

#### Алгоритм обработки данных в спектральной ОКТ

Алгоритм обработки данных в спектральной ОКТ включает следующие операции:

- удаление фоновой составляющей сигнала при помощи вычитания результата низкочастотной фильтрации;
- передискретизация сигнала в пространстве волновых чисел на сетку с постоянным шагом с помощью линейной интерполяции (см. (2.9));
- обратное преобразования Фурье полученного сигнала;
- вычисление модулей коэффициентов Фурье и выделение полезной составляющей сигнала А-скана.

#### 2.2 Экспериментальная часть

- 1. Получить файл с экспериментальными данными у преподавателя.
- Написать программу, реализующую описанный алгоритм обработки данных в спектральной ОКТ на основе преобразования Фурье, используя любой язык программирования или математический пакет.
- 3. Сделать выводы и оформить отчет по лабораторной работе, в котором отобразить шаги обработки сигнала и результат обработки набора сигналов (*B*-скан).

#### Вопросы для самопроверки

- 1. В чем состоит отличие спектральной ОКТ от корреляционной ОКТ? Какие методы формирования сигналов спектральной интерференции Вам известны?
- 2. Сравните принцип действия систем спектральной ОКТ и систем ОКТ с перестраиваемой длиной волны.

- Что является регистрируемым сигналом в системе спектральной ОКТ? Что такое неэквидистантность отсчетов сигнала?
   Почему для использования преобразования Фурье для обработки
- 4. Почему для использования преобразования Фурье для обработки данных в спектральной ОКТ необходимо представить сигнал на сетке волновых чисел с постоянным шагом?
- 5. Опишите алгоритм передискретизации сигнала спектральной интерференции.

# Работа 3. Методы обратной свертки для повышения качества изображений в системах оптической когерентной томографии

**Цель работы:** исследование методов обратной свертки (противосвертки) для улучшения разрешения в системах оптической когерентной томографии.

#### Задание по работе

- 1. Изучить теоретическую часть работы.
- 2. Реализовать обработку сигналов в ОКТ при помощи различных алгоритмов противосвертки.
- 3. Апробировать реализованную программу на экспериментальных сигналах.
- 4. Провести сравнение работы реализованных алгоритмов, оценить их достоинства и недостатки.

#### 3.1 Теоретическая часть

#### Продольная и поперечная функция рассеяния точки в системах ОКТ

Увеличение разрешения в системах ОКТ, как правило, обеспечивается аппаратными средствами, такими как использование подходящего источника излучения для повышения аксиального разрешения и увеличение числовой апертуры используемого объектива для повышения латерального разрешения.

Однако получаемые изображения независимо от используемого оборудования подвержены размытию, причиной которого является конечная протяженность функции рассеяния точки (ФРТ). Для устранения этого эффекта и повышения разрешения в ОКТ используются методы, называемые в теории обработки сигналов методами обратной свертки (данную процедуру часто называют противосверткой).

Интенсивность интерферометрического сигнала в системе ОКТ может быть представлена формулой

$$I(\tau) = 2\operatorname{Re}\left\{\Gamma(\tau) \otimes f(\tau)\right\},\tag{3.1}$$

где  $\Gamma(\tau)$  – функция когерентности излучения источника, которая характеризуется обратным преобразованием Фурье от спектра источника  $S(\lambda), f(\tau)$  – функция, соответствующая оптическому импульсу, отраженному от образца,  $\tau$  – временная задержка измерительной волны,

символ  $\otimes$  обозначает операцию свертки. Функция когерентности  $\Gamma(\tau)$  определяет ФРТ в направлении, перпендикулярном плоскости объекта. Длина когерентности  $l_c$  равна полуширине функции когерентности и для спектра  $S(\lambda)$  гауссовской формы определяется формулой

$$l_c = \frac{2\ln 2}{\pi} \left( \frac{\langle \lambda \rangle^2}{\Delta \lambda} \right), \tag{3.2}$$

где  $\langle \lambda \rangle$  – центральная длина волны в спектре излучения источника,  $\Delta \lambda$  – полуширина спектра. В системах ОКТ предпочтительно использование источников с гладким широким спектром (обычно гауссовской формы).

Значения интенсивности в сечении пучка можно представить в виде

$$I(r,z) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w^2(z)}\right),$$
(3.3)

где  $A_0$  – постоянная, *z* – координата по глубине исследуемой среды, *r* – радиальная координата, *w* – распределение интенсивности на полуширине перетяжки пучка.

Если в системе ОКТ используется линза с низкой числовой апертурой, то пространственное распределение амплитуды может быть аппроксимировано формулой

$$I(r) = I_0 \exp\left(-\frac{r^2}{w_0^2}\right),$$
(3.4)

где  $w_0$  – фиксированное значение радиуса пучка, который является наименьшим в точке z = 0 и может быть представлен в форме

$$w_0 = \frac{4\langle \lambda \rangle}{\pi} \frac{f}{d} \,, \tag{3.5}$$

где f – фокусное расстояние объектива, а d – диаметр зрачка.

Представленные выше соотношения показывают, что важным параметром при формировании аксиальной ФРТ (по глубине) и латеральной ФРТ (в плоскости наблюдения объекта, точки которой определяются координатой *r*) является длина волны излучения. Аксиальная и латеральная ФРТ являются взаимно независимыми, следовательно, противосвертка может осуществляться по отдельности в аксиальном и латеральном направлении. Использование алгоритмов противосвертки позволяет восстановить оригинальное изображение f(x, y) из зарегистрированного g(x, y), которое является сверткой оригинального изображения с ядром h(x, y):

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y).$$
(3.6)

Используя теорему о свертке, можно записать

$$G(u,v) = F(u,v)H(u,v)$$
, (3.7)

где G(u, v), F(u, v) и H(u, v) – соответственно, Фурье-образы функций g(x, y), f(x, y) и h(x, y), u и v – пространственные частоты. Простейшую формулу противосвертки в частотной области согласно (3.7) можно записать в виде

$$\hat{F}(u,v) = \frac{G(u,v)}{H(u,v)} = \frac{F(u,v)H(u,v)}{H(u,v)} = F(u,v).$$
(3.8)

Искомый сигнал можно восстановить при помощи обратного преобразования Фурье с учетом (3.8) в форме

$$f(x, y) = \mathrm{FT}^{-1} \left\{ F(u, v) \right\} = \mathrm{FT}^{-1} \left\{ \frac{G(u, v)}{H(u, v)} \right\},$$
(3.9)

где FT<sup>-1</sup>{.} – оператор обратного преобразования Фурье.

Реальные сигналы, получаемые в системах ОКТ, подвержены влиянию аддитивного шума и могут быть представлены как

$$g(x, y) = f(x, y) \otimes h(x, y) + n(x, y), \qquad (3.10)$$

где *n*(*x*, *y*) – случайный шум. С учетом свойства линейности преобразования Фурье можно записать

$$G(u,v) = F(u,v)H(u,v) + N(u,v), \qquad (3.11)$$

где *N*(*u*, *v*) – спектр аддитивного шума. Тогда уравнение (3.8) примет вид

$$\hat{F}(u,v) = \frac{G(u,v)}{H(u,v)} = \frac{F(u,v)H(u,v) + N(u,v)}{H(u,v)} =$$
$$= F(u,v) + \frac{N(u,v)}{H(u,v)}, \ H(u,v) \neq 0.$$
(3.12)

Ошибка, вносимая шумом во втором слагаемом (3.12), оказывает существенное влияние на результат, поэтому алгоритм противосвертки в форме (3.12) не используется на практике. Вместо него применяются помехоустойчивые алгоритмы обработки изображений. Ниже рассмотрены три таких алгоритма: алгоритм Винера, алгоритм Люси-Ричардсона и алгоритм рекурсивной противосвертки.

#### Алгоритмы Винера и Люси-Ричардсона

Алгоритм Винера основывается на восстановлении изображения при помощи широко известного метода наименьших квадратов. В частотной области этот алгоритм может быть представлен формулой

$$\hat{F}(u,v) = \left[\frac{1}{H(u,v)} \frac{|H(u,v)|^2}{|H(u,v)|^2 + \frac{S_{\eta}(u,v)}{S_f(u,v)}}\right] G(u,v), \qquad (3.13)$$

где  $S_{\eta}(u,v)$  и  $S_f(u,v)$  – спектральные плотности мощности шума и сигнала, соответственно. На практике сложно точно оценить эти параметры априорно, поэтому вместо них часто используют среднее значение отношения мощности шума к мощности полезного сигнала.

Алгоритм Люси-Ричардсона основан на итерационной процедуре и может быть представлен в форме

$$f_{m+1}(x, y) = f_m(x, y) \left[ h(-x, -y) \otimes \frac{g(x, y)}{h(x, y) \otimes f_m(x, y)} \right],$$
(3.14)

где  $f_m(x, y)$  – оценка оригинального изображения, g(x, y) – зарегистрированное в системе ОКТ изображение,  $h(x, y) - \Phi$ РТ, m – номер итерации. На начальном шаге обычно принимают  $f_0(x, y) = g(x, y)$ . В качестве критерия останова может использоваться установленное пользователем ограничение на максимальное число итераций, которое выбирается в зависимости от требований к качеству обработки и быстродействию, или условие малого изменения результата на каждой последующей итерации.

Оба рассмотренных алгоритма могут быть использованы двумя способами. Один из них предполагает применение алгоритма к двумерному изображению (т.е. использование свертки с двумерным ядром). Второй способ предполагает применение алгоритма последовательно к строкам и столбцам обрабатываемого изображения (последовательное использование двух одномерных ядер).

#### Рекурсивная противосвертка

Алгоритм Винера основывается на преобразовании Фурье, применяемом после записи полной реализации сигнала, а алгоритм Люси-Ричардсона является итерационным. Это существенно ограничивает возможности их использования в системах ОКТ из-за ограничений по быстродействию. Указанный недостаток может быть устранен при помощи использования алгоритма рекурсивной обратной свертки. Дискретная свертка функции отражения зондирующего излучения по глубине с функцией когерентности источника в одной точке (*A*-скан) может быть записана как

$$g(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(k-n)h(n), \qquad (3.15)$$

где k и n – номер дискретного отсчета, h(n) – дискретная последовательность отсчетов функции когерентности используемого источника, f(k) – значения отсчетов A-скана. Значения оценки функции отражения по глубине  $\hat{f}(k)$  могут быть получены при помощи свертки функции (3.6) с функцией  $h^{-1}(k)$ , обратной h(k). Импульсный отклик такого

ции (3.6) с функцией 
$$h^{-1}(k)$$
, обратной  $h(k)$ . Импульсный отклик такого фильтра может быть записан в форме

$$h^{-1}(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \frac{k^{-n}}{h(k)}.$$
(3.16)

Так как для минимально-фазового фильтра всегда выполняется условие  $h(0) \neq 0$ , выражение (3.16) можно привести к виду

$$h^{-1}(k) = \left\{ h(0) \left[ 1 + \frac{h(1)k}{h(0)} + \frac{h(2)k^2}{h(1)} + \dots \right] \right\}^{-1}.$$
 (3.17)

Обозначив w = 1/h(0) и q(n) = h(n)/h(n-1), можно получить выражение, определяющее рекурсивный алгоритм противосвертки

$$\hat{f}(k) = wg(k) - \sum_{n=1}^{N-1} q(n)\hat{f}(k-n).$$
(3.18)

Главным недостатком методов противосвертки является усиление высокочастотной шумовой составляющей сигнала. Для уменьшения этого недостатка следует правильно выбирать параметры фильтра.

В данной работе предлагается реализовать описанные выше алгоритмы для одномерного случая (только для *А*-сканов).

#### 3.2 Экспериментальная часть

- 1. Получить у преподавателя файл с экспериментальными сигналами и данные измерений спектра используемого источника излучения.
- 2. Реконструировать из полученных данных А-сканы.
- 3. Реализовать обработку *А*-сканов в системах ОКТ при помощи алгоритма Винера. Оценить качество работы алгоритма при различных отношениях спектральных плотностей мощности шума и

сигнала. Оценить быстродействие алгоритма в случае использования быстрого преобразования Фурье.

- 4. Реализовать обработку А-сканов в системах ОКТ при помощи алгоритма Люси-Ричардсона. Апробировать полученный алгоритм на экспериментальных сигналах. Оценить влияние задаваемого пользователем количества итераций на качество результата и время обработки.
- 5. Реализовать обработку *А*-сканов в системах ОКТ при помощи алгоритма рекурсивной противосвертки. Апробировать полученный алгоритм на экспериментальных сигналах. Оценить быстродействие.
- 6. Провести сравнение качества и скорости обработки данных при помощи каждого из алгоритмов.
- Сделать выводы о применимости описанных методов для обработки данных в системах ОКТ. Оформить отчет, в котором представить полученные результаты обработки экспериментальных сигналов и привести результаты сравнения реализованных алгоритмов.

#### Вопросы для самопроверки

- 1. Как связаны между собой понятия функции рассеяния точки и разрешения?
- 2. Что такое свертка, обратная свертка и противосвертка? Сформулируйте теорему о свертке.
- 3. Сформулируйте причины возникновения шумовой составляющей в сигналах, регистрируемых в системах ОКТ.
- 4. Опишите алгоритм Винера и алгоритм Люси-Ричардсона. Какими преимуществами и недостатками обладает каждый из них?
- Каким может быть критерий останова при использовании алгоритма Люси-Ричардсона? Объясните мотивацию выбора этого критерия.
- 6. Опишите алгоритм рекурсивной противосвертки.
- Какими достоинствами и недостатками по сравнению с алгоритмами Винера и Люси-Ричардсона обладает алгоритм рекурсивной противосвертки?

## Работа 4. Восстановление изображения из цифровой голограммы Френеля

**Цель работы:** провести сравнительное исследование метода Френеля и метода свертки применительно к восстановлению изображения из цифровой голограммы Френеля.

#### Задание по работе

- 1. Изучить теоретическую часть работы.
- 2. Реализовать алгоритм восстановления мнимого изображения объекта из голограммы Френеля.
- 3. Апробировать реализованную программу на модельных и экспериментальных голограммах.
- 4. Провести анализ работы реализованного алгоритмов, оценить его достоинства и недостатки.

#### 4.1 Теоретическая часть

#### Физические принципы формирования голограммы Френеля

При оптической записи или цифровом синтезе голограмм используется принцип Гюйгенса-Френеля, согласно которому исследуемый объект рассматривается как источник вторичных волн, и результирующая волна в точке наблюдения интерферирует с опорной волной. Дифракция световой волны на транспаранте (голограмме) h(x, y), установленном(ой) перпендикулярно падающей опорной волне  $E_R(x, y)$  определяется интегралом Кирхгофа-Френеля

$$\Gamma(\xi',\eta') = \frac{j}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x,y) E_R(x,y) \frac{1}{\rho'} \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\rho'\right) dxdy, \qquad (4.1)$$

где  $\rho' = \sqrt{(x - \xi')^2 + (y - \eta')^2 + d^2}$  – расстояние между точкой в плоскости голограммы и точкой в плоскости реконструкции, d – расстояние между объектом и его голограммой, равное расстоянию между голограммой и изображением объекта,  $\lambda$  – длина волны,  $j = \sqrt{-1}$  – мнимая единица, (x, y) – координаты в плоскости голограммы,  $(\xi, \eta)$  – координаты в плоскости объекта,  $(\xi', \eta')$  – координаты в плоскости изображения объекта (см. рис. 8).



Рис. 8. Системы координат в формуле (4.1)

Фактор наклона (косинус угла) между волновыми фронтами принят равным единице, поскольку наклон отсутствует. Это упрощение применимо для всех вычислительных алгоритмов, рассматриваемых далее.

Опорная волна в (4.1)

$$E_{R}(x, y) = a_{R}(x, y) + j \cdot 0 = a_{R}(x, y)$$
(4.2)

– чисто действительная величина, так как значения фазы одинаковы для всей плоскости (x, y), и без потери общности можно принять значение фазы, равное нулю.

Значения Г, вычисленные по формуле (4.1), принадлежат множеству комплексных чисел, и возможно восстановление интенсивности и фазы с использование известных формул

$$I(\xi',\eta') = |\Gamma(\xi',\eta')|^2,$$
 (4.3)

$$\varphi(\xi',\eta') = \operatorname{arctg}\left(\frac{\operatorname{Im}(\Gamma(\xi',\eta'))}{\operatorname{Re}(\Gamma(\xi',\eta'))}\right).$$
(4.4)

Восстановленное изображение может быть искажено вследствие эффекта переналожения с комплексно-сопряженной опорной волной. Неискаженное изображение может быть получено при использовании для реконструкции комплексно-сопряженной опорной волны, т.е. в уравнении (4.1) необходимо использовать  $E_R^*(x, y)$  вместо  $E_R(x, y)$ :

$$\Gamma(\xi,\eta) = \frac{j}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x,y) E_R^*(x,y) \frac{1}{\rho} \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\rho'\right) dxdy , \qquad (4.5)$$

где  $\rho = \sqrt{(x-\xi)^2 + (y-\eta)^2 + d^2}$ .

Замечание: для плоской опорной волны, заданной в (4.2), формулы (4.1) и (4.5) эквивалентны, поскольку  $E_R = E_R^* \equiv a_R$ .

Схема записи цифровой голограммы с помощью опорной волны, падающей перпендикулярно плоскости регистрации, часто используется в цифровой голографии.

Реконструкция мнимого изображения также возможна при учете в процессе численного анализа голограммы свойств линзы. Простейший случай представлен на рис. 9 (линза расположена непосредственно позади голограммы).



Рис. 9. Реконструкция мнимого изображения

Свойства линзы с фокусным расстоянием *f* учитываются с помощью комплексного множителя:

$$L(x, y) = \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda f}(x^2 + y^2)\right).$$
(4.6)

При единичном увеличении следует использовать соотношение:

$$f = \frac{d}{2}.\tag{4.7}$$

С учетом (4.6) формула для реконструкции изображения из голограммы имеет вид

$$\Gamma(\xi',\eta') = \frac{j}{\lambda} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x,y) E_R(x,y) L(x,y) \frac{1}{\rho'} \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}\rho'\right) dxdy .$$
(4.8)

Таким образом, реконструкция изображений из записанной цифровой голограммы сводится к восстановлению объектной волны, т.е. к восстановлению дифрагированного оптического поля вычислительными методами. Основным выражением для численного восстановления изображений в цифровой голографии в соответствие со скалярной теорией дифракции в параксиальном приближении Френеля является интеграл Релея-Зоммерфельда<sup>3</sup>:

$$\Gamma(\xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda}d\right) \times \\ \times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x, y) E_R(x, y) \exp\left(-j\frac{\pi}{\lambda d}\left[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2\right]\right) dx dy .$$
(4.9)

В рамках скалярной теории дифракции рассматривается только скалярная амплитуда одной компоненты электромагнитного поля и предполагается, что различные компоненты векторов электромагнитного поля можно рассматривать независимо. Скалярная теория дифракции дает точные результаты, если выполняются два условия: объекты (их элементы, на которых дифрагирует свет) имеют размер много больше длины волны излучения и дифрагированные волны наблюдаются вблизи от экрана.

Голограмма Френеля – пропускающая голограмма, при регистрации которой матрица видеокамеры находится в области дифракции Френеля рассеянного объектом излучения. Голограмма образуется благодаря интерференции объектной волны в зоне дифракции Френеля с опорной плоской волной.

Распределение интенсивности в плоскости записи голограммы описывается выражением

$$h(x, y) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}d\right) \times$$
$$\times \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \Gamma(\xi, \eta) \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda d}[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2]\right) d\xi d\eta .$$
(4.10)

Это выражение представляет собой свертку исходного распределения амплитуд в плоскости объекта  $\Gamma(\xi,\eta)$  и квадратичной фазовой функции пространственного распространения волны

$$w(x, y) = \exp\left(j\frac{\pi}{\lambda d}(x^2 + y^2)\right).$$
(4.11)

Таким образом (4.1) принимает вид

$$h(x, y) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}d\right) [\Gamma(\xi, \eta) \otimes w(x, y)].$$
(4.12)

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Вывод формулы см. в книге Дж. Гудмен «Введение в Фурье-оптику». – М.: Мир, 1970. С. 54-69.

и описывает процесс записи (синтеза) голограмм Френеля.

В формуле (4.12) не учитывается угол между опорной и объектной волной, то есть синтезируется осевая голограмма.

#### Метод свертки

В основе метода свертки лежит теорема о свертке. При использовании метода свертки реконструируемая волна определяется как свертка произведения опорной волны R(x, y) на функцию цифровой голограммы h(x, y) с функцией импульсной отклика оптической системы  $g(\xi, \eta, x, y)$ :

$$Q(\xi,\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x,y) h(x,y) g(\xi,\eta,x,y) dxdy, \qquad (4.13)$$

где

$$g(\xi, \eta, x, y) = \frac{j}{\lambda} \frac{\exp\left[(-j2\pi/\lambda)\sqrt{d^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}\right]}{\sqrt{d^2 + (x-\xi)^2 + (y-\eta)^2}} \,.$$
(4.14)

Выражение (4.14) соответствует пространственно-инвариантной линейной системе,  $g(\xi, \eta, x, y) = g(\xi - x, \eta - y)$ , поэтому по теореме о свертке

$$\Im[(Rh\otimes g)] = \Im[Rh]\Im[g], \tag{4.15}$$

где  $\Im[\cdot]$  – оператор преобразования Фурье,  $\otimes$  – оператор свертки.

В дискретной форме выражение (4.14) принимает вид:

$$g(k,l) = \frac{j}{\lambda} \frac{\exp\left(\frac{-j2\pi}{\lambda}\sqrt{d^2 + (k - N/2)^2 \Delta x^2 + (l - N/2)^2 \Delta y^2}\right)}{\sqrt{d^2 + (k - N/2)^2 \Delta x^2 + (l - N/2)^2 \Delta y^2}}, (4.16)$$

где N – количество пикселей матрицы видеокамеры вдоль оси x, k = 0, 1, ..., K - 1, l = 0, 1, ..., L - 1 – дискретные координаты в частотной области.

Отметим, что сдвиг координат на N/2 обусловлен условием симметрии спектра. В более простой форме реконструкция изображения методом свертки может быть записана в виде:

$$Q(n,m) = \mathfrak{I}^{-1} \{ \mathfrak{I}[R(n,m) h(n,m)] \mathfrak{I}(g(k,l)) \}, \qquad (4.17)$$

где  $\mathfrak{T}^{-1}$  – обратное преобразование Фурье, m = 0, 1, ..., N - 1, n = 0, 1, ..., N - 1 – дискретные координаты в пространственной области. Можно показать, что преобразование Фурье от функции g(k,l) можно выразить как

$$\Im(g(k,l)) = e^{-j\frac{2\pi d}{\lambda}\sqrt{1 - \frac{\lambda^2 \left(n + \frac{N^2 \Delta x^2}{2d\lambda}\right)^2}{N^2 \Delta x^2} - \frac{\lambda^2 \left(m + \frac{N^2 \Delta y^2}{2d\lambda}\right)^2}{N^2 \Delta y^2}}}.$$
(4.18)

При использовании метода свертки размер пикселя восстановленного изображения всегда будет совпадать с размером пикселя голограммы (матрицы видеокамеры):

$$\Delta \xi = \Delta x, \quad \Delta \eta = \Delta y . \tag{4.19}$$

что отличает данный метод от метода преобразования Френеля.

#### Метод Френеля

В ЦГ метод Френеля является одним из наиболее широко используемых методов реконструкции в силу его вычислительной эффективности.

Для численной реконструкции изображений из цифровых голограмм используется дифракционная формула Френеля. Информация о трехмерной структуре объекта может быть восстановлена при различных расстояниях между плоскостью голограммы и плоскостью наблюдения.

Реконструированная объектная волна в приближении Френеля может быть описана выражением:

$$Q(\xi,\eta) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}d\right) \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda d}\left(\xi^2 + \eta^2\right)\right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x,y) h(x,y) \times \frac{1}{j\lambda d} \left(\xi^2 + \eta^2\right) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x,y) h(x,y) + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\lambda d} \left(\xi^2 + \eta^2\right) \right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x,y) h(x,y) \times \frac{1}{j\lambda d} \left(\xi^2 + \eta^2\right) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x,y) h(x,y) + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\lambda d} \left(\xi^2 + \eta^2\right) \left(\xi^2 + \eta^2\right) \right] \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R(x,y) h(x,y) + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{j\lambda d} \left(\xi^2 + \eta^2\right) \left(\xi^2 + \eta^$$

$$\times \exp\left[-j\frac{\pi}{\lambda d}(x^2+y^2)\right] \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda d}(x\xi+y\eta)\right] dxdy .$$
(4.20)

Выражение (4.20) получило название «приближение Френеля» или «преобразование Френеля», которое позволяет произвести реконструкцию волнового поля в плоскости мнимого изображения. Преобразование Френеля используется для расчета поля в зоне дифракции Френеля.

Уравнение (4.20) может быть переписано с использованием преобразования Фурье:

$$Q(\xi, \eta) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}d\right) \exp\left[j\pi\lambda d\left[(\xi - x)^2 + (\eta - y)^2\right]\right] \times \Im[R(x, y)h(x, y)w(x, y)].$$
(4.21)

Для внеосевой схемы нулевой порядок дифракции, +1 и –1 порядки будут пространственно разнесены. Нулевой порядок окажется в центре, а +1 и –1 порядки симметрично смещены.

Точное восстановление распределений как амплитуды, так и фазы объектной волны достигается только при условии соблюдения ограничения на расстояние *d*, которое определяется условием

$$d \ge d_c = \frac{N\Delta x}{\lambda}.\tag{4.22}$$

При равенстве *d* и *d<sub>c</sub>* размер пикселя восстановленного изображения равен размеру пикселя голограммы.

Будем полагать, что плоскость цифровой голограммы задается конечными размерами матрицы видеокамеры, содержащей  $N \times N$  элементов с шагом дискретизации  $\Delta x$  и  $\Delta y$  вдоль соответствующих направлений x и y, а плоскость восстановленного изображения определяется таким же количеством элементов, но с шагами дискретизации  $\Delta \xi$  и  $\Delta \eta$  (предполагается, что пиксели расположены без зазоров, тогда шаг дискретизации равен размеру пикселя).

В дискретном виде выражение (4.20) принимает форму

$$Q(n,m) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda}d\right) \exp\left[j\pi\lambda d\left(\frac{m^2}{N^2\Delta x^2} + \frac{n^2}{N^2\Delta y^2}\right)\right] \times \\ \times \sum_{k=0}^{N-1} \sum_{l=0}^{N-1} R(k,l)h(k,l)e^{-\frac{j\pi}{\lambda d}(k^2\Delta x^2 + l^2\Delta y^2)}e^{-j2\pi\left(\frac{km}{N} + \frac{\ln}{N}\right)}.$$
(4.23)

Выражение (4.23) позволяет получить информацию о комплексном поле объектной волны, содержащим информацию об исследуемом объекте. При этом оценка размеров пикселя восстановленного изображения определяется в виде:

$$\Delta \xi = \frac{\lambda d}{N \Delta x},\tag{4.24}$$

$$\Delta \eta = \frac{\lambda d}{N \Delta y} \,. \tag{4.25}$$

Из выражений (4.24)–(4.25) видно, что размеры пикселей восстановленного изображения ( $\Delta\xi$  и  $\Delta\eta$ ) в общем случае не равны размерам пикселей исходной голограммы ( $\Delta\xi$  и  $\Delta\eta$ ), а зависят от выбранного для реконструкции расстояния *d*, а также обратно пропорциональны апертуре оптической системы. Представленные оценки полностью соответствуют положениям теории дифракции, которые устанавливают зависимость дифракционной картины на расстоянии *d* (диаметра диска Эйри). Разрешение получаемого изображения по амплитуде или фазе зависит от дифракционных ограничений, вносимых отображающей системой в соответствии с «автоматическим» масштабированием в преобразовании Френеля.

Следует отметить, что применение метода Френеля не накладывает ограничения на максимальное расстояние между объектом и плоскостью регистрации, что позволяет использовать его в задачах исследования объектов различного геометрического масштаба.

#### 4.2 Экспериментальная часть

- 1. Получить у преподавателя файл с модельной и экспериментальной голограммой Френеля, а также параметры их записи (длины волн, расстояния и т.д.).
- 2. Реализовать алгоритмы восстановления комплексного мнимого изображения объекта из голограммы с использованием метода Френеля и метода свертки.
- 3. Применить разработанные программы к полученным голограммам, оценить результат восстановления комплексного поля объектной волны при различных параметрах алгоритма.
- 4. Провести сравнение качества и скорости обработки данных при помощи каждого из алгоритмов.
- Сделать выводы о применимости описанных методов для обработки данных в системах ЦГ. Оформить отчет, в котором представить полученные результаты обработки модельных и экспериментальных голограмм и привести результаты сравнения реализованных алгоритмов.

#### Вопросы для самопроверки

- 1. Что описывает интеграл Релея-Зоммерфельда и при каких условиях его можно использовать?
- 2. Что такое голограмма Френеля?
- 3. В чем состоят особенности использования опорной волны с плоским и неплоским волновым фронтом?
- 4. Как можно учесть наличие линзы при формировании голограммы?
- 5. В чем состоят особенности метода свертки и метода Френеля при восстановлении комплексного поля объектной волны из голограммы? Проведите сравнительный анализ этих методов.

6. Проведите сравнительную оценку вычислительной сложности метода свертки и метода Френеля.

## Работа 5. Методы автофокусировки в цифровой голографии

**Цель работы:** ознакомиться с методами выбора оптимального расстояния между голограммой и объектом при цифровой реконструкции изображений из голограмм Френеля и сформировать навыки выбора параметров алгоритмов синтеза и анализа цифровых голограмм.

#### Задание по работе

- 1. Изучить теоретическую часть работы.
- 2. Выполнить синтез голограммы и восстановление из него изображения с различными входными параметрами, оценить влияние входных параметров на качество работы алгоритмов.
- Исследовать различные методы оптимизации расстояния (автофокусировки) при восстановлении изображения из цифровой голограммы, провести их сравнительный анализ.

#### 5.1 Теоретическая часть

#### <u>Выбор расстояния между голограммой и объектом при обработке</u> <u>цифровых голограмм</u>

Комплексное поле может быть представлено через преобразование Фурье от произведения опорной волны R(x, y), голограммы h(x, y)и квадратичной фазовой функции пространственного распространения волны w(x, y):

$$Q(\xi, \eta) = \Im [R(x, y)h(x, y)w(x, y)].$$
(5.1)

Пояснения к используемым в (5.1) координатам приведены на рис. 8 в настоящем пособии.

Выражение (5.1) позволяет вычислить комплексное поле  $Q(\xi, \eta)$  на расстоянии d от плоскости голограммы, и затем найти интенсивность  $I(\xi, \eta)$  и фазу  $\varphi(\xi, \eta)$  восстановленного изображения с помощью (4.3)–(4.4). При этом точное восстановление как амплитуды, так и фазы комплексного поля  $Q(\xi, \eta)$  достигается только при условии соблюдения ограничения на расстояние d:

$$d \ge d_c = \frac{N\Delta x}{\lambda}, \tag{5.2}$$

где N – линейный размер матрицы видеокамеры (в пикселях) с шагом дискретизации  $\Delta x$ ,  $\lambda$  – длина волны, на которой была записана голограмма.

Расстояние между пикселями в реконструированном изображении  $\Delta \xi$  и  $\Delta \eta$  также зависит от расстояния *d*, поскольку оно входит в выражение, определяющее дифракционный предел разрешения оптической системы (голограмма определяет апертуру оптической системы

с размером стороны  $N\Delta x$ ). Величина  $\Delta \xi = \frac{\lambda d}{N\Delta x}$  определяет половину

диаметра диска Эйри в плоскости реконструированного изображения.

Важно отметить, что используемое при реконструкции изображения расстояние d влияет на фокусировку восстановленного изображения. Требуется выбирать расстояние d так, чтобы восстановленное изображение было сфокусированным. На практике параметры записи голограммы не всегда известны точно, поэтому расстояние d можно выбрать согласно условию

$$d_0 = \arg\max_d \sigma^2(d) , \qquad (5.3)$$

где  $\sigma^2$  – функция, позволяющая судить о степени фокусировки восстановленного изображения. Существует несколько способов выбора функции  $\sigma^2$ . Первый из них – определение  $\sigma^2$  на основе энергетического спектра изображения. Второй – на основе функции дисперсии яркости. Третий – на основе автокорреляционной функции.

Энергетический спектр количественно характеризует четкость краев по наличию в нем высокочастотной составляющей в спектре. Так как сфокусированное изображение имеет больше четких деталей, чем не сфокусированное, эта функция применяется для оценки качества фокусировки. Ниже приведена формула для вычисления  $\sigma^2$  на основе логарифма взвешенного Фурье-преобразования:

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{MN} \sum_{\xi=0}^{M-1} \sum_{\eta=0}^{N-1} \log[1 + \Im(I(\xi, \eta))], \qquad (5.4)$$

где  $I(\xi,\eta)$  – интенсивность пикселей восстановленного изображения размером  $M \times N$ . Координаты соответствуют введенным на рис. 8 настоящего пособия.

Способ, использующий дисперсию яркости восстановленного изображения, основан на статистическом анализе значений яркости в восстановленном изображении согласно формуле

$$\sigma_2^2 = \frac{1}{MN} \sum_{\xi=0}^{M-1N-1} [I(\xi, \eta) - \langle I \rangle]^2 , \qquad (5.5)$$

где <*I* > обозначает среднюю интенсивность пикселей изображения, которая рассчитывается по формуле

$$= \frac{1}{MN} \sum_{\xi=0}^{M-1} \sum_{\eta=0}^{N-1} I(\xi,\eta).$$
 (5.6)

В третьем способе задействована автокорреляционная функция, что позволяет отличить сфокусированное восстановленное изображение от несфокусированного. В этом случае формула для  $\sigma^2$  имеет вид

$$\sigma_3^2 = \frac{1}{MN} \sum_{\xi=0}^{M-1} \sum_{\eta=0}^{N-1} I(\xi+1,\eta+1)I(\xi,\eta) - MN < I >^2.$$
(5.7)

#### Описание программы для восстановления цифровых голограмм

Для исследования влияния параметров, используемых при восстановлении изображения, на его качество в работе предлагается использовать программу Holography. Ниже приведено описание интерфейса программы.

Программа Holography является кроссплатформенным приложением, которое позволяет синтезировать голограмму объекта с заданными параметрами и восстановить из синтезированной голограммы изображение. Окно программы состоит из четырех вкладок: «Параметры» (включает параметры, используемые при синтезе голограммы и восстановлении изображения), «Исходное изображение», «Голограмма» и «Восстановленное изображение», содержащие указанные изображения, соответственно. Синтез голограммы и восстановление изображения осуществляются с помощью кнопки «Построить». После окончания работы программы во вкладке «Параметры» выводится коэффициент корреляции исходного и восстановленного изображений, позволяющий оценить качество реконструкции исходного изображения.

На рис. 10 приведен пример окна программы с открытой вкладной «Параметры» и изображения, полученные в остальных вкладках.

MainWindo	w —		>
		Постро	ИТЕ
Параметры	Исходное изображение Голограмма Восстановленное изображение		
Исходная	C:\\123.bmp		
	Параметры голограммы		
L 632,00	* 10^(-9)		
a 6,00 🜲	* 10^(-6)		
d 0,058000000	•		
	Параметры восстановленного изображения		
632,00	* 10^(-9)	Коэффици корелляц 0.976623	иен ции
a 6,00	* 10^(-6)		
a  0,058000000	÷		



Рис. 10. Графический интерфейс пользователя программы Holography с примерами исходного изображения, синтезированной голограммы Френеля и реконструированного из нее изображения

#### 5.2 Экспериментальная часть

- 1. Выбрать файл с исходным изображением, принимая во внимание следующие рекомендации:
  - для однозначности трактовки результатов целесообразно выбирать монохромный файл (имеющий только черный и белый цвет); использование полутоновых или цветных изображений возможно, однако потребует дополнения алгоритма обработки, что в данной лабораторной работе не предусматривается;

- изображения должны иметь на краях либо только черный, либо только белый цвет (см. пример на рис. 10);
- изображения должны быть в любом растровом формате без сжатия (рекомендуются форматы BMP, PNG и TIFF);
- изображение не следует выбирать как слишком большим (это замедлит расчеты и усложнит его визуализацию), так и слишком маленьким (элементов изображения должно быть достаточно для соответствующих пространственночастотных преобразований); рекомендуемые линейные размеры изображения 128, 256, 512 и 1024 пикселя.
- Задать параметры алгоритмов синтеза голограммы и восстановления изображения; варьируя параметры, добиться восстановления изображения с близким к единице коэффициентом корреляции с исходным изображением. Замечание: все параметры вводятся в единицах системы СИ.
- 3. Варьируя расстояния *d* в алгоритме восстановления изображений, исследовать влияние этого параметра на качество восстановленного изображения (по коэффициенту корреляции). Полученный результат визуализировать в виде графика.
- Варьируя расстояния *d* в алгоритме восстановления изображений, рассчитать параметр σ<sup>2</sup> с помощью формул (5.4)–(5.7) и оптимизировать его по критерию (5.3). Результаты отобразить графически.
- 5. Сделать выводы о применимости предложенных в лабораторной работе методов автофокусировки в системах ЦГ. Оформить отчет.

#### Вопросы для самопроверки

- 1. Чем определяется выбор расстояния между объектом и плоскостью регистрации голограммы? На какие параметры восстановленного из голограммы изображения он влияет?
- 2. Как связано разрешение реконструированного изображения с расстоянием между голограммой и объектом?
- 3. Какие известны методы оптимизации расстояния *d* (автофокусировки) в ЦГ?
- 4. Какие параметры при синтезе цифровой голограммы наиболее важны для точного восстановления изображения из цифровой голограммы?
- Почему при синтезе голограммы с определенными параметра и последующем восстановлении из него изображения объекта с теми же параметрами не удается добиться полной корреляции (ко-

эффициент корреляции не равен 1) восстановленного изображения с исходным?

#### Работа 6. Методы голографической записи для защиты изображений

Цель работы: исследование методов скрытой записи дополнительных данных в изображения и факторов, влияющих на качество дешифровки дополнительных данных.

#### Задание по работе

- Изучить теоретическую часть работы. 1.
- 2. Синтезировать голограмму с дополнительными данными и произвести ее встраивание в изображение в оттенках серого и в цветное изображение.
- Исследовать влияние различных преобразований изображения с 3. дополнительными данными (сжатие, обрезка краев и т.п.) на качество дешифровки дополнительных данных.

#### 6.1 Теоретическая часть

#### Методы скрытой записи дополнительных данных

Дополнительная информация может быть включена в изображения, восстановленные из голограммы без внесения заметных искажений в эти изображения. Кодирование дополнительных данных можно осуществлять в форме синтезированной голограммы. Синтез голограмм осуществляется с помощью вычисления распределения интенсивности в плоскости регистрации голограммы, например, методом Френеля.

Известно, что в спектре большинства реальных изображений амплитуды низкочастотных составляющих значительно превышают амплитуды остальных составляющих, что может приводить к искажениям изображения-приемника при записи в него дополнительных данных. При записи голограммы эта проблема решается добавлением в схему рассеивающего элемента между объектом и плоскостью записи голограммы, при этом происходит рассеяние объектного пучка. В случае ЦГ оригинальное изображение умножается на произвольный фазовый множитель  $\mu(x, y)$ , который выравнивает амплитуды в спектре. Фазовый множитель  $\mu(x, y)$  можно вычислить как

$$\mu(x, y) = \exp(j\phi(x, y)),$$

$$(x, y) = \exp(j\phi(x, y)), \qquad (6.1)$$

где  $\phi(x, y)$  – случайная фаза.

В работе изучается метод записи дополнительных данных в виде синтезированных на компьютере голограмм Френеля, совпадающих по размеру с изображением-приемником, в частотной области с предварительным уменьшением динамического диапазона голограммы.

Выбор размера исходного объекта, голограмма которого синтезируется, зависит от распределения коэффициентов Фурье в спектре изображения-приемника, т.е. при восстановлении дополнительных данных изображение объекта должно располагаться в области низких частот спектра. По этой причине был выбран размер типичных встраиваемых изображений, равный *N*/4, где *N* – линейный размер изображения-приемника.

Для того чтобы голограмма дополнительных данных совпадала по размеру с изображением-приемником, перед синтезом встраиваемый объект окружается нулями до размера, совпадающего с размером изображения-приемника.

Запись дополнительных данных в изображение-приемник g(x, y) осуществляется в частотной области. Для этого выполняется преобразование Фурье исходного изображения и складывается со спектром голограммы дополнительных данных. После этого выполняется обратное преобразование Фурье. Для уменьшения искажений, вызываемых записью дополнительных данных, перед сложением выполняется уменьшение динамического диапазона спектра голограммы. Аналитически этот процесс можно описать выражением:

$$s(x, y) = \mathfrak{I}^{-1} \{ \mathfrak{I}\{a(x, y)\} + k \mathfrak{I}\{h(x, y)\} \},$$
(6.2)

где s(x, y) – результирующее изображение с внедренными дополнительными данными, k – коэффициент от 0 до 1, a(x, y) – распределение амплитуд в исходном объекте.

Для восстановления дополнительных данных из изображения необходимо сделать преобразование Фурье этого изображения. Поскольку изображение, восстановленное из голограммы, может быть цветным, вышеописанный метод встраивания дополнительных данных может быть модифицирован применительно к цветным изображениям.

Далее рассмотрим процессы записи и восстановления дополнительных данных на основе голограммы Френеля.

В данной лабораторной работе метод записи дополнительных данных осуществляется при использовании цветового пространства HSI. Для перехода в цветовое пространство HSI необходимо выполнить перевод координат (R, G, B) в координаты (H, S, I) по следующим правилам:

$$H = \begin{cases} \theta, \ B \le G \\ 360^{\circ} - \theta, \ B > G \end{cases}, \tag{6.3}$$

где 
$$\theta = \arccos\left(\frac{(R-G) + (R-B)}{2\sqrt{(R-G)^2 + (R-B)(G-B)}}\right),$$
  
 $S = 1 - \frac{3}{R+G+B}\min(R,G,B),$  (6.4)

$$I = \frac{R+G+B}{3} \,. \tag{6.5}$$

Координаты (R, G, B) должны находиться в нормированном диапазоне [0; 1].

Дополнительные данные встраиваются в канал яркости *I*. Далее выполняется обратный переход в цветовое пространство RGB. Переход в пространство RGB из пространства HSI осуществляется по следующим формулам:

$$R = \begin{cases} I[1 + S\cos H / \cos(60^{\circ} - H)], \ H \in [0, 120^{\circ}) \\ I(1 - S), \ H \in [120^{\circ}, 240^{\circ}) \\ 3I - G + B, \ H \in [240^{\circ}, 360^{\circ}) \end{cases}$$

$$G = \begin{cases} 3I - R + B, \ H \in [0, 120^{\circ}) \\ I[1 - S\cos(H - 120^{\circ}) / \cos(H)], \ H \in [120^{\circ}, 240^{\circ}), \\ I(1 - S), \ H \in [240^{\circ}, 360^{\circ}) \end{cases}$$

$$B = \begin{cases} I(1 - S), \ H \in [0, 120^{\circ}) \\ 3I - R + B, \ H \in [120^{\circ}, 240^{\circ}) \\ 3I - R + B, \ H \in [120^{\circ}, 240^{\circ}) \\ I[1 + S\cos(H - 240^{\circ}) / \cos(300^{\circ} - H)], \ H \in [240^{\circ}, 360^{\circ}) \end{cases}$$
(6.8)

Схематически алгоритм встраивания дополнительных данных в изображения в оттенках серого и в цветные изображения представлен на рис. 11.



Рис. 11. Схема методов записи дополнительных данных в изображения в оттенках серого (а) и в цветные изображения (б)

#### <u>Описание алгоритма синтеза голограммы и дешифровки скрытых</u> <u>дополнительных данных</u>

Входными данными для алгоритма синтеза голограммы является полутоновое или монохромное изображение дополнительных данных  $u_0$  размером  $X \times Y$ , длина волны  $\lambda$ , линейный размер пикселя видеокамеры a и расстояние d между изображением-транспарантом и голограммой, которое выбирается по критерию

$$d \ge d_c = \max(X, Y) \frac{2a^2}{\lambda} .$$
(6.9)

Синтез голограммы Френеля h осуществляется по формуле  $h = \Im^{-1}{\{\Im(u_0)\Im(f)\}},$  (6.10)

где

$$f(x,y) = \frac{1}{j\lambda d} \exp\left(\frac{2\pi j}{\lambda}\right) \exp\left[\frac{j\pi a^2}{\lambda d} \left(\left(x - \frac{X}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{Y}{2}\right)^2\right)\right].$$
 (6.11)

Если реализация преобразования Фурье предусматривает расположение низких частот по краям изображения, то нужно осуществить перестановку четвертей изображения так, чтобы низкие частоты оказались в центре.

В качестве финального результата – голограммы дополнительных данных – удобно использовать нормализованный модуль *h*.

Пусть после встраивания дополнительных данных в изображение получилось изображение *s*. Для устранения граничных эффектов это изображение целесообразно окружить нулевыми значениями так, чтобы размер изображения увеличился в 4 раза. Извлечение дополнительных данных *u* осуществляется по формуле

$$u = \frac{j}{\lambda d} \exp\left(-\frac{j2\pi}{\lambda}d\right) W \mathfrak{I}^{-1}\{sW\}, \qquad (6.12)$$

где

$$W(x, y) = \exp\left[-j\frac{2\pi a^2}{\lambda d}\left[\left(x - \frac{X}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{Y}{2}\right)^2\right]\right].$$
(6.13)

После вычисления (6.13), как и в алгоритме синтеза, целесообразно использовать нормализованный модуль W и, при необходимости, выполнить перестановку четвертей изображения так, чтобы нижние частоты оказались в центре изображения. В результате окружения исходного изображения нулевыми значениями полезная составляющая восстановленных дополнительных данных будет локализована в левой верхней четверти полученного изображения. Для получения финального результата, остальные четверти следует удалить.

#### 6.2 Экспериментальная часть

- 1. Выбрать файл с дополнительными данными, а также полутоновое и цветное изображения, в которые будут встраиваться дополнительные данные.
- 2. Осуществить синтез голограммы дополнительных данных.
- 3. Осуществить встраивание синтезированной голограммы в выбранные полутоновое и цветное изображения.
- 4. Осуществить извлечение дополнительных данных и оценить их качество с помощью расчета коэффициента корреляции исходных и реконструированных дополнительных данных.

- 5. Исследовать зависимость качества восстановления дополнительных данных от степени сжатия изображения в стандарте JPEG со скрытыми дополнительными данными.
- Исследовать зависимость качества восстановления дополнительных данных от степени затемнения изображения со скрытыми дополнительными данными.
- 7. Исследовать устойчивость дополнительных данных к влиянию шума в изображении со скрытыми дополнительными данными.
- 8. Оформить отчет, в котором представить все полученные результаты графически.

#### Вопросы для самопроверки

- 1. Для чего при записи дополнительных данных осуществляется переход в цветовое пространство HSI?
- 2. Как влияет на запись/синтез голограммы дополнительный случайный фазовый множитель?
- 3. Для чего осуществляется окружение нулями изображения при реконструкции из него дополнительных данных.
- 4. Чем обусловлен критерий выбора расстояния между голограммой и изображением с дополнительными данными?
- 5. Что происходит с голограммой при JPEG-сжатии и как эта процедура сжатия влияет на качество восстановленного изображения?

#### Список литературы

- Волынский М.А., Гуров И.П. Анализ изображений в оптической когерентной томографии. Учебно-методическое пособие по лабораторным работам. – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 32 с.
- Гуров И.П. Формирование и анализ сигналов в системах компьютерной фотоники: Учебно-методическое пособие. – СПб: Университет ИТМО, 2018. – 108 с.
- Волынский М.А., Гуров И.П., Ермолаев П.А. Методы компьютерной фотоники. Учебно-методическое пособие по практическим работам. – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 54 с.
- Гендин В.Г. Формирование и анализ параметров когерентных световых полей методами цифровой голографии для бесконтактного контроля объектов : диссертация ... канд. техн. наук : 05.11.07 / СПб НИУ ИТМО. – Санкт-Петербург, 2013. – 113 с.
- Тучин В.В. Оптика биологических тканей. Методы рассеяния света в медицинской диагностике / Перевод с англ. под ред. В.В. Тучина. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2013. – 812 с.
- Рябухо В.П., Тучин В.В. Когерентно-оптические методы в измерительной технике и биофотонике. Саратов: Сателлит, 2009. 127 с.
- Fercher A.F., Drexler W., Hitzenberger C.K., Lasser T. Optical coherence tomography – principles and applications // Rep. Prog. Phys., 2003. V. 66. P. 239–303.
- 8. Bouma B. Handbook of Optical Coherence Tomography. NY: Taylor & Francis, 2001. 756 p.
- 9. Drexler W., Fujimoto J.G. Optical Coherence Tomography: Technology and Applications. NY: Springer, 2011. 1376 p.
- 10. Brezinski M.E. Optical Coherence Tomography: Principles and Applications. – NY: Academic Press, 2006. – 480 p.
- Tuchin V. Handbook of Coherent Domain Optical Methods: Biomedical Diagnostics, Environmental and Material Science. – Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004. – 1003 p.
- Schmitt J.M. Optical coherence tomography (OCT): a review // IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 1999. No. 5. P. 1205–1215.
- Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
- Yiheng L., Yanmei L., Guoguang M., Xiaonong Z. Deconvolution methods for image deblurring in optical coherence tomography // JOSA A, 2009. V. 26. No. 1. P. 72–77.

- 15. Kim M.K. Principles and techniques of digital holographic microscopy // SPIE Rev, 2010. V. 1. P. 018005-1-50.
- Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С. Цифровая голография. М.: Наука, 1982. 219 с.
- Ярославский Л.П. Цифровая обработка сигналов в оптике и голографии: Введение в цифровую оптику. – М.: Радио и связь, 1987. 296 с.
- Балтийский С.А., Гуров И.П., Де Никола С., Коппола Д., Ферраро П. Современные методы цифровой голографии /В кн.: Проблемы когерентной и нелинейной оптики / Под ред. И.П. Гурова и С.А. Козлова, СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. 91-117 с.
- 19. Schnars U., Jüptner W. Digital holography-digital hologram recording, numerical reconstruction and related techniques. New York: Springer, 2005.
- 20. Kim T., Poon T.C. Autofocusing in optical scanning holography // Applied Optics, 2009. V. 48. Issue 34. P. H153-H159.

### Приложение. Пример оформления отчета по лабораторной работе

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики Факультет Прикладной оптики

Дисциплина: Анализ изображений в оптической когерентной томографии и цифровой голографии

### Отчет

по лабораторной работе №\_\_\_ Название лабораторной работы

> Студент: Иванов И.И. Группа: В4352 Преподаватель: Петров П.П.

Санкт-Петербург 2019 **Цель работы**: изучение правил оформления отчетов по лабораторным работам в рамках дисциплины «Анализ изображений в оптической когерентной томографии и цифровой голографии».

#### Задачи, решаемые в работе:

- 1. Изучение структуры отчета по лабораторной работе.
- 2. Ознакомление с правилами оформления формул, рисунков и таблиц.
- 3. Задача 3.

•••

#### Теоретическая часть

Структура отчета по лабораторной работе

Отчет по лабораторной работе должен содержать цель и список задач, решаемых в работе. При защите работы от студента требуется умение ясно изложить цель работы и описать задачи, решение которых приведет к ее достижению.

Теоретическая часть содержит сведения о предметной области, к которой относится работа, методах, алгоритмах, используемых при ее выполнении. Эта часть включается в текст работы по желанию студента. Если в теоретической части содержатся формулы, таблицы или рисунки, то они должны быть оформлены в соответствии с правилами, рассмотренными ниже.

В отчете обязательно должна содержаться экспериментальная или практическая часть, в которой должны быть отражены личные результаты студента, полученные им при выполнении работы. К таким результатам можно отнести графики, таблицы и изображения, полученные студентом в ходе выполнения моделирования или обработки данных в соответствии с задачами, поставленными в работе. Исходные данные, использованные студентом для апробации реализованных в ходе практической работы методов, также должны быть представлены в экспериментальной части.

В описании экспериментальной части должны содержаться пояснения, в том числе краткие выводы по промежуточным результатам работы. При необходимости можно привести пояснения к использованным студентом методам и алгоритмам.

В конце отчета студент должен привести список использованной при составлении отчета и цитируемой литературы.

Текст отчета по лабораторной работе может быть использован студентом в процессе защиты.

#### Экспериментальная часть

#### Правила оформления текста

Отчет следует оформлять на бумаге формата A4. Поля могут быть выбраны произвольно, например, 25 мм по четырем сторонам листа. Рекомендуется при оформлении отчета использовать шрифт Times New Roman размера 14 и полуторный интервал между строками. Обязательным требованием при оформлении текста является его выравнивание по ширине.

На рисунках в отчете могут быть представлены схемы, графики, изображения, модели исследуемых объектов и другая графическая информация. Ниже представлен пример оформления рисунка.



Рис. 1. Пример оформления рисунка

Координатные оси на графиках должны быть снабжены подписями.

Для наглядного оформления результатов моделирования и расчетов следует использовать таблицы. Ниже представлен пример оформления таблицы.

Количество	Время работы	Время работы	Время работы
отчетов в сиг-	алгоритма 1, с	алгоритма 2, с	алгоритма 3, с
нале			
100	0,1	0,1	0,1

Таблина	<ol> <li>Π</li> </ol>	ример	odo	омления	таблины
тиолици	1.11	primep	σφυ	prostorium	таолицы

200	0,2	0,4	0,1
300	0,3	0,9	0,2

На рисунки и таблицы обязательно должны присутствовать ссылки в тексте. Например "На рис. 1 изображен график зависимости ..." или "В табл. 2 приведены результаты экспериментальной оценки времени работы алгоритмов ...". Таблицы и рисунки должны быть снабжены подписями, отражающими их содержание.

#### Выводы

В выводах необходимо кратко пояснить полученные студентом в ходе практической работы результаты и следующие из них заключения, а также определить, достигнута ли поставленная в работе цель.

Ниже приведен пример вывода по лабораторной работе:

"В ходе лабораторной работы было проведено восстановление цветовой составляющей искусственной сцены по набору карт спектральной отражательной способности объектов этой сцены, исследованы представления цветов в цветовых пространствах CIE XYZ, RGB и Lab.

Показано, что при переводе из пространства XYZ в пространство RGB в области изображения могут наблюдаться так называемые метамерные цвета, то есть цвета, которые при количественном описании отличаются друг от друга, но воспринимаются человеческим глазом одинаково. Графики спектральной отражательной способности участков с такими цветами представлены в экспериментальной части настоящего отчета.

Для оценки различия между цветами на изображениях, полученных для разных типов источников излучения, было вычислено евклидово расстояние между точками, соответствующими этим цветам в пространствах RGB и Lab. Показано, что в пространстве RGB величина расстояния между этими точками может быть достаточно велика. В пространстве Lab незначительные различия между цветами соответствуют малому расстоянию между точками, характеризующими эти цвета, ввиду того, что в качестве координатных осей в пространстве Lab используются насыщенность, оттенок и яркость определенного цвета, а не "количество" того или иного цветового компонента в нем." Волынский Максим Александрович Гуров Игорь Петрович Маргарянц Никита Борисович

#### ФОРМИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКОЙ КОГЕРЕНТНОЙ ТОМОГРАФИИ И ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

Учебно-методическое пособие

В авторской редакции Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО Зав. РИО Н.Ф. Гусарова Подписано к печати Заказ № Тираж Отпечатано на ризографе

#### Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49