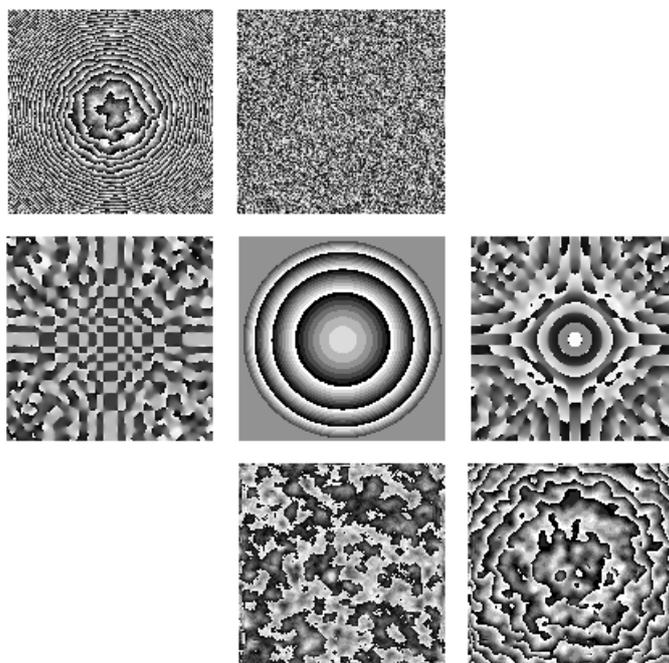


Н.В. Петров, И.А. Шевкунов, О.В. Андреева,  
Б.Г. Манухин, А.А. Дроздов

# ОСНОВЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ

Методические материалы  
к лабораторному практикуму  
«Методы цифровой голографии  
для задач оптоинформатики»



Санкт-Петербург  
2015

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Н.В. Петров, И.А. Шевкунов, О.В. Андреева,  
Б.Г. Манухин, А.А. Дроздов

# ОСНОВЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ

Методические материалы  
к лабораторному практикуму  
«Методы цифровой голографии  
для задач оптоинформатики»

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2014

Н.В. Петров, И.А. Шевкунов, О.В. Андреева, Б.Г. Манухин, А.А. Дроздов, Основы оптоинформатики. Методические материалы к лабораторному практикуму «Методы цифровой голографии для задач оптоинформатики». – СПб: Университет ИТМО, 2014. – 51 с.

В пособии представлены учебно-методические материалы лабораторного практикума по дисциплине «Основы оптоинформатики». Даны описания лабораторных работ с кратким изложением теоретического материала.

Предназначено для бакалавров и магистров, обучающихся по направлению подготовки 200700 «Фотоника и оптоинформатика».

Рекомендовано к печати ученым советом факультета фотоники и оптоинформатики, протокол №8 от 28.11.2014 г.



**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, 2014

© Н.В. Петров, И.А. Шевкунов, О.В. Андреева, Б.Г. Манухин,  
А.А. Дроздов, 2014

## Содержание

1	Введение .....	4
2	Лабораторная работа №1 Распространение и преобразование волновых фронтов .....	6
3	Лабораторная работа №2 Основы внеосевой цифровой голографии .....	22
4	Лабораторная работа №3 Визуализация фазовых неоднородностей прозрачных объектов методом цифровой голографической интерферометрии .....	33
4.1	Наблюдение процесса свободной конвекции жидкости под воздействием теплового источника .....	33
4.2	Наблюдение распространения тепла при локальном воздействии излучения в полосе поглощения объекта .....	40

# 1 Введение

Голография (от греч. *holos grapho* — полная запись) — набор технологий для точной записи и воспроизведения волновых полей. Голография основана на записи интерференционной картины двух волновых фронтов: объектного и опорного, первый распространяется от исследуемого объекта и несет информацию об объекте, второй является вспомогательными для восстановления объектного волнового фронта. Как метод, голография была изобретена в 1947 году Деннисом Габором, который хотел лишь улучшить электронный микроскоп (на тот момент прибор, обладающий самой высокой разрешающей способностью) для того, чтобы увидеть изображение атомной решетки. Также значителен вклад в развитие голографии нашего соотечественника Юрия Николаевича Денисюка, выпускника ЛИТМО и сотрудника Государственного оптического института им. С.И. Вавилова. Вклад этот обычно рассматривается как разработка однолучевой схемы записи путем замены попутного опорного пучка на встречный. Именно метод Ю.Н. Денисюка ныне один из самых распространенных методов отражательных аналоговых голограмм. Голограммы Денисюка стали наиболее употребительными и теперь наиболее доступны и широко представлены во всем мире.

Сразу же после создания лазера, за счет свойств когерентности излучения и узкого спектрального диапазона, голография получила большое распространение, и до настоящего времени она используется в качестве метода оптической метрологии и неразрушающего контроля, как технология для трехмерного отображения информации и создания виртуальной реальности. На сегодняшний день, одним из наиболее перспективных технологических применений голографии является возможность ее использования для задач оптоинформатики: для записи, кодирования и хранения большого количества информации.

Практически сразу после появления первых работ по записи голограмм с лазерным излучением, в 1966 был предложен способ синтезирования цифровых голограмм с помощью ЭВМ [1]. Поскольку пространственное разрешение электронных матричных фотодетекторов долгое время не позволяло состязаться с фотографическими материалами, то цифровыми голограммами называли массивы чисел, представляющие собой математические голограммы, синтезированные с помощью ЭВМ. Однако, стремительное развитие компьютеров и цифровых процессоров привело к тому что, реализация записи и обработки голограмм при помощи цифровых носителей воплотилось в реальность. С тех пор, как в 1994 году

Ульф Шнарс и Вернер Жуптнер продемонстрировали возможность непосредственной записи голограммы на полупроводниковый прибор с зарядовой связью [2], под термином цифровая голография стали понимать именно процесс регистрации голограмм на матричные фотодетекторы.

На сегодня, во многих задачах оптоинформатики, где не требуется высокое разрешение фотографических материалов, удобным способом является голографическая регистрация с последующей обработкой сигналов в цифровом виде. Это обеспечивает таким системам гибкость и адаптивность. Наиболее существенным преимуществом цифровых методов обработки информации по сравнению с аналоговыми, является отсутствие необходимости во внесении каких-либо физических изменений в оборудование цифрового компьютера для перепрограммирования его для решения различных задач. Кроме того, цифровые компьютеры позволяют выполнять поэлементные и интегральные преобразования сигналов, такие как пространственный и временной Фурье-анализ, вычисление функций свертки и корреляции сигналов, которые являются характерными для аналоговой оптики. Вследствие этого оптические методы обработки информации, интегрированные с цифровой обработкой сигналов, обладают чрезвычайно широкими возможностями. Получение и обработка количественных данных, содержащихся в изображениях в виде сигналов, и подключение систем визуализации к другим информационным системам и сетям наиболее естественно, когда данные обрабатываются в цифровой форме. Цифровые сигналы, очищенные от физической оболочки, можно рассматривать как всеобщий эквивалент информации в чистом виде. Благодаря своей универсальности цифровые сигналы идеальное средство для интеграции в различные информационные системы.

1. *Huang T. S., Prasada B.* Considerations on the generation and processing of holograms by digital computers // *Quat. Prog. Rep.* 1966. V. 81. P. 199-205.
2. *Schnars U., Jüptner W.* Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction // *Applied optics.* 1994. V. 33. N 2. P. 179-181.

## 2 Лабораторная работа №1

### РАСПРОСТРАНЕНИЕ И ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ВОЛНОВЫХ ФРОНТОВ

#### Цель работы:

Ознакомится с особенностями численных методов расчета дифракционного распространения волновых фронтов и способами их преобразований

#### Объект исследования:

Математический аппарат скалярной теории дифракции

#### Задачи, решаемые в работе:

1. Рассмотрение возможных математических подходов к задаче расчета дифракции электромагнитного излучения;
2. Анализ пределов применимости численных методов расчета дифракционного распространения волновых фронтов;
3. Выявление особенностей продольных и поперечных дифракционных картин при дифракции на простейших апертурах и сложных объектах;
4. Пространственно-частотный анализ волнового фронта, претерпевшего дифракцию на апертуре.

### СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

В данной работе мы рассмотрим математические методы, описывающие процесс дифракционного распространения непрерывного монохроматического излучения. Математический аппарат теории дифракции основан на уравнениях Максвелла

#### *Уравнения Максвелла*

Уравнения Максвелла – система уравнений, описывающая электромагнитное поле и его связь с электрическими зарядами в сплошных средах и в вакууме. В дифференциальной форме система уравнений Максвелла имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} H &= j + \frac{\partial D}{\partial t}, \\ \operatorname{rot} E &= -\frac{\partial B}{\partial t}, \\ \operatorname{div} D &= \rho, \\ \operatorname{div} B &= 0. \end{aligned} \tag{2.1}$$

где  $H$  – вектор напряженности магнитного поля,  $E$  – вектор напряженности электрического поля,  $D$  – вектор электрической индукции,  $B$  – вектор магнитной индукции,  $j$  – вектор плотности тока проводимости,  $\rho$  – плотность электрического заряда. Постановка задачи дифракции на основе решения уравнений Максвелла в векторной форме позволяет найти наиболее точное решение в рамках строгой электромагнитной теории. Такая точность может потребоваться, например, при исследовании дифракционных явлений на элементах микрооптики с субволновым разрешением, когда скалярная теория дифракции дает неадекватное решение.

#### *Метод разностного решения уравнений Максвелла*

Одним из наиболее распространенных методов решения уравнений Максвелла, записанных в дифференциальной форме, является метод конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain – FDTD) [1]. В рамках этого метода производная функции представляется в виде центральной разности ее значений:

$$f'(x) = \frac{f(x_0 + \Delta x/2) - f(x_0 - \Delta x/2)}{\Delta x} + O(\Delta x^2) \tag{2.2}$$

Таким образом, область пространства и временной интервал подвергаются равномерной дискретизации на сетке с заданием начальных условий. Значения полей в некоторый момент времени вычисляются через их пространственные распределения в предыдущие моменты времени.

Метод FDTD позволяет вычислять распределение электромагнитного поля в ограниченном трехмерном объеме в каждый момент времени с учетом пространственного распределения диэлектрической и магнитной проницаемостей, проводимости и токов. Это делает его универсальным инструментом для решения обширного класса задач электродинамики. Однако, такая универсальность метода разностного решения уравнений Максвелла неизбежно приводит к его высокой вычислительной сложности. Это становится ощутимым недостатком, например, в случае, когда нужно рассчитать дифракционное распределение комплексной амплиту-

ды поля на большом расстоянии от источника, поскольку требует увеличения счетной области и времени расчета. В этом случае целесообразно использовать другие подходы, одним из наиболее известных из которых является скалярная теория дифракции.

### *Скалярная теория дифракции*

Скалярная теория дифракции [2,3], развитая Кирхгофом, Релеем и Зоммерфельдом за свою основу использует принцип Гюйгенса, который кратко можно сформулировать следующим образом: каждая точка волнового фронта является вторичным источником сферических волн. Как следует из названия, в скалярной теории дифракции рассматривается только скалярная амплитуда одной поперечной компоненты электрического или магнитного поля. При этом предполагается, что любые другие представляющие интерес компоненты можно рассматривать независимо таким же образом, что в общем случае противоречит уравнениям Максвелла. Экспериментально было показано, что скалярная теория дифракции дает очень точные результаты, если выполняются два условия:

- Отверстия в экранах велики по сравнению с длиной волны;
- Дифрагированные волны наблюдаются не слишком близко от экранов.

Для краткости, в данном описании приведен лишь минимум сведений о скалярной теории дифракции, необходимый для понимания принципов действия чаще всего используемых на практике методов расчета дифракционного распространения волновых фронтов. Для более детального изучения рекомендуется обратиться к учебникам [2, 3].

### **1. Принцип Гюйгенса-Френеля**

Рассмотрим распространение монохроматической волны  $u$  с длиной  $\lambda$  в некоторой системе координат  $(x, y, l)$ , с комплексной амплитудой, задаваемой в виде:

$$u(x, y, l) = |u(x, y, l)| \exp[i\varphi(x, y, l)], \quad (2.3)$$

где  $|u(x, y, l)|$  и  $\varphi(x, y, l)$  — соответственно амплитуда и фаза волнового фронта. Пусть известна комплексная амплитуда поля в плоскости  $l = 0$ , и требуется определить поле в плоскости, удаленной на расстоянии  $l$ . Из скалярной теории дифракции известно [2,3], что на

расстоянии  $l \gg \lambda$ , распространение поля вдоль оси  $l$  описывается уравнением Релея-Зоммерфельда:

$$u(x, y, l) = \iint_{-\infty}^{+\infty} h_{R-Z}(x, y, x', y') u_0(x', y') dx' dy' \quad (2.4)$$

с ядром  $h_{R-Z}(x, y, x', y')$ , которое определяется выражением:

$$h_{R-Z}(x, y, x', y') = \frac{\exp\left(\frac{i2\pi r}{\lambda}\right) l}{i\lambda r r}. \quad (2.5)$$

$$r = \sqrt{l^2 + (x - x')^2 + (y - y')^2}. \quad (2.6)$$

Уравнение (2.4) представляет собой математическую формулировку принципа Гюйгенса-Френеля: поле  $u(x, y, l)$  в плоскости, удаленной на расстояние  $l$ , есть суперпозиция сферических волн, испускаемых из плоскости  $l = 0$  точками с координатами  $(x', y')$ , с соответствующим удельным весом  $(i\lambda)^{-1} u_0(x', y') dx' dy'$ .

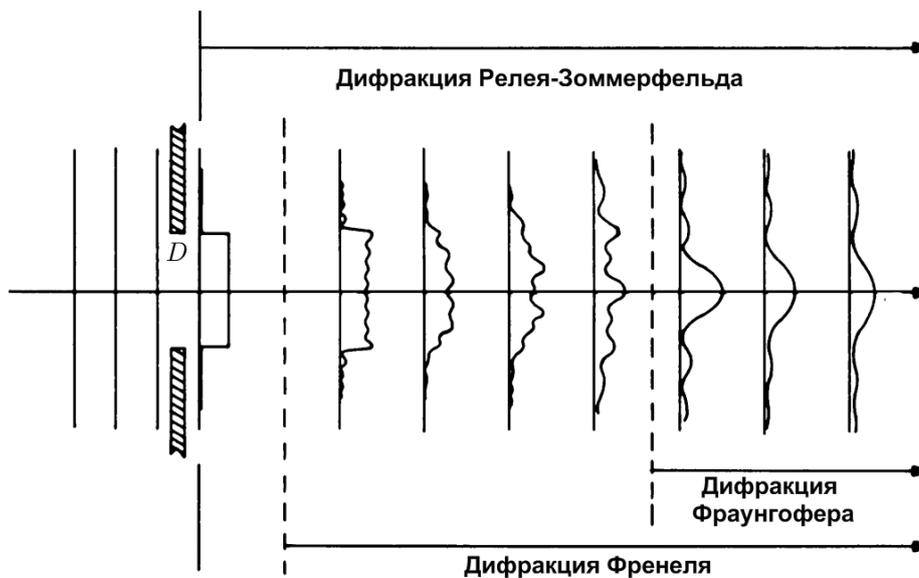


Рисунок 2.1 — Обозначение различных областей дифракции в соответствии с апертурой и наблюдаемым профилем излучения.

Вид дифракционной картины по мере удаления от источника будет меняться (рис.2.1). Для того, чтобы однозначно охарактеризовать ее вид используют параметр  $F^\#$ , называемый числом Френеля:

$$F^\# = \frac{D^2}{4\lambda l}. \quad (2.7)$$

Здесь  $D$  – размер отверстия (в общем случае – размер дифракционного транспаранта). При  $F^\# \gg 1$  говорят о дифракции Френеля, при  $F^\# \approx 1$  говорят о дифракции Фраунгофера.

## 2. Дифракция Френеля

Для расчёта распространения волновых полей в зоне дифракции Френеля можно упростить уравнение (2.4). Воспользовавшись разложением правой части этого уравнения в ряд Тейлора и отбросив все слагаемые, идущие после квадратичных, получаем выражение, описывающее дифракцию Френеля:

$$u(x, y, l) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F_{\text{Frenel}}(x, y, x', y') u_0(x', y') dx' dy', \quad (2.8)$$

где

$$F_{\text{Frenel}}(x, y, x', y') = \frac{\exp(ikl)}{i\lambda l} \exp\left(i\frac{\pi}{\lambda l}[(x - x')^2 + (y - y')^2]\right). \quad (2.9)$$

Ограничения, которые возникают в связи с этим, при наличии апертуры  $D$  в плоскости  $l = 0$ , могут быть записаны следующим образом:

$$\frac{1}{2} \sqrt[3]{\frac{D^4}{\lambda}} \ll l \leq \frac{D^2}{\lambda}. \quad (2.10)$$

Левое ограничение обусловлено заменой сферических вторичных волн Гюйгенса поверхностями второго порядка, и является довольно жестким. Правое неравенство формально ограничением не является, хотя расчёт с помощью преобразования Френеля там обычно не применяют, поскольку менее ресурсоемким является расчет через преобразование Фурье.

## 3. Дифракция Фраунгофера

При расчёте уравнения распространения волновых полей на расстояние квадратичный фазовый множитель приблизительно равен единице по всей апертуре, что приводит к случаю, описывающему дифракцию Фраунгофера:

$$u(x, y, l) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F_{\text{Fraunhofer}}(x, y, x', y') u_0(x', y') dx' dy', \quad (2.11)$$

где

$$F_{\text{Fraunhofer}}(x, y, x', y') = \frac{\exp(i\frac{2\pi l}{\lambda}) \exp\left[i\frac{\pi}{\lambda l}(x^2 + y^2)\right]}{i\lambda l} \exp\left[-i\frac{2\pi}{\lambda l}(xx' + yy')\right]. \quad (2.12)$$

Первые два экспоненциальных множителя в уравнении (2.12) не зависят от  $x'$  и  $y'$ , и при подстановке в (2.11) могут быть вынесены за

интеграл. Кроме того, поскольку интенсивность представляет собой квадрат амплитуды светового поля:

$$I(x, y, l) = u(x, y, l)u^*(x, y, l), \quad (2.13)$$

то они вовсе не регистрируются приемниками излучения, и могут не учитываться. В связи с этим, сделав замену переменных  $f_x = x/\lambda l$  и  $f_y = y/\lambda l$ , уравнение (2.11), можно представить как:

$$u(x, y, l) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F_{\text{FT}}(f_x, f_y, x', y') u_0(x', y') dx' dy', \quad (2.14)$$

где  $F_{\text{FT}}(f_x, f_y, x', y')$  — ядро преобразования Фурье:

$$F_{\text{FT}}(f_x, f_y, x', y') = \exp[-i2\pi(f_x x' + f_y y')]. \quad (2.15)$$

В результате в дальней зоне дифракции сходство с объектом теряется, и распределение освещенности становится идентичным Фурье-образу объекта. Аналогичное распределение поля также формируется в случае использования собирающей линзы.

Эффективные численные методы расчета дифракционного распространения

Уравнения (2.8) и (2.9), описывающие дифракцию в зоне Френеля, являются ресурсоемкими, поскольку для каждой точки на экране  $(x, y)$  необходимо рассчитать вклад каждой точки объекта  $(x', y')$ . Поэтому на практике для численных расчетов используются другие методы.

#### **4. Угловой спектр плоских волн**

На практике, представление пространственного распределения волнового поля через угловой спектр плоских волн является очень удобным, вследствие следующих причин:

- Относительно изначального описания волнового поля интегралом Релея-Зоммерфельда не накладывается дополнительных ограничений.
- Возможно численное вычисление дифракционного интеграла с использованием быстрых преобразований Фурье, что существенно сокращает время расчета.

Вычислить угловой спектр поля при  $l = 0$ , т.е. в плоскости входного зрачка можно с использованием преобразования Фурье:

$$U_0(f_x, f_y) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] u(x, y, 0) dx dy. \quad (2.16)$$

Угловой спектр  $U_0(f_x, f_y)$  определяет амплитуду каждой из компонент Фурье. Таким образом, функцию  $u(x, y, 0)$ , описывающую распределение поля сразу за исследуемым объектом можно разложить на совокупность бесконечных пространственных волн:

$$u(x, y, 0) = \iint_{-\infty}^{+\infty} \exp[i2\pi(f_x x + f_y y)] U_0(f_x, f_y) df_x df_y. \quad (2.17)$$

Эти плоские волны  $\exp[i2\pi(f_x x + f_y y)]$  имеют период  $(f_x^2 + f_y^2)^{-1/2}$ , а направление распространения задается косинусами:

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \lambda f_x, \\ \cos \beta &= \lambda f_y, \\ \cos \gamma &= \lambda \sqrt{\frac{1}{\lambda^2} - (f_x^2 + f_y^2)}. \end{aligned} \quad (2.18)$$

В связи с тем, что угловой спектр для произвольного  $l$  выглядит как:

$$U(f_x, f_y, l) = U_0(f_x, f_y) \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} l \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} \right], \quad (2.19)$$

для  $f_x^2 + f_y^2 > \lambda^{-2}$  получаются затухающие волны. Амплитуда этих волн экспоненциально уменьшается в направлении  $l$ , и они практически исчезают на расстоянии, превышающем длину волны. Формулы (2.16) и (2.19) определяют способ расчета распространения волнового фронта через угловой спектр плоских волн:

$$\begin{aligned} u(x, y, l) = \iint_{-\infty}^{+\infty} U_0(f_x, f_y) \exp [i2\pi(f_x x + f_y y)] \cdot \\ \cdot \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} l \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} \right] df_x df_y. \end{aligned} \quad (2.20)$$

Из этих же уравнений можно определить передаточную функцию, которая описывает процессы распространения:

$$H(f_x, f_y, l) = \begin{cases} \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} l \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} \right] & \text{при } f_x^2 + f_y^2 < \frac{1}{\lambda^2}; \\ 0 & \text{при } f_x^2 + f_y^2 > \frac{1}{\lambda^2}; \end{cases} \quad (2.21)$$

## 5. Метод свертки исходного поля с импульсным откликом системы

Другой возможный подход к вычислению поля в плоскости  $l$  заключается в подстановке  $r$  из (2.6) в (2.5), что дает  $h(x - x', y - y', l)$ . Подставив последнее в уравнение Релея-Зоммерфельда (2.4), увидим, что поле  $u(x, y, l)$  может быть вычислено с помощью свертки:

$$u(x, y, l) = u(x, y, 0) \otimes h(x, y, l) \quad (2.22)$$

поля  $u(x, y, 0)$  в плоскости  $l = 0$  с функцией импульсного отклика:

$$h(x, y, l) = \frac{\exp[i\frac{2\pi}{\lambda}r] l}{i\lambda r \frac{1}{r}}. \quad (2.23)$$

*Представление рассматриваемых методов на дискретной сетке*

На практике расчет представленных выше уравнений ведется с дискретным шагом, по прямоугольной сетке:

$$\begin{aligned} x' &= \Delta x' \cdot n_x, n_x = \left[ \frac{-N'_x}{2}; \frac{-N'_x}{2} + 1 \dots \frac{N'_x}{2} - 1 \right]; \\ y' &= \Delta y' \cdot n_y, n_y = \left[ \frac{-N'_y}{2}; \frac{-N'_y}{2} + 1 \dots \frac{N'_y}{2} - 1 \right]; \\ f_x &= \Delta f \cdot m_x, m_x = \left[ \frac{-N_x^f}{2}; \frac{-N_x^f}{2} + 1 \dots \frac{N_x^f}{2} - 1 \right]; \\ f_y &= \Delta f \cdot m_y, m_y = \left[ \frac{-N_y^f}{2}; \frac{-N_y^f}{2} + 1 \dots \frac{N_y^f}{2} - 1 \right]; \\ x &= \Delta x \cdot p_x, p_x = \left[ \frac{-N_x}{2}; \frac{-N_x}{2} + 1 \dots \frac{N_x}{2} - 1 \right]; \\ y &= \Delta y \cdot p_y, p_y = \left[ \frac{-N_y}{2}; \frac{-N_y}{2} + 1 \dots \frac{N_y}{2} - 1 \right]. \end{aligned} \quad (2.24)$$

где  $\Delta x' \times \Delta y'$ ,  $\Delta f_x \times \Delta f_y$ ,  $\Delta x \times \Delta y$  – размеры отсчета исходной, частотной и конечной плоскостях, соответственно,  $N'_x \times N'_y$ ,  $N_x^f \times N_y^f$ ,  $N_x \times N_y$  – количество отсчетов поля расчета в исходной, частотной и конечной плоскостях. При этом возникает необходимость удовлетворения условиям теоремы отсчетов, в противном случае в расчет привносится дополнительная ошибка, приводящая к наложению пространственных спектров или возникновению копий по краям изображения.

**6. Дискретное представление метода распространения углового спектра (метод УС)**

Метод расчета распространения углового спектра плоских волн в дискретных координатах будет выглядеть следующим образом:

$$u(x, y, l) = \sum_{n_x=1}^{N'_x} \sum_{n_y=1}^{N'_y} U_0(x', y') \exp [i2\pi(f_x x + f_y y)] \cdot \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} l \sqrt{1 - \lambda^2(f_x^2 + f_y^2)} \right]. \quad (2.25)$$

Пределы применимости:  $l \gg \lambda$ . В таком виде число и размер отсчетов в исходной и конечной плоскостях не связаны. Расчет с помощью метода распространения углового спектра (выражение 2.23) может быть значительно ускорен с использованием двух быстрых преобразований Фурье (БПФ):

$$u(x, y, l) = FFT^{-1} \left[ FFT[U_0(x', y')] \cdot \exp \left[ i \frac{2\pi}{\lambda} l \sqrt{1 - \lambda^2((\lambda f_x)^2 + (\lambda f_y)^2)} \right] \right], \quad (2.26)$$

где  $FFT^{-1}\{*\}$  - оператор быстрого обратного преобразования Фурье. Однако использование БПФ накладывает ограничение на количество отсчетов и их размеры:

$$\begin{aligned} N &= N_x = N_y = N'_x = N'_y, \\ \Delta x &= \Delta x', \Delta y = \Delta y'. \end{aligned} \quad (2.27)$$

Данная реализация метода с использованием двух БПФ – метод УС и используется на практике. Ее особенностью является возможность расчёта распространения волновых полей в ближней зоне дифракции Френеля ( $l \leq \frac{N\Delta x'^2}{\lambda}$ ).

**7. Дискретное представление метода свертки исходного поля с импульсным откликом системы (метод С)**

Метод расчета свертки исходного поля с импульсным откликом системы в дискретных координатах аналогичен выражению 2.20, только импульсный отклик системы берется из выражения 2.22. Пределы

применимости:  $l \gg \lambda$ . Число и размер отсчетов поля в исходной и конечной плоскостях не связаны. Расчет может быть значительно ускорен с использованием трех БПФ (далее метод С):

$$u(x, y, l) = FFT^{-1} \left[ FFT[U_0(x', y')] \cdot FFT \left[ \frac{\exp[i\frac{2\pi}{\lambda}r]}{i\lambda r} \frac{l}{r} \right] \right], \quad (2.28)$$

Однако использование БПФ накладывает ограничения на расчет, аналогичные выражению 2.27. Особенностью метода С является возможность расчёта распространения волновых полей в дальней зоне дифракции Френеля ( $l \geq \frac{N\Delta x'^2}{\lambda}$ ).

#### *Пределы применимости*

Вследствие использования БПФ при расчётах имеют место ограничения, накладываемые теоремой отсчётов. При расстояниях  $l \leq l_0 = \frac{N\Delta x'^2}{\lambda}$  эти ограничения удовлетворяются для метода УС. При расстояниях  $l \geq l_0$  применим метод С. При неудовлетворении ограничениям теоремы отсчетов для метода УС, на расчетном поле будут возникать нежелательные эффекты: маскировка частот, которая проявляется как возникновение «хвостов» изображения с противоположных сторон [4]. Для метода С нарушение теоремы отсчетов чревато появлением копий.

Для расширения границ применимости методов, налагаемых теоремой отсчетов, существует 2 общепринятые стратегии [5]. Представим формулу дифракционной расходимости пучка в виде следующей пропорции:

$$\frac{l_0}{D} = \frac{l_0}{N\Delta x'} = \frac{\Delta x'}{\lambda} \quad (2.29)$$

где  $D = N\Delta x'$  – размер поля в исходной плоскости. Из этого выражения следует, что варьировать пределы применимости методов можно либо меняя размер поля в исходной плоскости, либо меняя размер отсчёта в исходной плоскости. Уменьшение размеров поля производится обрезкой его краев. В этом случае часть информационного содержания объекта теряется, однако при этом уменьшается время расчета. Напротив, увеличение размеров исходного поля производится с помощью его дополнения нулевыми элементами. При этом информационное наполнение остается неизменным, однако время расчета увеличивается. Аналогично, увеличение размера отсчёта в исходной плоскости может быть произведено с помощью объединения соседних отсчётов. При этом, количество отсчётов уменьшается, что приводит к сокращению времени расчета и ухудшению его детализации

изображения. Уменьшение размера отсчёта производится его разделением на несколько. В этом случае, увеличивается время расчета, однако детализация изображения не увеличивается, даже если при делении используется интерполяция. Причина этого в том, что изначально отсутствующие мелкие детали (высокие пространственные частоты) не могут быть воспроизведены без априорной информации. Данные стратегии удобно представить графически (см. рис. 2.2). Зависимость из выражения 2.29 разделяет область построения на две зоны: ближнюю (внизу слева) и дальнюю (вверху справа)

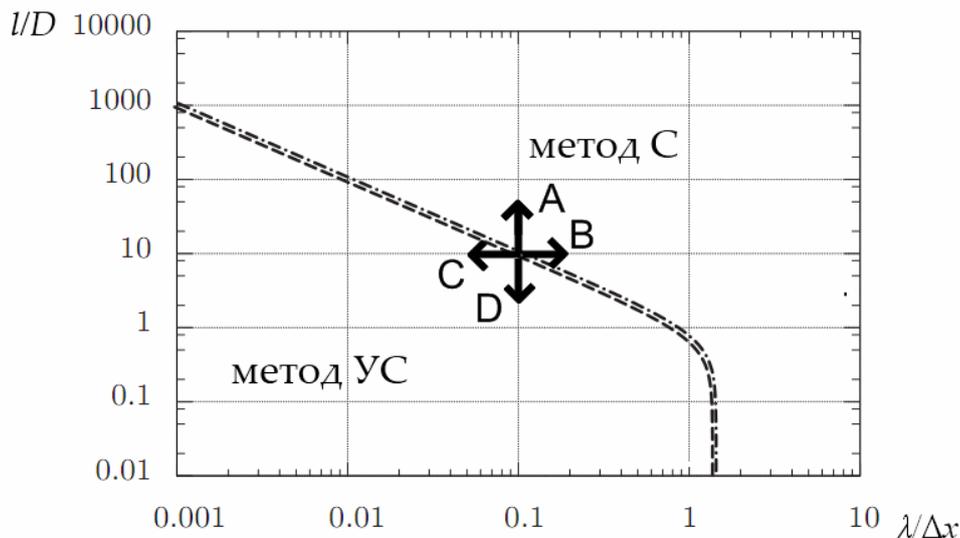


Рисунок 2.2 — Графическое представление границ применимости теоремы отсчетов для разных методов расчета в безразмерных единицах и варианты варьирования пределов применимости (адаптация из [5])

Находясь в области ближней зоны, где применим метод УС, при необходимости воспользоваться методом С, предназначенным для расчета в дальней зоне, необходимо произвести либо: А – обрезание исходного поля (уменьшение D), либо В – деление отсчётов (уменьшение  $\Delta x'$ ). И наоборот, находясь в области дальней зоны, где применим метод С, при желании применить метод УС можно использовать либо С – объединение отсчётов (увеличение  $\Delta x'$ ), либо D – заполнение нулевыми элементами (увеличение D).

## Описание виртуальной лабораторной установки

На Рисунке 2.3 представлен интерфейс виртуального прибора. Прибор имеет следующие элементы управления:

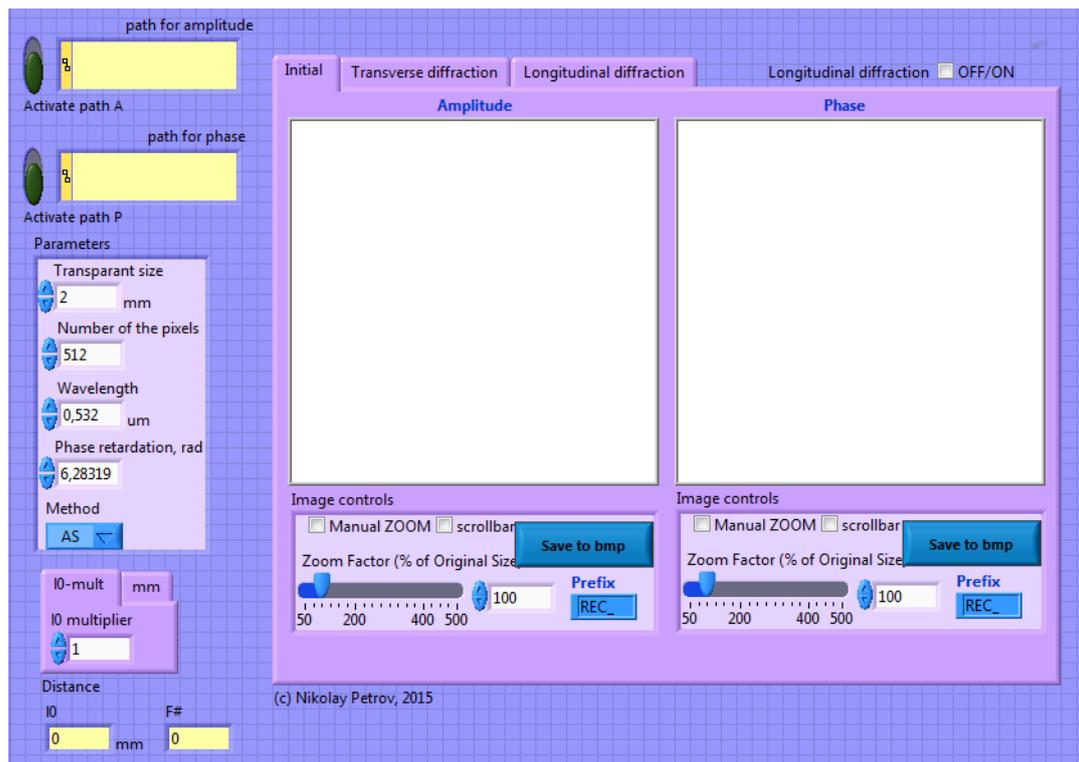


Рисунок 2.3 — Лицевая панель виртуального прибора

- **path for amplitude/phase** — окно индикации рабочего пути к амплитуде/фазе исследуемого волнового фронта. Каждое окно снабжено кнопкой активации **Activate path A/P**, в случае включения которой, происходит обращение к ранее использовавшемуся пути, отображенному в соответствующем окне.
- **Parameters** — кластерный элемент управления, содержащий параметры, используемые при восстановлении цифровой голограммы:
- **Transparant size** — физический размер ДОЭ. Задается в миллиметрах.
- **Number of the pixels** — количество пикселей ДОЭ.
- **Wavelength** — элемент управления, задающий длину волны излучения, используемую в расчетах. Задается в микрометрах.
- **Phase retardation** — элемент управления, нормирующий фазу ДОЭ на выставленную величину. Задаётся в радианах.
- **Method** — кольцевой элемент управления, позволяющий выбрать метод расчета дифракционного распространения волнового фронта. Имеет две позиции: *AS* — метод углового спектра (от англ. angular spectrum), и *C* — метод свертки (от англ. convolution).

Ниже расположена панель двух закладок для выбора дистанции распространения **10-mult/mm**, на которой задается значение величины распространения:

- **10 multiplier** — элемент управления, значение которого используется для задания дистанции в количествах  $l0$ .
- **Distance** — элемент управления, значение которого используется для задания дистанции в миллиметрах.

Справа расположена панель закладок, на которой отображаются полученные результаты в виде распределений амплитуды и фазы. Данная панель имеет следующие вкладки:

- **Initial** — используется для отображения начальных амплитуды и фазы.
- **Transverse diffraction** — данная вкладка отображает продольные амплитуду и фазу объектного волнового фронта, распространяемого на заданную дистанцию.
- **Longitudinal diffraction** — данная вкладка позволяет наблюдать продольное изменение амплитуды объектного волнового фронта, распространяемого на заданную дистанцию. Левый экран отображает интенсивность продольных срезов, относительно значения дистанции. Правый экран отображает поперечное распределение амплитуды, соответствующее текущему значению дистанции распространения. Для работы данной вкладки необходимо активировать элемент управления **Longitudinal diffraction**, поставив галочку в поле **OFF/ON**. Также данная вкладка имеет дополнительные элементы управления:
  - > **From** — элемент управления для задания начальной точки распространения, задаётся в миллиметрах;
  - > **To** — элемент управления для задания конечной точки распространения, задаётся в миллиметрах;
  - > панель закладок **Step size/Num points** — элемент управления, который позволяет задавать либо размер шага распространения, либо количество шагов, соответственно.

Основные закладки программы содержат индикаторы **picture**, на которых графически отображаются результаты. Данные индикаторы имеют следующие элементы управления:

- **Manual zoom** — позволяет рассматривать объект с произвольным увеличением (задается при помощи **Zoom factor**).
- **Scrollbar** — включает полосу прокрутки.
- **Save to bmp** — позволяет записать отображаемое на индикаторе изображение в 8-битный файл. Записываемый файл сохраняется в папку где лежат исходные файлы. При этом, в момент записи в файл имя записываемого файла генерируется автоматически, на основе параметров расчета, а также к имени файла добавляется префикс, указанный в элементе управления **Prefix**. Изображение сохраняется в виде 8-битного BMP-файла в оттенках серого.

## Порядок выполнения работы

1. Исследовать поперечные дифракционные картины, получаемые на различных расстояниях с помощью виртуального прибора.
2. Получите и исследуйте продольную и поперечную картины дифракции излучения на:
  - (a) круглом отверстии;
  - (b) прямоугольном отверстии;
  - (c) дифракционной решетке.
3. Исследовать влияние нарушения теоремы отсчетов для методов УС и С. Для этого рассчитайте:
  - (a) поперечные дифракционные картины на расстояниях  $0.1l_0$ ,  $0.5l_0$ ,  $l_0$ ,  $2l_0$ ,  $5l_0$ ;
  - (b) прямоугольном отверстии;
  - (c) дифракционной решетке.
4. Рассчитайте продольные и поперечные картины дифракции на:
  - (a) амплитудном объекте;
  - (b) произвольном фазовом объекте;
  - (c) фазовом объекте, со случайным фазовым запаздыванием.
5. Смоделируйте продольную картину дифракции гауссова пучка, опишите ее отличия от дифракционной картины на круглом отверстии.

6. Смоделируйте продольную картину дифракции гауссова пучка с наклонной фазой.
7. Смоделируйте поперечную картину дифракции для вихревого волнового фронта и опишите какие преобразования происходят с распределением фазы по мере распространения.
8. Смоделируйте опыт Юнга.

## **Обработка результатов**

Подготовьте отчет в соответствии с ходом работы. Наглядно, например - графически, представьте результаты проделанных измерений. Дайте развернутое объяснение результатов и выявленных зависимостей, ответьте на контрольные вопросы. В отчете старайтесь не быть голословными и подтверждать свои ответы комментариями и иллюстрациями, сделанными в ходе лабораторной работы.

## **Вопросы для изучения при подготовке к работе**

1. Перечислите основные отличия и вытекающие из них ограничения метода разностного решения уравнений Максвелла и методов, основанных на скалярной теории дифракции.
2. Дайте определение пространственной частоты. Каким образом распространяются пространственные частоты, согласно модели распространения углового спектра плоских волн?
3. В чем заключается практическое отличие методов распространения углового спектра плоских волн и метода свертки исходного поля с импульсным откликом системы.
4. Перечислите случаи, когда расчет методом распространения углового спектра плоских волн может быть выполнен безошибочно для зоны дифракции Фраунгофера.
5. Объясните стратегии преодоления пределов применимости, налагаемых теоремой отсчетов, для рассматриваемых в работе методов.
6. Какие отличия будут наблюдаться при распространении монохроматического пучка с гауссовым профилем, и пучка с прямоугольным профилем, вырезанным диафрагмой?

7. Что такое аподизация? Каким образом она осуществляется?
8. Какие уравнения, описывающие дифракцию волнового фронта, вы знаете? Запишите их и назовите методы их решения.
9. Дайте определение вихревого лазерного пучка.
10. Что такое спекл-структура? Поясните причины ее образования.
11. Что такое пятно Пуассона (Араго)? Какую роль в развитии волновой теории света оно сыграло?

Примечание: Для получения допуска к лабораторной работе на выше поставленные вопросы необходимо найти ответы. Ответы изложить преподавателю на коллоквиуме, предшествующем выполнению лабораторной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Taflove A., Hagness S.C.* Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method – 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, 2005. – 1038 p.
2. *Гудмен Дж.* Введение в Фурье-оптику. – М.: «Мир», 1970.
3. *Gaskill J.* Linear systems, Fourier transforms, and optics. / N. Y.: Wiley, 1978, 554 p.
4. *Verrier N.* Off-axis digital hologram reconstruction: some practical considerations / N. Verrier, M. Atlan // *Appl. Opt.* – 2011. – Vol. 50, No 34. – P. 136.
5. *Doval A.F., Trillo C.* Dimensionless formulation of the convolution and angular spectrum reconstruction methods in digital holography // *Proc. SPIE*, Vol. 7387, 2010, P. 73870U.

### 3 Лабораторная работа №2

## ОСНОВЫ ВНЕОСЕВОЙ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИИ

**Цель работы:** На практике ознакомиться с особенностями записи и восстановления внеосевых цифровых голограмм

**Объект исследования:** метод внеосевой цифровой голографии

**Задачи, решаемые в работе:**

1. Знакомство с экспериментальной базой, используемой для записи цифровых голограмм.
2. Получение представлений о численных методах восстановления пространственных амплитудно-фазовых характеристик электромагнитного поля.
3. Запись внеосевой цифровой голограммы простейших фазовых транспарантов в схеме на пропускание.
4. Анализ влияния условий проведения эксперимента и параметров, используемых при записи и восстановлении внеосевых цифровых голограмм, на качество восстановления амплитудно-фазовых характеристик.

### СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

В данной работе рассматривается процесс записи внеосевых цифровых голограмм на матричные фотоприемники, и происходит знакомство с численными методами восстановления пространственного распределения амплитуды и фазы, содержащих информацию об исследуемом объекте. Для начала определимся, что такое цифровая голограмма, а затем кратко рассмотрим процесс формирования внеосевых цифровых голограмм как результат интерференции опорной и предметной волн, и один из самых широко-распространенных методов их восстановления.

Ранее под термином цифровая голография называли процесс синтеза голограмм, выполняемый с помощью ЭВМ. Однако, с тех пор, как с тех пор как Ульф Шнарс и Вернер Жуптнер продемонстрировали возможность непосредственной записи голограммы на полупроводниковый прибор с зарядовой связью [1], под термином цифровая голография

стали понимать именно процесс регистрации голограмм на приборы с зарядовой связью (в общем случае на матричные фотодетекторы). Голографический процесс состоит из двух частей: записи и восстановления. Последняя, как правило, выполняется с помощью численных методов.

*Формирование внеосевой голограммы в результате интерференции двух волн*

Как вы помните из первой лабораторной работы, пространственное распределение монохроматической волны  $U$  с длиной  $\lambda$  в некоторой системе координат  $(x, y, l)$  задается в виде  $U(x, y, l) = |u(x, y, l) \exp(i\phi(x, y, l))|$ , где  $u(x, y, l)$  и  $\phi(x, y, l)$  – соответственно, амплитуда, и фаза волнового фронта. Рассмотрим процесс формирования голограммы из двух таких волн. Первая волна обычно попадает в плоскость регистрации без каких-либо изменений и называется опорной, а вторая проходит через (или отражается от) исследуемого объекта, и поэтому называется объектной волной. Обозначим объектную волну как:

$$U_0(x, y) = E_0(x, y) \exp[i\phi_0(x, y)]. \quad (3.1)$$

Здесь  $E_0$  – амплитуда, а  $\phi_0$  – фаза объектной волны. Аналогично для опорной волны можно записать:

$$U_r(x, y) = E_r(x, y) \exp[i\phi_r(x, y)]. \quad (3.2)$$

тогда  $E_r$  – амплитуда, а  $\phi_r$  – фаза опорной волны.

Когда объектная и опорная волна интерферируют в плоскости регистрации, сформированная голограмма может быть представлена как:

$$H(x, y) = E_0(x, y)^2 + E_r(x, y)^2 + U_0(x, y)U_r^*(x, y) + U_0^*(x, y)U_r(x, y), \quad (3.3)$$

где  $*$  – обозначает комплексное сопряжение, Первое и второе слагаемые в (3.3) описывают постоянную составляющую, находящуюся в нулевом порядке дифракции. Третье слагаемое с точностью до известного множителя представляет собой копию исходного оптического поля – действительное изображение, находящееся в первом порядке дифракции. Последний член в (3.3) образует еще одно изображение объекта, которое называется мнимым изображением объекта, находящееся в минус первом порядке дифракции.

*Некоторые сведения о методах восстановления цифровых голограмм*

Одним из самых известных методов восстановления цифровых голограмм, является алгоритм двойного преобразования Фурье с фильтрацией в частотной плоскости [2]. Данный алгоритм можно условно разделить на

три этапа: Первый этап - вычисление преобразования Фурье от распределения интенсивности (3.3)

$$F[H(x, y)] = F[E_0(x, y)^2 + E_r(x, y)^2] + F[U_0(x, y)E_r \exp(i2\pi\eta l)] + F[U_0^*(x, y)E_r \exp(-i2\pi\eta l)], \quad (3.4)$$

где символом  $F[ ]$  обозначена операция преобразования Фурье. Далее, преобразуем слагаемые в правой части выражения (3.4):

$$F[U_0(x, y)E_r \exp(i2\pi\eta l)] = F[U_0]E_r \otimes \delta(f - \eta) \quad (3.5)$$

$$F[U_0^*(x, y)E_r \exp(-i2\pi\eta l)] = F[U_0^*]E_r \otimes \delta(f + \eta) \quad (3.6)$$

где  $\otimes$  – оператор свертки. Из последних полученных выражений видно, что слагаемые Фурье-образа, представленные выражениями (3.5) и (3.6) имеют различный сдвиг в частотной плоскости, который определяется несущей частотой, входящей в аргументы соответствующих  $\delta$ -функций. Наличие частотного сдвига обеспечивает локализованность каждого из слагаемых в (3.4). Первое слагаемое локализовано вокруг начала координат частотной плоскости. Второе и третье – симметрично вокруг точек  $\pm\eta$  ( $\eta$  задает связь угла  $\Theta$  и пространственной частоты). Этот факт используется в алгоритме восстановления, и следующим его этапом является фильтрация спектра.

Вторым этапом алгоритма восстановления является фильтрация спектра. Для восстановления голограммы представляет интерес слагаемое (3.5), так как оно содержит Фурье-образ комплексной амплитуды объектной волны. Операция фильтрации оставляет без изменений его компоненты, соответствующие слагаемому (3.5) и обнуляет все остальные. В результате получается спектр объектной волны, сдвинутый по частоте на величину  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\sin(\Theta)}{\lambda} \quad (3.7)$$

где  $\lambda$  – длина волны,  $\Theta$  – угол между объектным и опорным фронтами. Следующий этап алгоритма заключается в устранении этого сдвига, что необходимо осуществить для правильного восстановления распределения фазы, соответствующего объектной волне. Если этот сдвиг не будет выполнен, фаза будет иметь дополнительный линейный набег.

Завершающим этапом алгоритма является выполнение обратного преобразования Фурье над фильтрованным и центрированным спектром.

Согласно формуле (3.3) первое и второе слагаемое формируют постоянную составляющую, расположенную в нулевом порядке дифракции восстановленного оптического поля. Во внеосевой цифровой голографии, при переходе в Фурье плоскость мнимое изображение, действительное изображение и постоянная составляющая оказываются пространственно-разнесены. Однако если рассматривать яркость каждой из частей в изображении, то яркость постоянной составляющей будет на порядок выше остальных. Следовательно, при цифровом восстановлении в процессе нормализации значений большая часть диапазона будет приходиться на постоянную составляющую, что не обеспечит необходимого контраста для выделения остальных составляющих. Поэтому для выделения объектного слагаемого в спектральной области голограмма подвергается фильтрации, с последующей компенсацией частотного сдвига.

Также при работе с цифровыми записывающими устройствами необходимо помнить об ограничениях, которые накладывает дискретная природа регистраторов. Из теоремы Котельникова следует, что при дискретизации аналогового сигнала потерь информации не будет только в том случае, если наивысшая частота полезного сигнала равна половине или меньше частоты дискретизации (частота Найквиста). В противном случае при восстановлении аналогового сигнала будет иметь место наложение спектральных «хвостов» (подмена частот, маскировка частот, алиасинг), и форма восстановленного сигнала будет искажена. Таким образом, запись цифровых голограмм во внеосевой геометрии имеет ограничение по углу между объектным и порным волновым фронтами, значение данного граничного угла зависит от длины волны используемого излучения и размера пикселя регистрирующей матрицы

## Описание виртуальной лабораторной установки

В данной лабораторной работе используется виртуальный прибор, позволяющий производить регистрацию голограмм на матричный фотоприемник, с последующей обработкой в реальном времени. Поскольку данный виртуальный прибор управляет действующей фотокамерой с матричным фотоприемником, во избежание возможных неполадок в работе настоятельно рекомендуется ознакомиться с описанием виртуального прибора и процедурой работы с ним. На Рисунке 3.1 представлен интерфейс виртуального прибора

Прибор имеет следующие элементы управления:

- **Push to start** — Кнопка запуска работы виртуального прибора. При

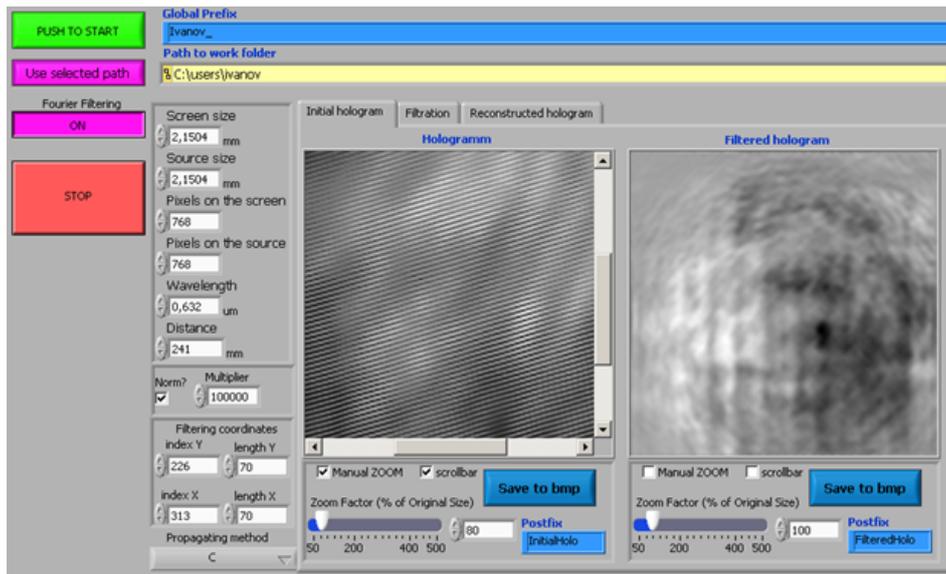


Рисунок 3.1 — Лицевая панель виртуального прибора

первом запуске программы, при нажатии данной кнопки появляется диалоговое окно, в котором пользователю будет предложено выбрать рабочую директорию, куда будут сохраняться файлы.

- **Path to work folder** — Индикатор, на котором отображается путь, выбранный для сохранения файлов.
- **Global prefix** — элемент управления, задающий глобальный префикс, присваиваемый всем сохраняемым в процессе работы файлам.
- **Use selected path** — кнопка, позволяющая активировать отображаемый на индикаторе путь. Данная кнопка позволяет избежать утомительного выбора одного и того же пути к рабочей папке при многократном запуске виртуального прибора. При первом запуске программы данная кнопка должна быть отжата (серыми) для появления диалогового окна.
- **Fourier Filtering** — элемент управления, запускающий процесс восстановления регистрируемой в реальном времени цифровой голограммы. Активирует вкладку «Filtration» на панели закладок.
- **Stop** — кнопка, используемая для прекращения работы виртуального прибора. **Внимание!** кнопка **Stop** позволяет завершить работу с программой единственно возможным правильным образом. Остановка виртуального прибора с помощью круглой красной кнопки, расположенной левее стрелки, запускающей программу, наиболее вероятно приведет в ошибку с последующим закрытием среды National

Instruments LabVIEW.

- **Parameters** — кластерный элемент управления, содержащий параметры, используемые при восстановлении цифровой голограммы:
- **Screen size** — физический размер регистрируемой цифровой голограммы. Задается в миллиметрах.
- **Number of the pixels** — количество пикселей ДОО.
- **Wavelength** — элемент управления, задающий длину волны излучения, используемую в расчетах. Задается в нанометрах.
- **Distance** — элемент управления, определяющий расстояние от плоскости голограммы до объекта. Задается в миллиметрах. Используется при расчете распространения волнового фронта из плоскости голограммы в плоскость объекта.
- **Norm?** — элемент управления, активирующий процедуру нормировки в процессе отображения дифракционных порядков в Фурье – пространстве.
- **Multiplier** — множитель, используемый при нормировке при включенном элементе управления **Norm**.
- **Filtering coordinates** — кластерный элемент управления, содержащий параметры, определяющие координаты и величину окна, используемого при фильтрации в Фурье-пространстве.
- **index Y** — координата левого верхнего угла вырезаемого фрагмента по оси  $Y$ .
- **index X** — координата левого верхнего угла вырезаемого фрагмента по оси  $X$ .
- **length Y** — длина вырезаемого фрагмента по оси  $Y$ .
- **length X** — длина вырезаемого фрагмента по оси  $X$ .
- **Propagating Method** — кольцевой элемент управления, позволяющий выбрать метод расчета дифракционного распространения волнового фронта, восстановленного с цифровой голограммы. Имеет как две позиции, знакомые по первой работе:  $AS$  – метод углового спектра (от англ. angular spectrum), и  $C$  – метод свертки (от англ. convolution), так и другие.

Справа расположена панель закладок, на которой отображаются полученные результаты в виде распределений амплитуды и фазы. Данная панель имеет следующие вкладки:

- **Initial hologram** — используется для отображения регистрируемой голограммы.
- **Filtration** — используется для фильтрации дифракционных порядков в Фурье-пространстве.
- **Reconstructed wavefront** — используется для отображения восстановленного волнового фронта в плоскости объекта.

Данные закладки содержат индикаторы *picture*, на которых графически отображаются результаты. Данные индикаторы имеют следующие элементы управления:

- **Manual zoom** — позволяет рассматривать объект с произвольным увеличением (задается при помощи *Zoom factor*).
- **Scrollbar** — включает полосу прокрутки.
- **Save to bmp** — позволяет записать отображаемое на индикаторе изображение в 8-битный файл. Записываемый файл сохраняется в папку путь к которой указан в поле **Path to work folder**. При этом, в момент записи в файл имя записываемого файла генерируется автоматически, на основе значения поля *Global prefix* и параметров расчета, также к имени файла добавляется постфикс, указанный в элементе управления *Postfix*. Изображение сохраняется в виде 8-битного BMP-файла в оттенках серого.

## Порядок выполнения работы

1. Защитите у преподавателя право допуска к лабораторной установке, ответив на вопросы о технике безопасности при работе с лазерным излучением.
2. Убедитесь, что лабораторная установка отъюстирована надлежащим образом. Вместе с преподавателем удостоверьтесь, что перед матричным фоторегистратором находится светофильтр, ослабляющий лазерное излучение в достаточной мере, чтобы не обеспечить выход из

стройка светочувствительных элементов сенсора. Убедитесь, что предметный и опорный пучки попадают на матрицу, последовательно перекрыв каждый из них.

3. Запишите голограмму фона – интерференционную картину опорной и объектной волн при отсутствии объекта. Для этого:
  - (a) Запустите виртуальный прибор (при первом запуске удостоверьтесь, что кнопка **Use selected path** отжата). Выберите рабочую папку.
  - (b) Пользуясь элементами управления **Manual zoom** и **Scrollbar** убедитесь, что на голограмме присутствуют отчетливые интерференционные полосы, ширина которых удовлетворяет условию теоремы Котельникова. Сохраните одну из голограмм в рабочей директории, и изучите внимательно с использованием внешней программы для просмотра изображений (например, FastStone Image Viewer).
  - (c) В случае, если удалось получить голограмму, содержащую отчетливые полосы, переходите к процедуре обработки голограммы, с помощью нажатия кнопки **Fourier Filtering**.
  - (d) На панели закладок справа переключитесь на закладку **Filtration** и с помощью элементов управления в кластере **Filtering coordinates** установите окно фильтрации как можно более точно по центру первого дифракционного порядка, отвечающего за действительное изображение. При этом ширину и высоту окна положить равной 90.
  - (e) Переключитесь на панель **Reconstructed wavefront** и, наблюдая за изменением ширины полос фазового разрыва и их ориентацией, еще более прецизионно отцентрируйте окно фильтрации относительно первого дифракционного порядка. В случае, когда установка хорошо отъюстирована, при отсутствии объекта происходит интерференция двух плоских волновых фронтов, при точном попадании первого дифракционного порядка в центр отфильтрованной области на восстановленном распределении фазы полосы должны исчезнуть, и как результат восстановления будет плоский волновой фронт.
  - (f) Установите значение элемента управления **Distance** равное нулю, и значение поля **Propagating Method** на *AS* (угловой спектр). Сохраните восстановленные распределения амплитуды и фазы,

пометив их с помощью определенных значений локальных постфиксов. Сохранив подобранные параметры окна фильтрации (можно сделать снимок экрана), переходите к процедуре записи голограммы исследуемых объектов.

4. Выполняя аналогичные пункту 3 действия, запишите голограммы одного из тестируемых фазовых объектов. Подбирая параметр **Distance**, получите сфокусированное восстановленное изображение объекта. Сохраните сфокусированные фазу и амплитуду в файлы, запишите соответствующие параметры восстановления.
5. Добавьте в схему второй фазовый объект, расположив его на другом расстоянии от плоскости регистрации. Восстановите сфокусированное изображение второго фазового объекта, сохраните амплитуду и фазу, запишите параметры восстановления.
6. Не извлекая исследуемые транспаранты из объектного плеча установки, снова точно выставите параметр **Distance** на значение, определенное в п.4. ранее, чтобы сфокусироваться на первый объект. Сохраните в файл восстановленные распределения амплитуды и фазы.
7. Изменить ширину и длину окна фильтрации на 30 пикселей. Важно вновь выставить окно фильтрации по центру. Сохранить фазовое и амплитудное изображения восстановленного волнового фронта.

## Обработка результатов

Подготовьте отчет в соответствии с ходом работы. При представлении результатов каждого из разделов не забывайте приводить параметры, при которых они получены (исследуемый размер транспаранта, число точек, длину волны излучения, а также подобранные расстояния от транспаранта до плоскости регистрации, параметры использованных окон фильтрации).

Предоставьте рисунок отпической схемы работы.

По снятой голограмме в отсутствии объекта из известных значений размера пикселя и длины волны оцените угол наклона предметной к опорной волне по вертикали и горизонтали.

В отчете приведите результат Фурье преобразования от цифровой голограммы. Укажите 0, 1,  $-1$  порядки дифракции. Что произойдет с яркостью нулевого порядка дифракции (относительно  $\pm 1$ ), если поставить амплитудный объект на пути предметного пучка?

Проанализируйте изображения полученные в п.6 и 7, сделайте вывод о том в каком случае качество восстановленного сфокусированного изображения выше, почему?

Произведите вычитание фона (восстановленного поля без объекта) из восстановленных объектных волновых фронтов, и подробно опишите, как вы это сделали. Для справки по данному вопросу можно пользоваться одним из методов, описанных в работах [3, 4].

При обработке зарегистрированных голограмм дома, постарайтесь получить сфокусированное мнимое изображение объекта. Сравните его с действительным. В отчете опишите отличия. Предпочтительнее произвести количественное сравнение, на основании самостоятельно отобранного критерия (это позволит получить большее количество баллов при защите отчета по лабораторной работе преподавателю).

При обработке результатов по пункту 6, сравнивая их с результатами, полученными в пункте 4, проанализируйте отличия в амплитудном и фазовом распределениях, которые появились после добавления второго фазового транспаранта в объектное плечо установки. Объясните причину.

Наглядно, например - графически, представьте результаты проделанных измерений. Дайте развернутое объяснение результатов и выявленных зависимостей, ответьте на контрольные вопросы. В отчете необходимо подтверждать свои ответы комментариями и иллюстрациями, сделанными в ходе лабораторной работы.

На основе полученного в ходе лабораторной работы опыта сформулируйте требования к виброизоляции установки, объясните причины возникновения данных требований.

## **Вопросы для изучения при подготовке к работе**

1. Дайте определение цифровой голограмме. Приведите примеры методов записи и обработки.
2. Как связана толщина интерференционных полос на голограмме с углом между опорной и предметной волнами, и пространственным разрешением?
3. Дайте определение частоте Найквиста. Каков ее физический смысл?
4. Назовите преимущества внеосевой цифровой голографии с использованием Фурье фильтрации. Недостатки?
5. Что такое зеро-падинг? Для чего применяется?

6. Какое принципиальное отличие методов распространения волнового фронта свертки и углового спектра?

Примечание: Для получения допуска к лабораторной работе на выше поставленные вопросы необходимо найти ответы. Ответы изложить преподавателю на коллоквиуме, предшествующем выполнению лабораторной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Schnars U., J?ptner W. Direct recording of holograms by a CCD target and numerical reconstruction //Applied optics. – 1994. – V. 33. – №. 2. – P. 179-181.
2. Taflove A., Hagness S.C. Computational Electrodynamics: The Finite-Difference Time-Domain Method – 3rd ed. Norwood, MA: Artech House, 2005. – 1038 p.
3. Belashov A.V., Petrov N.V., Semenova I.V. Digital off-axis holographic interferometry with simulated wavefront //Optics Express. 22(23), pp. 28363-28376.
4. Белашов А.В., Петров Н.В., Семенова И.В. Метод вычисления динамического фазового набега в голографической интерферометрии без ликвидации фазовых разрывов //Компьютерная оптика. – 2014. – Т. 38. – №. 4. С. 710-716.

## **4 Лабораторная работа №3**

# **ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ФАЗОВЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПРОЗРАЧНЫХ ОБЪЕКТОВ МЕТОДОМ ЦИФРОВОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ**

### **Два варианта выполнения**

#### **4.1 НАБЛЮДЕНИЕ ПРОЦЕССА СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ ЖИДКОСТИ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ТЕПЛОГО ИСТОЧНИКА**

**Цель работы:** определить основные этапы процесса свободной конвекции в плоском слое воды под воздействием точечного источника тепла.

### **ВВЕДЕНИЕ**

Исследование конвективных потоков жидкости, сопровождающих большинство процессов, протекающих в жидкой фазе, представляет большой интерес в таких научно-технических направлениях, как: нанотехнологии, биомедицина, физико-химическая гидродинамика и т.д. [1–6].

Использование оптических методов в случае исследования прозрачных жидкостей эффективно как при получении качественных оценок в форме визуализации, так и при получении количественных данных, которые необходимы для построения математических моделей изучаемых процессов.

Экспериментальная методика исследования конвекции жидкости основана на использовании цифровой голографической интерферометрии и ориентирована на изучение свободной конвекции жидкости под действием источника тепла. В качестве основной характеристики рассматривается пространственное распределение температуры и его изменение в процессе нагрева.

#### **Объект исследования:**

Объектом исследования в данной работе является плоско-параллельный слой воды, находящийся в стеклянной кювете. Вода является доступным объектом с известными параметрами и удобна при отработке методики получения экспериментальных данных, построения математической модели процесса свободной конвекции и использования в качестве

#### 4.1 Наблюдение процесса свободной конвекции жидкости под воздействием теплового источника

тест-объекта при исследовании процессов конвекции водных растворов и суспензий в различных условиях.

При проведении исследований вода наливается в прозрачную кювету с плоско-параллельными стеклянными рабочими поверхностями, внутри которой находится источник тепла (рисунок 4.1а). Источником тепла является микролампа, представляющая собой вольфрамовый нагреватель в стеклянной колбе. Степень нагрева регулируется подаваемым напряжением.

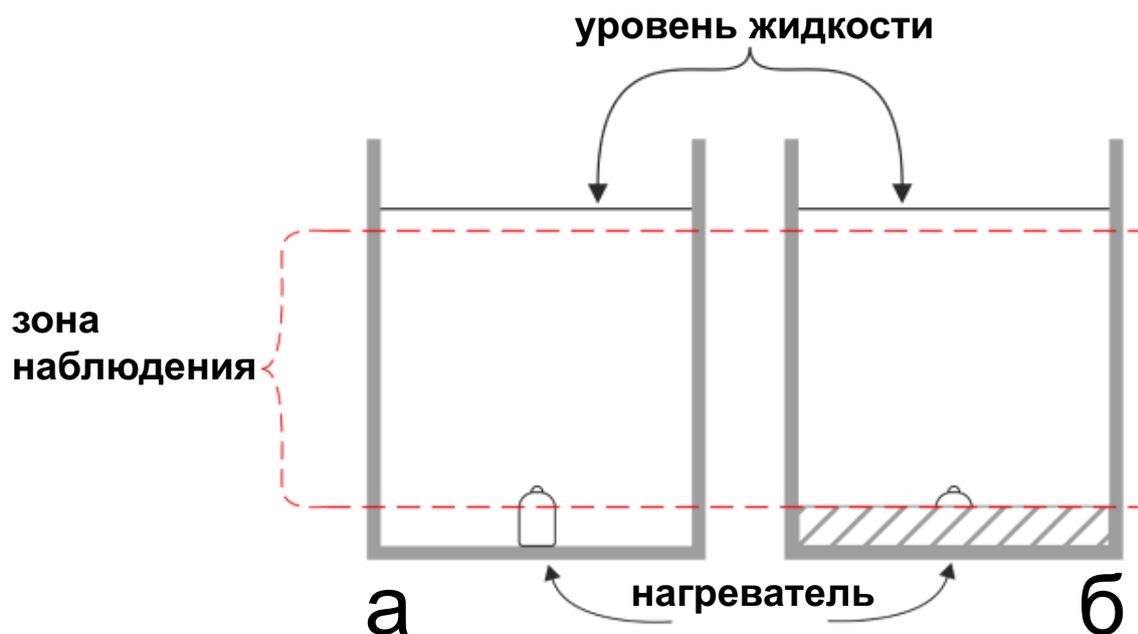


Рисунок 4.1 — Тестовый объект (а) и его математическая интерпретация (б)

Исследуемая жидкость заливается в кювету, установленную на экспериментальном стенде, и выдерживается определенное время для стабилизации параметров. Наблюдение процесса конвекции начинается одновременно с включением нагрева. Объем жидкости в кювете составляет 4 мл (размер внутренней части кюветы 5x20x40 мм) при толщине слоя жидкости 5 мм. Размер нагревателя (вольфрамовая спираль) около одного миллиметра, что позволяет в данных условиях считать нагреватель точечным. Требуемый режим конвекции с определенными температурно-временными параметрами процесса конвекции устанавливается регулированием нагрева.

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА

Для наблюдения и исследования процесса свободной конвекции жидкости под воздействием теплового источника используется эксперимен-

тальный стенд, разработанный для исследования временной динамики фазовых неоднородностей жидкости [5–9]. Используемый стенд позволяет детектировать и прослеживать в течение заданного интервала времени изменение оптических параметров исследуемого объекта, прозрачного в области зондирующего излучения, а также обеспечивает диагностику и количественную оценку параметров конвективных потоков в исследуемом объекте с дистанционной обработкой экспериментальных данных. Программное обеспечение позволяет проводить контроль изменения фазы оптического излучения, прошедшего исследуемый объект, с временным разрешением 100 мс в течение длительного времени (до нескольких часов) с точностью не менее  $\pi/10$  на рабочей площади объекта 20x20 мм.

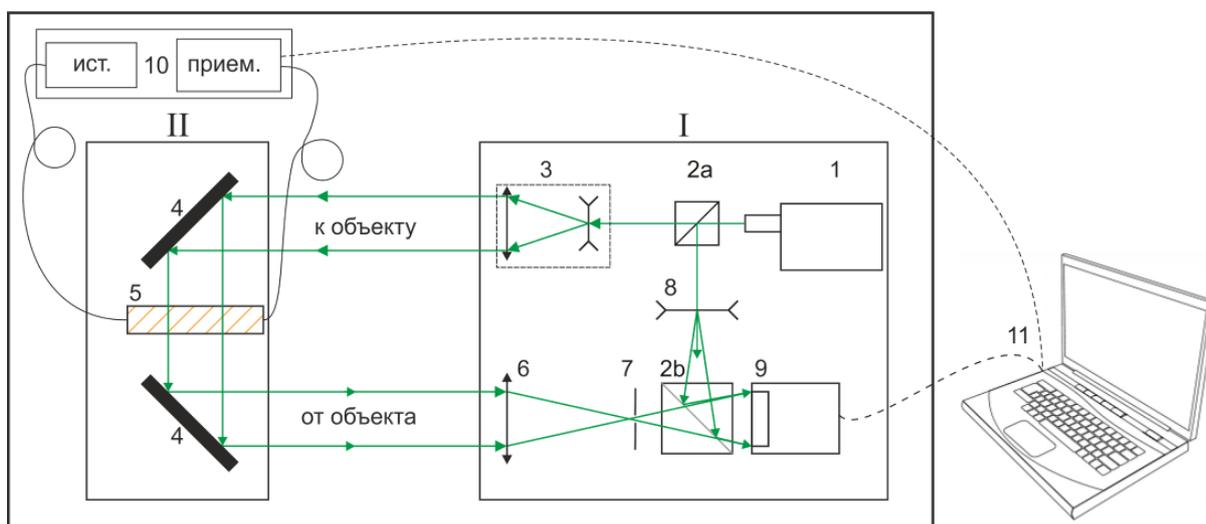


Рисунок 4.2 — Оптическая схема эксперимента: 1 - лазер  $\lambda=532$  нм, 2 - светоделители, 3 - коллиматор, 4 - зеркала, 5 - объект, 6, 8 - линзы, 7 - диафрагма, 9- видеокамера, 10 - внешний спектрометр для проведения параллельных измерений, 11 – компьютерный терминал. I – блок интерферометра, II – блок исследуемого объекта

Оптическая схема стенда приведена на рисунке 4.2. Она представляет собой типичную интерферометрическую схему с монохроматическим источником излучения с большой длиной когерентности. В качестве источника излучения использован лазер с длиной волны излучения 532 нм. В данной схеме параллельный пучок зондирующего излучения проходит через объект 5; с помощью линзы 6 формируется объектный пучок требуемой расходимости, который интерферирует с опорным пучком в пространстве за светоделителем 2b. На CMOS-матрице видеокамеры 9 регистрируется интерферограмма – голограмма сфокусированного изображения объекта 5. Используется видеокамера с максимальной частотой съемки 15 кадров в секунду и матрицей размером 1280x960 пикселей.

Стенд имеет единый компьютерный терминал управления регистраци-

#### 4.1 Наблюдение процесса свободной конвекции жидкости под воздействием теплового источника

---

ей и обработкой последовательности голограмм-интерферограмм, который позволяет производит выборку данных, осуществлять представление результатов в различных переменных (построение поверхности разности фаз, полей температуры и плотности и т.п.) и давать их пространственно-временную 3D-визуализацию.

Проведение эксперимента включает ряд необходимых этапов.

1. Установить режим нагрева жидкости (регулировкой источника питания лампы), позволяющий визуально следить за развитием процесса и наблюдать как нестационарный, так и стационарный режим конвекции жидкости.
2. Определить ориентировочную длительность проведения эксперимента и оптимальную частоту регистрации голограмм.
3. Провести наблюдение исследуемого процесса методом ЦГИ в режиме реального времени. Выбрать оптимальный режим регистрации голограмм: время экспозиции, частоту и общую длительность регистрации серии голограмм.
4. Зарегистрировать серию голограмм в соответствии с выбранным режимом.

Обработка результатов эксперимента также включает ряд этапов.

1. Создание фильма из серии интерферограмм реального времени: каждая интерферограмма получается вычитанием из голограммы  $H_N$  голограммы  $H_0$ . Голограмма  $H_0$  зарегистрирована до начала нагрева и характеризует исходное состояние объекта в условиях стабильной температуры.
2. На основании анализа фильма производится выбор голограмм из зарегистрированной последовательности для дальнейшей полной цифровой обработки. Критерий выбора – каждая выбранная голограмма должна представлять типичную картину определенного этапа исследуемого процесса.
3. Расчет разности фаз для различных состояний объекта и построение цифровой интерферограммы производится по формулам [8]. Построенная цифровая интерферограмма представляет собой распределение разности фаз в плоскости наблюдения объекта, соответствующее изменению состояния объекта.

4. Выбрать оптимальные методы цифровой обработки и представления результатов в удобном виде.

В данной работе полученные цифровые интерферограммы предлагается преобразовать в трехмерную поверхность изменения разности фаз. Дополнительно можно использовать программы обработки и представления результатов в виде изофазных линий и распределения фазы вдоль выбранного сечения.

На рисунке 4.3 представлены результаты компьютерной обработки типичной серии зарегистрированных голограмм. В течение 30 минут регистрировалась серия голограмм с интервалом 1 с и экспозицией 1/4096 секунды. Из полученных 1800 голограмм для демонстрации основных этапов процесса были выбраны голограммы, результаты обработки которых даны на рисунке 4.3. В соответствии с условиями эксперимента (слой дистиллированной воды толщиной 5 мм) и справочными данными [10] изменение температуры между двумя соседними максимумами цифровой интерферограммы составляет 1.3 К. За период наблюдения процесса, представленного на рис.3, в течение 5 минут в исследуемом образце максимальное изменение температуры составило 5,2 К.

Как показали проведенные эксперименты, при исследовании зарождения и развития струи жидкости над источником тепла в плоском слое воды можно выделить 4 основных этапа процесса.

**Этап 1:** зарождение струи – формирование зоны нагрева над источником тепла демонстрирует интерферограмма 1, результат обработки голограммы, зарегистрированной через 3 секунды после начала прогрева. Длительность данного этапа составляет несколько секунд.

**Этап 2:** начальная стадия формирования струи – нагретая жидкость всплывает над источником тепла, как это видно на цифровой интерферограмме 2, характеризующей состояние объекта через 9 секунд после начала нагрева. Длительность этапа 10-25 секунд.

**Этап 3:** стадия развития струи с образованием грибообразной формы конвективного потока – длительность данного этапа составляет 20-30 секунд.

**Этап 4:** стадия развитой тепловой конвекции – колебания струи около вертикального направления, демонстрирующие нестационарный характер процесса свободной конвекции – начало отклонений струи от вертикального положения происходит через 50-60 секунд после начала нагрева и продолжается до конца наблюдения (30 минут) без изменений характера конвекции.

#### 4.1 Наблюдение процесса свободной конвекции жидкости под воздействием теплового источника

Как видно из приведенных на рисунке 4.3 данных результаты математического моделирования процесса свободной конвекции в исследуемом тест-объекте правильно описывают характер изменения теплового поля, наблюдаемый в эксперименте.

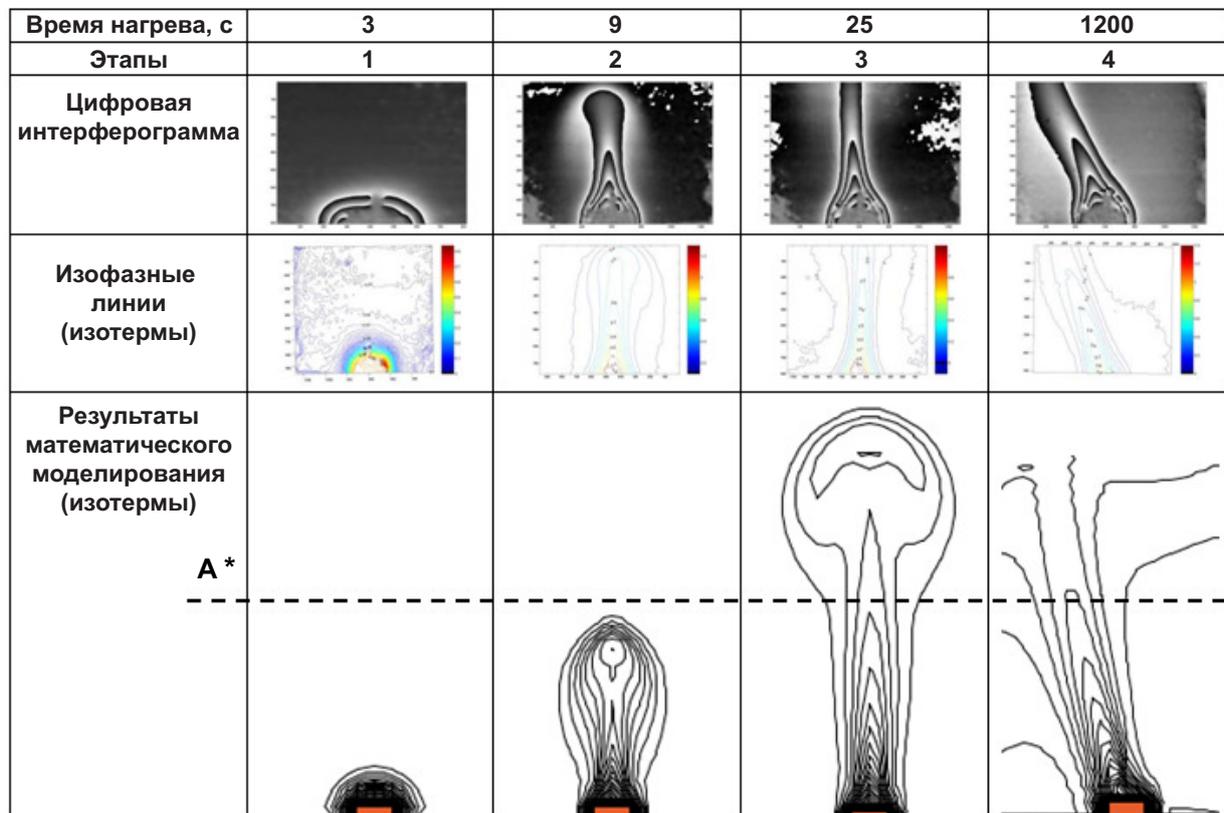


Рисунок 4.3 — Результаты исследования процесса свободной конвекции в плоском слое воды под воздействием точечного источника тепла

В результате выполнения данной работы будет проведено исследование процесса свободной конвекции в плоском слое жидкости при воздействии теплового источника. Экспериментальная методика основана на использовании метода цифровой голографической интерферометрии. Использован стенд для изучения временной динамики фазовых неоднородностей жидкостей, который позволяет проводить контроль и диагностику изменений пространственного распределения фазы оптического излучения, прошедшего исследуемый объект с точностью не менее  $\pi/10$  с временным разрешением 100 мс.

Экспериментальные результаты должны быть получены в виде пространственно-временного распределения температуры с точностью до десятых долей градуса.

Предложенный подход может быть использован для изучения свободной конвекции в широком классе сред, а также для визуализации процес-

СОВ КОНВЕКЦИИ В ОБЪЕКТАХ С ОГРАНИЧЕННЫМ ОПТИЧЕСКИМ ДОСТУПОМ.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. *Zhao J., Di J., Wu B., Wang J., Wang Q., Jiang H.* Visual and dynamic measurement of temperature fields by use of digital holographic interferometry // *Proc. SPIE.* 2013. V. 8788. P. 878828-7.
2. *Abu-Nada E., Chamkha A.J.* Effect of nanofluid variable properties on natural convection in enclosures filled with a CuO-EG-Water nanofluid // *Int. J. of Thermal Sci.* 2010. V. 49. P. 2339-2352.
3. *Heys J.J., Barocas V.H.* A Boussinesq Model of Natural Convection in the Human Eye and the Formation of Krukenberg's Spindle // *Annals of biomedical engineering.* 2002. V. 30. N 3. P. 392-401.
4. *Gakashev A.I., Tarunin E.L.* Intensity of thermal convection in beehives // *Computational continuum mechanics.* 2008. V. 1. N 2. P. 16-26.
5. *Yoshida M.* Preliminary three-dimensional model of mantle convection with deformable, mobile continental lithosphere // *Earth and planetary science letters.* 2010. V. 295. P. 205-218.
6. *Mamedov V.M., Yuferev V.S.* Numerical simulation of the crystallization front inversion in oxide single crystals grown from melt using the Czochralski method // *Technical Physics Letters.* 2008. V. 34. Is. 7. P. 622-625.
7. *Alexeenko I., Gusev M., Gurevich V.* Separate recording of rationally related vibration frequencies using digital stroboscopic holographic interferometry // *Applied Optics.* 2009. V. 48. Is. 18. P. 3475-3480.
8. *Andreeva O.V., Kiririllova S.A., Manuhin B.G., Kucher D.A., Chivilikhin S.A.* A technique for investigation of the thermal field during the hydrothermal synthesis of nanoparticles in an autoclave with optical access / 15-th International symposium of flow visualization. Minsk, Belarus. June 25-28, 2012. Book of abstracts. P. 143.
9. *Pedrini G., Froning P., Tiziani H.J., Gusev M.* Pulsed digital holography for high-speed contouring // *Appl. Opt.* 1999. V. 38. N 16. P. 3460-3466.
10. *Kaye G.W., Laby T.N.* Tables of Physical and Chemical Constants. Longman Group, London, 1986).

## 4.2 НАБЛЮДЕНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ ЛОКАЛЬНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В ПОЛОСЕ ПОГЛОЩЕНИЯ ОБЪЕКТА

**Цель работы:** исследовать распространение тепла в образце полимерной регистрирующей среды в процессе поглощения излучения.

### ВВЕДЕНИЕ

При прохождении излучения через среду с веществом, обладающим поглощением в данной спектральной области, происходит поглощение энергии, приводящее к повышению температуры вещества и изменению его оптических и физико-механических характеристик.

Особенно важно изучение роли тепловых эффектов воздействия излучения при рассмотрении процессов, протекающих в объемных светочувствительных средах при регистрации голограмм и наноразмерных структур. Это обусловлено тем, что во время записи голограммы происходит увеличение температуры образца за счет поглощения энергии излучения, что приводит к изменению среднего показателя преломления среды и ее геометрических размеров. При этом изменение размеров среды и ее среднего показателя преломления, как правило, имеют одинаковый порядок величины, что затрудняет их оценку, особенно в тех случаях, когда эти изменения имеют разные знаки (разнонаправлены).

В данной работе представлена методика исследования тепловых эффектов воздействия излучения на поглощающие среды, используемые в качестве регистрирующих светочувствительных сред для записи информации. Методика основана на использовании цифровой голографической интерферометрии (ЦГИ) и позволяет визуализировать тепловые эффекты и наблюдать их развитие в течение времени воздействия записывающего излучения, а также после его окончания.

### **Объект исследования:**

Регистрирующие среды на полимерной основе в настоящее время широко применяются для записи информации, в том числе для записи голограмм, голограммных оптических элементов (ГОЭ) и оптических элементов для систем архивной оптико-голографической памяти [1,2]. Объемные среды с физической толщиной порядка миллиметра, предназначенные для указанных целей, должны обеспечивать неизменность регистрируемой структуры в процессе ее получения и эксплуатации [3]. Однако, изменение температуры среды приводит к изменению геометрических

размеров такой структуры и ее оптических постоянных.

Изменения, происходящие в образцах при изменении температуры, можно характеризовать коэффициентами линейного расширения ( $dl/dT$ ) и температурного изменения показателя преломления ( $dn/dT$ ) среды. Сравнение указанных коэффициентов для сред на основе полимеров и сред на основе силикатного стекла дано в таблице 1. Приведенные данные указывают на необходимость исследования теплового воздействия излучения в первую очередь на параметры полимерных сред: влияние изменения температуры на параметры полимерных сред существенно выше (почти в 10 раз), чем на параметры силикатных стекол.

Таблица 1 — Температурные коэффициенты линейного расширения ( $dl/dT$ ) и изменения показателя преломления ( $dn/dT$ ) сред на основе полимеров и сред на основе силикатного стекла [4]

Характеристика	Материал	
	Полимер, PMMA	Силикатное стекло
Коэффициент линейного расширения, $dl/dT$ , $K^{-1}$	$(3.6 \div 6.5) \cdot 10^{-5}$	$(5 \div 9) \cdot 10^{-6}$
Температурное изменение показателя преломления, $dn/dT$ , $K^{-1}$	$-1.05 \cdot 10^{-4}$	$-(10^{-5} \div 10^{-6})$

В качестве объекта исследования используются образцы полимерной регистрирующей среды «Диффен», разработанной для записи объемных голограмм [1]. Образцы материала «Диффен» представляют собой одну из модификаций полимерной светочувствительной среды на основе фенантренхинона (ФХ) и полиметилметакрилата (ПММА), в которой использован принцип диффузионного усиления записанной информации. Спектр поглощения ФХ приведен на рисунок 4.4 (кривая 1). В процессе воздействия излучения с длиной волны в полосе поглощения ФХ (350-520 нм) происходит поглощение энергии с преобразованием ФХ в фотопродукт [4], прозрачный в видимой области спектра (рисунок 4.4, кривая 2). Поглощение излучения сопровождается локальным нагревом образца (в соответствии с пространственным распределением интенсивности воздействующего излучения). Именно на этом этапе необходимо выявить влияние тепловых эффектов на оптические и геометрические параметры образца, чтобы определить условия записи голограмм с минимальной

## 4.2 Наблюдение распространения тепла при локальном воздействии излучения в полосе поглощения объекта

деформацией ее внутренней структуры.

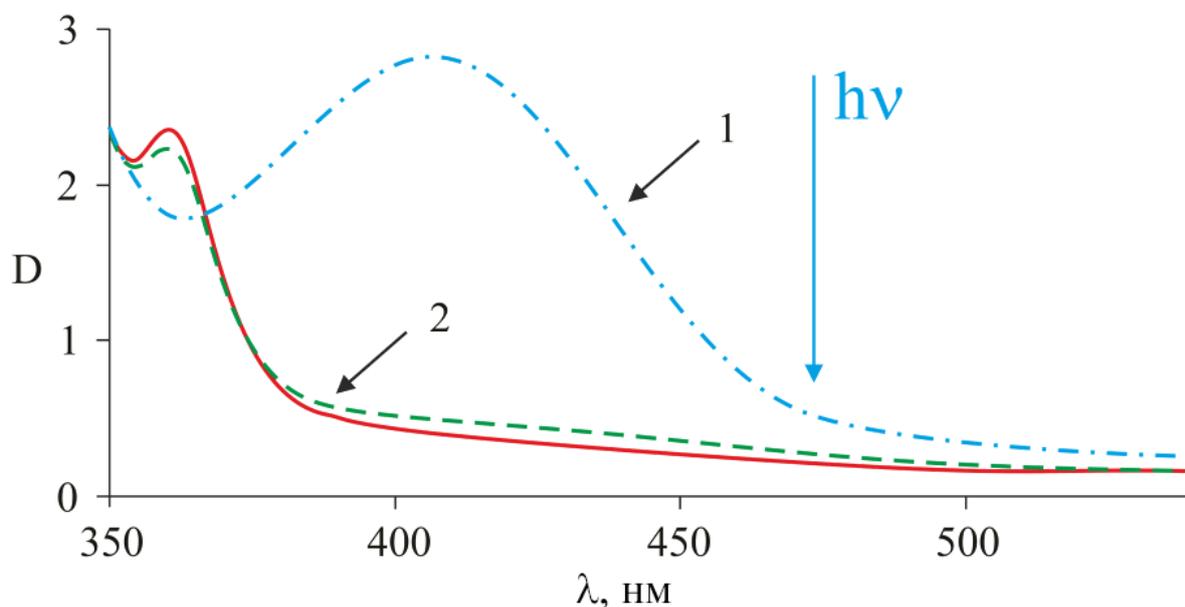


Рисунок 4.4 — Спектральная зависимость оптической плотности  $D$ , исходного образца (1) и обесцвеченного образца (2): условия обесцвечивания –  $\lambda = 470$  нм (сплошная линия),  $\lambda = 405$  нм (штриховая линия); толщина образца ( $T$ ) - 0,4 мм, плотность мощности обесцвечивающего излучения ( $E_0$ ) - 16 мВт/см<sup>2</sup>. Измерения оптической плотности проведены на спектрофотометре Evolution 300 [4]

Предварительная оценка наличия таких эффектов проводится в данной работе в макроскопическом масштабе, без учета влияния пространственной модуляции излучения при регистрации голограммы. На регистрирующую среду направляется пучок излучения DPSS лазера с длиной волны 473 нм и производится оценка изменений оптических параметров образца в течение длительного времени.

Исследование изменений, сопровождающих воздействие регистрирующего излучения на образец среды «Диффен», производится с помощью неактивного зондирующего излучения с длиной волны 532 нм, находящейся вне полосы поглощения ФХ. Оценка теплового воздействия проводится путем анализа пространственного изменения фазы зондирующего излучения, прошедшего через образец.

При нагреве полимерного образца происходит увеличение его линейных размеров и уменьшение среднего показателя преломления (см. таблицу 1). Таким образом, изменение фазы излучения, прошедшего образец при изменении его температуры, обусловлено разностью коэффициентов  $dl/dT$  и  $dn/dT$  и составляет величину  $d\phi/dT \approx (4 \div 7)10^{-5}$  (см. таблицу 1).

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

При проведении исследований используется портативный экспериментальный стенд, оптическая схема которого приведена на рисунке 4.5. В основе создания стенда лежат базовые принципы голографической интерферометрии [5]. Коллимированный пучок излучения лазера делится на опорный и объектный пучки светоделителем 2а; объектный пучок, расширенный коллиматором 3, проходит сквозь тест-объект и несет информацию о пространственном распределении показателя преломления изучаемого объекта. В пространстве за светоделителем 2b объектный и опорный пучки интерферируют, а на матрице видеокамеры 9 регистрируется голограмма сфокусированного изображения. Информация с видеокамеры поступает на компьютерный терминал для дальнейшей обработки.

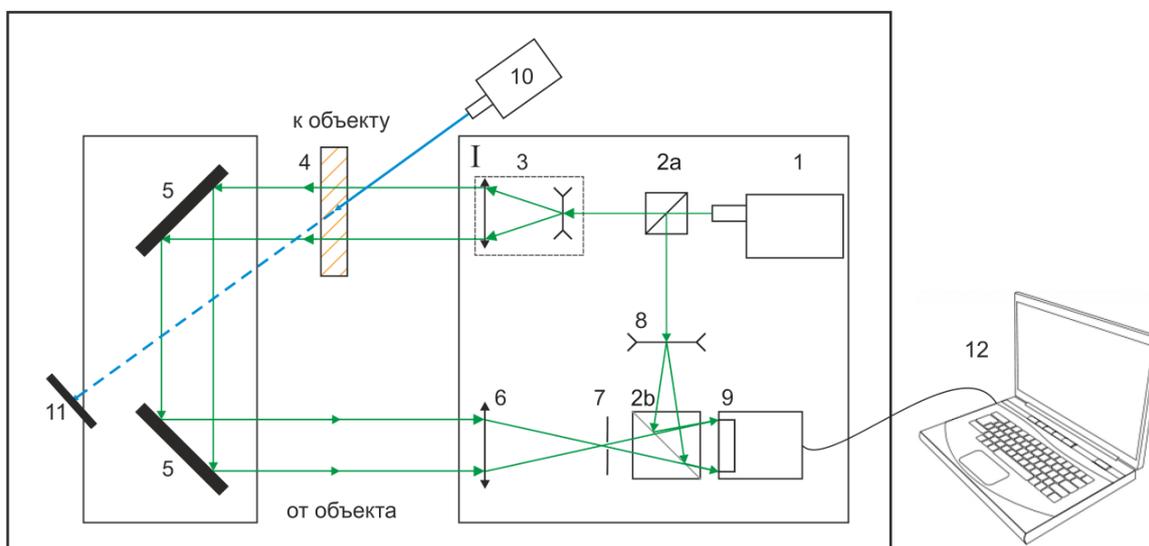


Рисунок 4.5 — Оптическая схема эксперимента: 1 - лазер  $\lambda=532$  нм, 2 - светоделители, 3 - коллиматор, 4 - объект, 5 - зеркала, 6 - фокусирующая линза, 7 - диафрагма, 9 - видеокамера, 10 - источник внешнего воздействия: лазер  $\lambda=473$  нм, 11 - приемник излучения, 12 - компьютерный терминал

Особенностями данной конфигурации экспериментального стенда, предназначенного для исследования прозрачных объектов методом ЦГИ, является вынос узла с изучаемым объектом за пределы основной интерферометрической схемы. Значительное увеличение длины объектного пучка (по сравнению с опорным) при сохранении компактности основной схемы обеспечивается большой длиной когерентности излучения используемого лазера (более 1 м). Изменение направления объектного пучка в этом случае производится поворотными зеркалами 5.

Расположение объекта вне основной оптической схемы позволяет сопровождать интерферометрические исследования объекта другими вида-

## *4.2 Наблюдение распространения тепла при локальном воздействии излучения в полосе поглощения объекта*

---

ми независимых исследований (например, спектральные исследования) или организовать воздействие на объект внешних факторов. В данной работе в качестве внешнего воздействия используется излучение лазера с длиной волны в полосе поглощения исследуемого объекта. Зондирующий пучок позволяет исследовать площадь объекта диаметром до 50 мм. В работе используется камера с разрешением 1280x960 пикселей и максимальной частотой съемки 15 кадров в секунду.

### МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Образец полимерного материала «Диффен», в форме диска, закрепленного в оправе, устанавливается в оптическую схему (рисунок 4.5, элемент 4) и облучается зондирующим излучением с  $\lambda = 532$  нм, которое не приводит к изменению оптических параметров исследуемого образца или не нагревает объект. Исследуемые образцы представляют собой диски диаметром до 40 мм и толщиной (1÷5) мм. В качестве воздействующего излучения, используется коллимированный пучок лазерного излучения с  $\lambda = 473$  нм диаметром около 3 мм. Поглощение воздействующего излучения вызывает обесцвечивание образца в области воздействия, а также его локальный нагрев как в области обесцвечивания, так и за его пределами за счет теплопроводности полимерного образца. Во время эксперимента обеспечивается дистанционное управление экспериментальным стендом и регистрация цифровых голограмм происходит в автоматическом режиме. Это гарантирует неизменность климатических условий, отсутствие воздействия других внешних факторов - вибраций, воздушных потоков и т.п. Время проведения одной экспериментальной серии составляет, как правило, не менее 30 минут; интервал между регистрацией голограмм - 1 секунда; экспозиция голограммы - 1/496 с. Серии голограмм могут быть получены при различной мощности воздействующего излучения от 15 до 50 мВт.

Обработка полученных голограмм включает ряд этапов. В первую очередь серия голограмм преобразуется в серию интерферограмм реального времени (рисунок 4.6а). Каждая такая интерферограмма получается вычитанием голограммы, которая характеризует состояние объекта в данный момент времени из голограммы, которая характеризует исходное состояние объекта (до начала воздействия излучения 473 нм). По интерферограмме реального времени производится расчет разности фаз для данного состояния объекта и построение цифровой интерферограммы по форму-

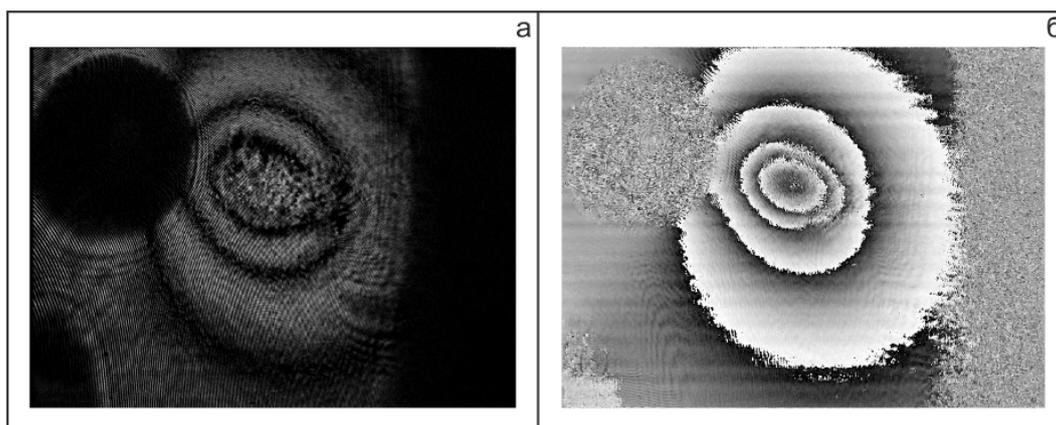


Рисунок 4.6 – Интерферограмма объекта в реальном времени (а) и цифровая интерферограмма объекта (б): воздействующее излучение –  $\lambda = 473$  нм;  $P = 45$  мВт;  $t = 100$  с

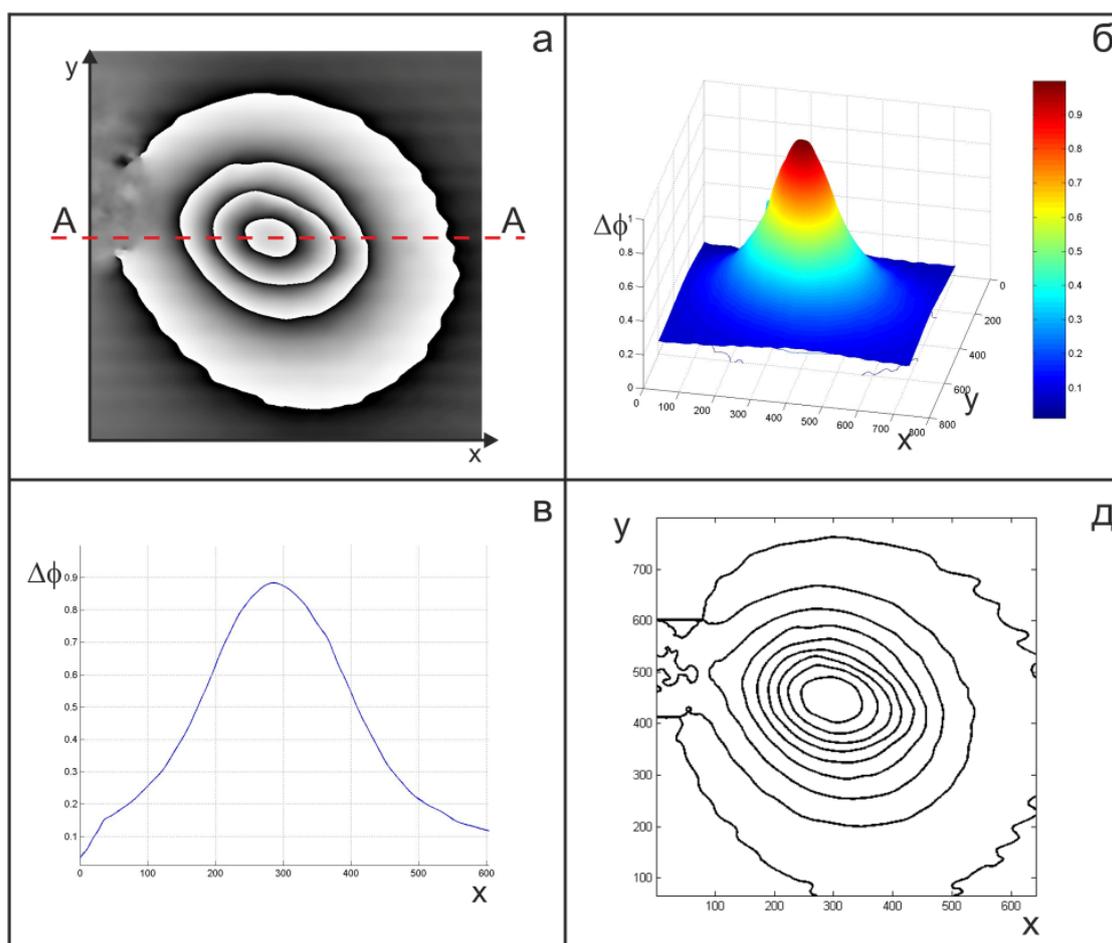


Рисунок 4.7 – Пример обработки результатов эксперимента: а – цифровая интерферограмма; б – поверхность разности фаз (phase map); в – развернутое распределение разности фаз (unwrapped phase) в сечении А-А; д – изофазные линии в плоскости наблюдения объекта. Воздействующее излучение –  $\lambda = 473$  нм;  $P = 45$  мВт;  $t = 20$  с

## 4.2 Наблюдение распространения тепла при локальном воздействии излучения в полосе поглощения объекта

---

лам [8]. Каждая цифровая интерферограмма представляет собой распределение разности фаз в плоскости наблюдения объекта, характеризующее изменение состояния объекта (рисунок 4.6б и рисунок 4.7а).

На рисунке 4.7 (б,в,д) можно видеть результаты компьютерной обработки, которые могут быть использованы в данной работе для представления данных, полученных по цифровой интерферограмме (рисунок 4.7а), в удобном виде: трехмерная поверхность изменения разности фаз (phase map) (рисунок 4.7б), развернутое распределение разности фаз (unwrapped phase) в сечении А-А (рисунок 4.7в), изофазные линии (изотермы) в плоскости наблюдения объекта (рисунок 4.7д).

Как видно из приведенных на рисунке 4.7 данных, область теплового воздействия излучения формирует на цифровой интерферограмме систему интерференционных колец (каждое из которых является изотермой) с центром в области воздействия излучения 473 нм. Разность фаз между двумя смежными кольцами,  $2\pi$ , определяет изменение оптических параметров объекта, фиксируемое в плоскости наблюдения. Кольцо №1, которое в процессе воздействия излучения возникает первым, имеет наибольший радиус ( $r_1$ ) и определяет разность фаз величиной  $2\pi$  между областью образца, подвергшейся воздействию тепловых эффектов (с температурой  $T_1 = T_0 + \Delta T_1$ ) и областью образца, находящейся в исходном состоянии (с температурой  $T_0$ ):  $\Delta\phi_1 = 2\pi$ . Кольцо №2 возникает вторым и определяет область образца с разностью фаз  $2 \cdot 2\pi$  (с температурой  $T_2 = T_0 + \Delta T_2$ ):  $\Delta\phi_2 = 4\pi$  и т.д.

Разность фаз в центре воздействия излучения ( $\Delta\phi_{\text{ц}}$ ) определяется в данный момент времени  $t$  по числу ( $N$ ) наблюдаемых интерференционных колец:  $\Delta\phi_{\text{ц}} = N \cdot 2\pi$ . Трехмерная поверхность изменения разности фаз в этом случае представляет собой усеченный конус. На рисунке 4.7б отчетливо виден центр воздействия излучения (вершина конуса) и область воздействия тепловых эффектов излучения. Развернутое распределение разности фаз в сечении А-А (рисунок 4.7в) и расположение изофазных линий, изотерм, в плоскости наблюдения (рисунок 4.7д) позволяют оценить влияние тепловых эффектов как в области воздействия излучения (центр интерференционной картины), так и в любой точке образца, находящейся на известном расстоянии ( $r$ ) от центра воздействия. Количество колец ( $N$ ), наблюдаемых в плоскости объекта, определяет максимальное изменение фазы в центре воздействия.

## АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

На рисунке 4.8 приведены результаты обработки типичной серии цифровых голограмм, полученных в эксперименте длительностью более 500 с. Процесс интенсивного поглощения излучения происходит в первые 50 секунд воздействия, при этом формируется интерференционная картина из пяти колец. В соответствии со справочными данными для полимера ПММА (см. таблицу 1) [5], можно предположить, что изменение фазы на  $2\pi$  соответствует изменению температуры образца на 0.2 К, что позволяет преобразовать распределение разности фаз в распределение поля температуры. (Следует отметить, что для корректного проведения данного преобразования требуются величины  $dl/dT$  и  $dn/dT$ , уточненные для конкретной модификации ПММА, используемой в исследуемых образцах.) В этом случае  $\Delta T_1 = 0.2$  К,  $\Delta T_2 = 0.4$  К,  $\Delta T_3 = 0.6$  К и т.д. На рисунке 4.8 (штриховые кривые) показано изменение со временем изотерм  $T_1(r_1)$  и  $T_3(r_3)$ .

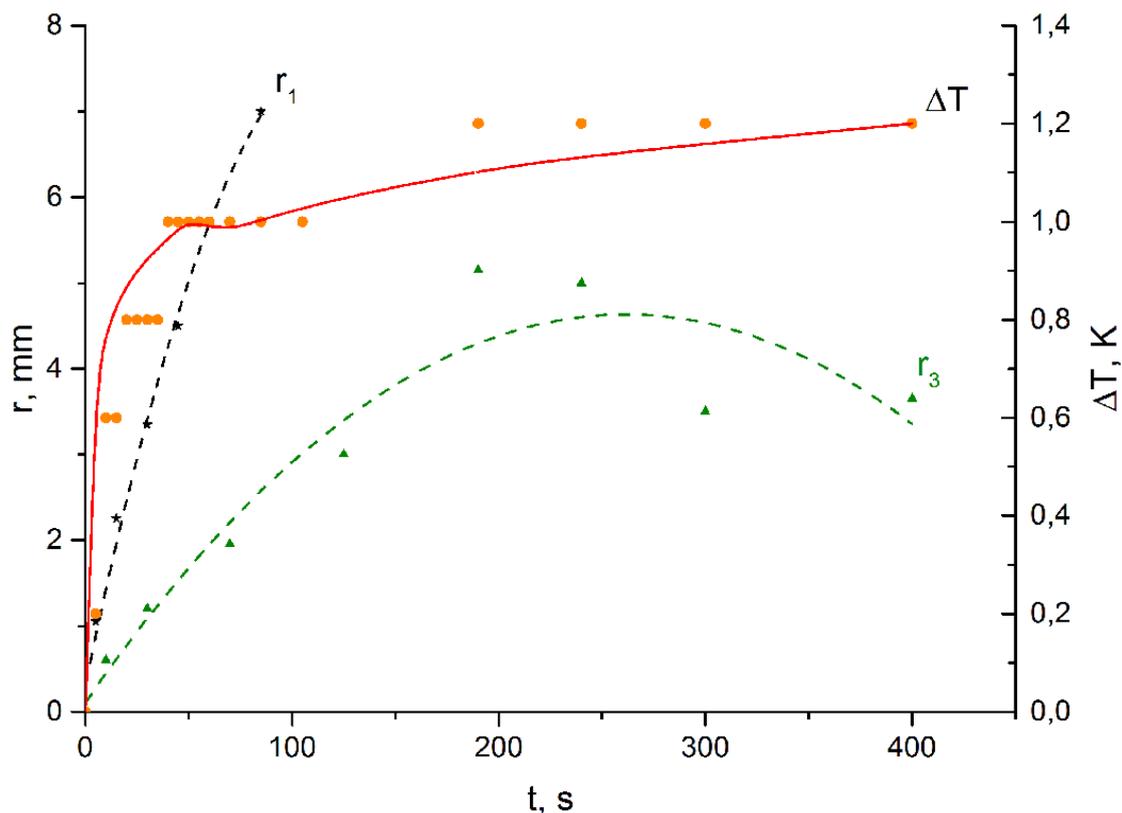


Рисунок 4.8 — Результаты, полученные при обработке типичной серии зарегистрированных голограмм. Штриховые кривые - временные изменения радиусов ( $r_1$  и  $r_3$ ) изотерм, определяемых интерференционными кольцами с разностью фаз  $\Delta\phi_1 = 2\pi$  и  $\Delta\phi_3 = 6\pi$ ;  $\Delta T$  – динамика изменения температуры в области воздействия излучения: эксперимент – точки, расчет – сплошная кривая

## 4.2 Наблюдение распространения тепла при локальном воздействии излучения в полосе поглощения объекта

Температуру в центре воздействия ( $T_{ц}$ ) можно определить по числу наблюдаемых колец, максимальное число которых в данном случае  $N = 6$ , т.е.  $T_{ц} = T_0 + 6\Delta T_1$  и  $\Delta T_{ц} = 1.2$  К. Изменение температуры в центре воздействия на рисунке 4.8 указано экспериментальными точками, сплошная кривая – теоретический расчет.

Математическое моделирование распространения тепла в образце было проведено в предположении точечного нагрева образца под действием падающего излучения. Мощность источника тепла считалась постоянной в течении времени  $t = 50$  секунд. Именно в этот период происходит интенсивное поглощение энергии и значительное обесцвечивание области воздействия излучения (пропускание образца,  $\tau$ , на длине волны 473 нм увеличивается от  $\tau_0 = 5\%$  до  $\tau_{50} = 30\%$ ). При больших временах поглощение энергии происходит менее интенсивно, о чем свидетельствует стабильное увеличение пропускания на небольшую величину ( $\tau_{100} = 32\%$ , а  $\tau_{400} = 37\%$ ), но распространение тепла из области воздействия продолжается. При расчетах теплопроводность вещества образца полагалась равной  $0.15$  Вт/(м·К), плотность  $1.174 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, удельная теплоемкость  $1.5 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К), толщина образца  $4 \cdot 10^{-3}$  м, мощность излучения  $45 \cdot 10^{-3}$  Вт.

Как видно, при указанных условиях эксперимента и использованных расчетных параметрах наблюдается хорошее совпадение экспериментальных и расчетных зависимостей изменения температуры образца в области воздействия излучения. Именно эта область является источником тепла, которое вызывает проявление тепловых эффектов за пределами воздействия излучения. Возможность визуально регистрировать появление новых интерференционных колец и оценивать изменение размера наблюдаемых колец позволяет детально изучать процесс нагрева и распространение тепла в образце, вызванные поглощением энергии излучения.

Таким образом, определение изменения температуры образца производится путем наблюдения интерференционных колец и их поведения во времени. Данная методика дает возможность изучать поведение образцов полимерной регистрирующей среды в процессе воздействия излучения и используется для оптимизации условий записи и считывания объемных полимерных голограмм.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Peng X., Yu Y., Wang Z., Qu W., Cheng C.Y., Yong S.S., Chia Y.P. Measurement of thermal effects in solid-state laser gain medium by digital holography // Proc. SPIE. 2014. V. 8959. P. 895922-7.

2. *Zhao J., Di J., Wu B., Wang J., Wang Q., Jiang H.* Visual and dynamic measurement of temperature fields by use of digital holographic interferometry // Proc. SPIE. 2013. V. 8788. P. 878828-7.
3. *Alexeenko I., Gusev M., Gurevich V.* Separate recording of rationally related vibration frequencies using digital stroboscopic holographic interferometry // Applied Optics. 2009. V. 48. N 18. P. 3475-3480.
4. *Andreeva O.V., Bandyuk O.V.* Light-Sensitive Media-Composites for Recording Volume Holograms Based on Porous Glass and Polymer. Holograms - Recording Materials and Applications, Dr Izabela Naydenova (Ed.), InTech, 2011.
5. *Veniaminov A.V. and Mahilny U.V.* Holographic Polymer Materials with Diffusion Development: Principles, Arrangement, Investigation, and Applications // Optics and Spectroscopy. 2013. V. 115. №6. P.906-930.
6. *Andreeva O.V., Korzinin Yu.L., Manukhin B.G.* Volume Transmission Hologram Gratings – Basic Properties, Energy Channelizing, Effect of Ambient Temperature and Humidity. Holography - Basic Principles and Contemporary Applications, Dr. Emilia Mihaylova (Ed.), InTech, 2013.
7. *Weber M.J.* Handbook of Optical Materials, CRC Press LLC, 2003.
8. *Pedrini G., Osten W., Gusev M.E.* High-speed digital holographic interferometry for vibration measurement // Applied Optics. 2006. V. 45. №. 15. P. 3456-3462.

**Миссия университета** – генерация передовых знаний, внедрение инновационных разработок и подготовка элитных кадров, способных действовать в условиях быстро меняющегося мира и обеспечивать опережающее развитие науки, технологий и других областей для содействия решению актуальных задач.

---

## **КАФЕДРА ФОТОНИКИ И ОПТОИНФОРМАТИКИ**

Кафедра фотоники и оптоинформатики создана в 2002 году и готовит бакалавров и магистров по образовательному направлению "Фотоника и оптоинформатика" для одной из инновационных областей современной науки и техники, в которой разрабатываются и создаются оптические и квантовые технологии сверхбыстрой передачи и записи информации; оптические системы искусственного интеллекта и сверхбыстродействующие оптические процессоры; информационные оптические системы, строящиеся на основе новых физических принципов, в том числе на нанотехнологиях.

На кафедре имеются научно-образовательные центры (НОЦ) и лаборатории, оснащенные новейшим оборудованием: НОЦ "Фемтосекундная оптика и фемтотехнологии"; НОЦ "Наноструктуры и метаматериалы для технологий обработки, передачи и хранения информации"; лаборатории: оптических технологий искусственного интеллекта, квантовой информатики, прикладной голографии, параллельных вычислений в нанофотонике и оптоинформатике, оптоинформатики, "Метаматериалы", терагерцовой биомедицины.

Студенты кафедры активно работают в научных центрах и лабораториях, участвуют в Международных конференциях, публикуют свои работы в ведущих мировых изданиях, являются членами Российских и Международных научных обществ.

Кафедра постоянно занимает призовые места по итогам конкурсов ведущих научно-педагогических коллективов Университета ИТМО.

Петров Николай Владимирович  
Шевкунов Игорь Александрович  
Андреева Ольга Владимировна  
Манухин Борис Глебович  
Дроздов Аркадий Анатольевич

## **ОСНОВЫ ОПТОИНФОРМАТИКИ**

**Методические материалы  
к виртуальному лабораторному практикуму  
«Методы цифровой голографии для задач оптоинформатики»**

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