

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

На правах рукописи

ЛЕ ЗУЙ ТУАН

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО И
ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ ОЦЕНКИ
КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ
СИСТЕМ**

Специальность: 05.11.07 - Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург
2008

Работа выполнена на кафедре Прикладной и компьютерной оптики факультета Оптико-информационных систем и технологий Санкт-Петербургского государственного университета информационных технологий, механики и оптики.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Кирилловский Владимир Константинович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Латыев Святослав Михайлович

кандидат технических наук, доцент
Анитропова - Лившиц Ирина Леонидовна

Ведущая организация: ОАО ЛОМО

Защита состоится <<4>> марта 2008 года в 15.30 часов на заседании диссертационного совета Д 212.227.01 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» при Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий, механики и оптики по адресу: Санкт-Петербург, пер. Гривцова, д. 14, ауд. 314.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке СПбГУ ИТМО.

Отзывы и замечания (в двух экземплярах) по автореферату направлять по адресу: 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49, секретарю диссертационного совета Д.212.227.01

Автореферат разослан <<1>> февраля 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.227.01
Кандидат технических наук, доцент

Красавцев В.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Развитие оптико-электронных приборов и комплексов, например, наблюдательных оптических приборов, особенно – космических, цифровых камер, медицинских приборов, оптических систем для микроэлектроники сопровождается повышением требований к качеству изображения, даваемого оптическими системами. Для получения требуемого качества изображения необходимо оценивать основные параметры, характеризующие качество изготовления оптических систем, с необходимой точностью.

Выполнение этих задач невозможно без совершенствования и развития методов и средств контроля и аттестации оптической продукции; возможностями этих средств в настоящее время во многом определяется успешное развитие оптической промышленности и аппаратуры. В то же время применяемые в производстве средства оптического контроля и исследования нередко по своим возможностям не удовлетворяют указанным требованиям. В целом производство испытывает нехватку современных приборов оптического контроля. Преобладают субъективные визуальные оценки. Слабо решаются задачи комплексного оснащения рабочих мест в условиях крупномасштабного производства, эксплуатации, ремонта и торговли.

В последнее время развиваются новые средства оптических измерений, которые основаны на достижениях цифровой техники и цифровой обработки изображений. Такие устройства оснащаются видеокамерой, которая подключена к компьютеру. В результате обработки и анализа цифровых изображений, которые дает камера, получаем результаты контроля и измерений.

Данная работа служит для решения указанных проблем путем применения новых технологий в нетрадиционном сочетании методов оптики, электроники и информатики. При этом выполнен анализ их достоинств и недостатков, предложены способы повышения точности и эффективности контроля и исследования, разработаны пакеты программ для обеспечения функционирования установок оценки качества изображения оптических систем с новыми возможностями.

Цель работы:

Целью настоящей работы являются разработка и исследование усовершенствованного алгоритмического и программного обеспечения для решения задач оценки качества изображения прецизионных оптических систем.

В соответствии с поставленной целью решались следующие задачи:

- 1) исследование общих принципов и традиционных методов оценки качества изображения оптических систем, поиск путей повышения точности оценок;

- 2) разработка математических основ компьютерной изофотометрии ФРТ с изменяющимся временем накопления и программного обеспечения для установки оценки качества изображения по методу изофотометрии ФРТ;
- 3) разработка математических основ компьютерной изофотометрии ФРЛ с изменяющимся световым потоком и программного обеспечения для установки оценки качества изображения по методу изофотометрии ФРЛ;
- 4) разработка принципов расшифровки и интерпретаций интерферограмм сдвига и метода восстановления деформаций волнового фронта по двум интерферограммам сдвига;
- 5) разработка комплексного программного обеспечения для обработки как интерферограмм сдвига так и классических интерферограмм;

Научная новизна работы заключается в следующем:

- Исследовано влияние динамического диапазона регистрации освещенности в ФРТ на точности определения ЧКХ и показан характер этого влияния.

- Впервые разработаны теоретические основы методов компьютерной изофотометрии ФРТ и ФРЛ, они глубоко проанализированы и интерпретированы применительно к задаче создания алгоритмов и программного обеспечения.

- На основе созданной теоретической базы разработаны алгоритмы и программы, которые обеспечивают динамический диапазон регистрации освещенности в ФРТ до $10^3 - 10^5$ при безукоризненной полноте передачи дифракционных осцилляций в изображении тест-объекта.

- Показано, что погрешность определения ФРТ по методу компьютерной изофотометрии не превышает 1,5%, погрешность после расчета ЧКХ не более 5%.

- Впервые найдены достаточно простые и эффективные пути восстановления деформаций волнового фронта из интерферограмм сдвига.

- Разработан математический аппарат и рассчитана зависимость погрешности метода компьютерной расшифровки интерферограмм от пиксельного разрешения приемника изображения в интерферометре.

- Найдены пути повышения точности алгоритмической расшифровки интерферограммы в $5 \div 10$ раз благодаря применению метода наименьших квадратов.

- Разработано и исследовано эффективное программное обеспечение для обработки интерферограмм сдвига.

Достоверность результатов диссертации обеспечена корректностью постановки задач, использованием обоснованных методов анализа и расчета, внутренней непротиворечивостью результатов исследования.

Практическая ценность работы:

- разработаны алгоритмы, которые позволяют автоматически определить ряды изофот и вычислить массив данных ФРТ по методу изофотометрии в расширенном динамическом диапазоне до $10^4 - 10^5$.
- Разработана программа «КИЗО-ФРТ», которая позволяет измерить ФРТ в диапазоне интенсивностей $4 \div 5$ порядков и преобразовать измеренные значения ФРТ для получения различных характеристик качества изображения оптических систем, таких как ЧКХ, ФРЛ, ПК, ФКЭ с повышенной точностью и надежностью.
- Разработана и исследована компьютеризированная установка контроля качества изображения оптических систем на основе скамьи ОСК-2ЦЛ. Выполнен расчет основных узлов схемы установки, ее оснащение матричным приемником изображения и компьютером с эффективным программным обеспечением «КИЗО – ФРТ».
- Выполнена оценка погрешности метода изофотометрии ФРТ на основе математического анализа и ряда экспериментов. Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРТ по методу изофотометрии не превышает 1,5%, погрешность после расчета ЧКХ не более 5%.
- Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, которое позволяет измерить ФРЛ по методу изофотометрии и преобразовать измеренные значения ФРЛ для получения различных характеристик качества изображения оптических систем, таких как ЧКХ, ПК, ФКЭ. Рабочая скорость программы достаточно высока, что позволяет получать результаты измерений в реальном времени, что повышает эффективность операции контроля и юстировки в условиях производства.
- Разработана и исследована компьютеризированная установка контроля качества изображения оптических систем по ФРЛ на основе скамьи ОСК-2ЦЛ. Выполнен расчет основных узлов схемы установки и компьютерной оснащение для получения результатов контроля в реальном времени.
- Выполнена оценка погрешности метода изофотометрии ФРЛ на основе математического анализа и экспериментов. Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРЛ по методу изофотометрии ФРЛ не превышает 1%, погрешность после вычисления ЧКХ не выше 5%.
- Разработан макетный интерферометр сдвига с оснащением ПЗС-камерой, компьютером и программным обеспечением для автоматической регистрации интерферограмм и их интерпретации.
- Разработаны алгоритм и программа для моделирования и исследования интерферограмм сдвига.
- Разработаны алгоритм и программа расшифровки интерферограмм сдвига методом восстановления функции деформаций волнового фронта путем решения системы дифференциальных уравнений, полученных при обработке двух интерферограмм с взаимно-перпендикулярным направлением сдвига.

- Разработан альтернативный алгоритм расшифровки интерферограмм, дающий снижение влияния шумов и существенно повышение точности.
- Разработана программа “Tiger”, которая выполняет регистрацию, обработку и анализ интерферограмм с целью получения информации об ошибках волнового фронта, а также анализирует влияние деформаций волнового фронта на исследуемые характеристики качества изображения.

Основные результаты, выносимые на защиту:

1. Математические основы метода компьютерной изофотометрии функции рассеяния точки.
2. Система алгоритмов и программы для автоматического определения функции рассеяния точки по методу изофотометрии.
3. Математические основы метода компьютерной изофотометрии функции рассеяния линии.
4. Система алгоритмов и программы для автоматического определения функции рассеяния линии по методу изофотометрии.
5. Способ восстановления волнового фронта при обработке интерферограмм сдвига.
6. Алгоритм и программа расшифровки интерферограмм сдвига методом восстановления функции деформаций волнового фронта путем решения системы дифференциальных уравнений, полученных при обработке двух интерферограмм с взаимно-перпендикулярным направлением сдвига.
7. Алгоритм расшифровки интерферограмм, дающий снижение влияния шумов и существенное повышение точности.

Апробация основных результатов

Материалы диссертации докладывались на следующих 5 международных и российских конференциях, совещаниях и симпозиумах: VII Международной конференции «Прикладная оптика-2006» (2006 г., Санкт-Петербург); III Межвузовской конференции молодых учёных СПбГУ ИТМО 2006, IV Межвузовской конференции молодых учёных СПбГУ ИТМО 2007; Международная конференция «Фундаментальные основы лазерных микро- и нанотехнологий» (FLAMN-2007); Научная и учебно-методическая конференция СПбГУ ИТМО в 2007

Публикации

Основные результаты диссертации изложены в 7 статьях в российских научных журналах и сборниках, список которых приводится в конце автореферата.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и четырех приложений, списка цитируемой литературы, включающего **58** наименований. Общий объем работы составляет **132** страниц, включая **65** рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приводится обзор литературы, обосновывается актуальность избранной темы, формулируются цель работы, ее задачи, защищаемые положения, научная новизна и практическая значимость, описывается структура диссертации.

Первая глава посвящена исследованию общего способа оценки качества изображения оптических систем. Приведенный обзор позволяет классифицировать эти методы на две группы: методы косвенные и прямые.

Оба группы методов имеют свои достоинства и недостатки, но они хорошо дополняют друг друга, так как недостатки одной группы методов компенсируются достоинствами другой. Общая цель методов – определение базовой функции, характеризующей работу оптической системы (функция деформации волнового фронта в косвенном методе и функция рассеяния в прямом методе). Затем с помощью математических средств преобразуют эти функции в различные характеристики качества изображения оптических систем, такие как, например ЧКХ, ФКЭ, пограничная кривая.

Исследование, выполненное в этой главе, показывает, что для определения по ФРТ характеристик качества оптических систем на соответствие требованиям, предъявляемым к изображению, нужно измерить функцию рассеяния точки (ФРТ) в диапазоне освещенности свыше 4 порядков.

В результате проведенного анализа предложены следующие задачи исследования:

– Разработка и исследование алгоритмического и программного обеспечения для компьютеризированной установки оценки качества оптических систем по функции рассеяния. При этом диапазон регистрируемой освещенности составляет $10^4 \div 10^5$. Погрешность при преобразовании в другие характеристики меньше 5%.

– Разработка и исследование алгоритмического и программного обеспечения для определения функции деформации волнового фронта на основе обработки интерферограмм сдвига.

Во **второй главе** рассмотрены традиционные методы оценки качества изображения и их достоинства и недостатки.

Исследование и анализ метода количественной оценки качества изображения оптических систем по ФРТ и ФРЛ показывают, что каждый из них имеет свои достоинства и недостатки. Например, метод видео-сканирования широко используется из-за его простоты и оперативности, но он не позволяет измерить ФРТ с высокой точностью, так как динамический диапазон регистрации ФРТ по данному методу не выше 10^2 , что не позволяет определить ЧКХ с погрешностью меньше 10%.

При этом принципы изофотометрии, рассмотренные в этой главе для условий применения фотографического приемника изображения, полностью

соблюдаются при использовании качественно иных приемников изображения, например таких, как телевизионные приемники, включая видеокамеры широкого назначения, а также цифровые фотографические камеры. Они способны изменять время накопления в широком диапазоне, что обеспечивает перепады регистрируемой освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков.

К недостаткам метода изофотометрии можно отнести необходимость получения серии кадров с нарастающим временем экспозиции; это требование без применения компьютерных технологии приводит к снижению оперативности исследований. Поэтому данная работа посвящена развитию метода изофотометрии. Глубоко проанализированы теоретические основы методов изофотометрии. Выполнено объединение метода изофотометрии и метода видео-сканирования с помощью достижений информационных технологий для получения нового метода оценки качества оптических систем – компьютерной изофотометрии, на основе которого разработано новое поколение установок со следующими достоинствами: простотой, высокой скоростью (работа в реальном времени) и высокой точностью (погрешность меньше 5%).

Третья глава посвящена разработке и исследованию метода компьютерной изофотометрии для анализа характеристик качества изображения по функции рассеяния точки.

В **разделе 3.1** показаны разработанные математические основы метода компьютерной изофотометрии ФРТ. метод основан на регистрации серии фотоснимков пятна рассеяния с переменным временем экспозиции на одной и тоже ПЗС-матрице (рис. 1), управляемой компьютером.

Из фотоснимка можно выделить совокупность точек P_i . Которые имеют один и то же уровень освещенности. Такие точки составляет контур, который назван изофотой (слово «изофота» имеет значение - линия одинаковых освещенностей).

Уровень освещенности в точках изофоты соответствует времени накопления при регистрации фотоснимка.

Найдена формула для определения значений ФРТ во всех точках изофоты:

$$h_{P_i} = \frac{K}{t_1}, \text{ при } i = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

где h_{P_i} - значения ФРТ в точке P_i для изофоты 1;

t_1 – время накопления при регистрации фотоснимка, из которого выделена изофота 1;

K – постоянная величина, которая зависит от внутренних параметров системы регистрации.

ФРТ в относительных единицах для ряда изофот определяется по формуле:

$$\tilde{h}_{p_j} = \frac{h}{h_{\max}} = \frac{K}{t_j} \cdot \frac{t_{\min}}{K} = \frac{t_{\min}}{t_j} \text{ при } j = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (2)$$

где \tilde{h}_{p_j} - значения ФРТ для изофоты j ;

t_j - время накопления при регистрации фотоснимка, из которого выделена изофота j .

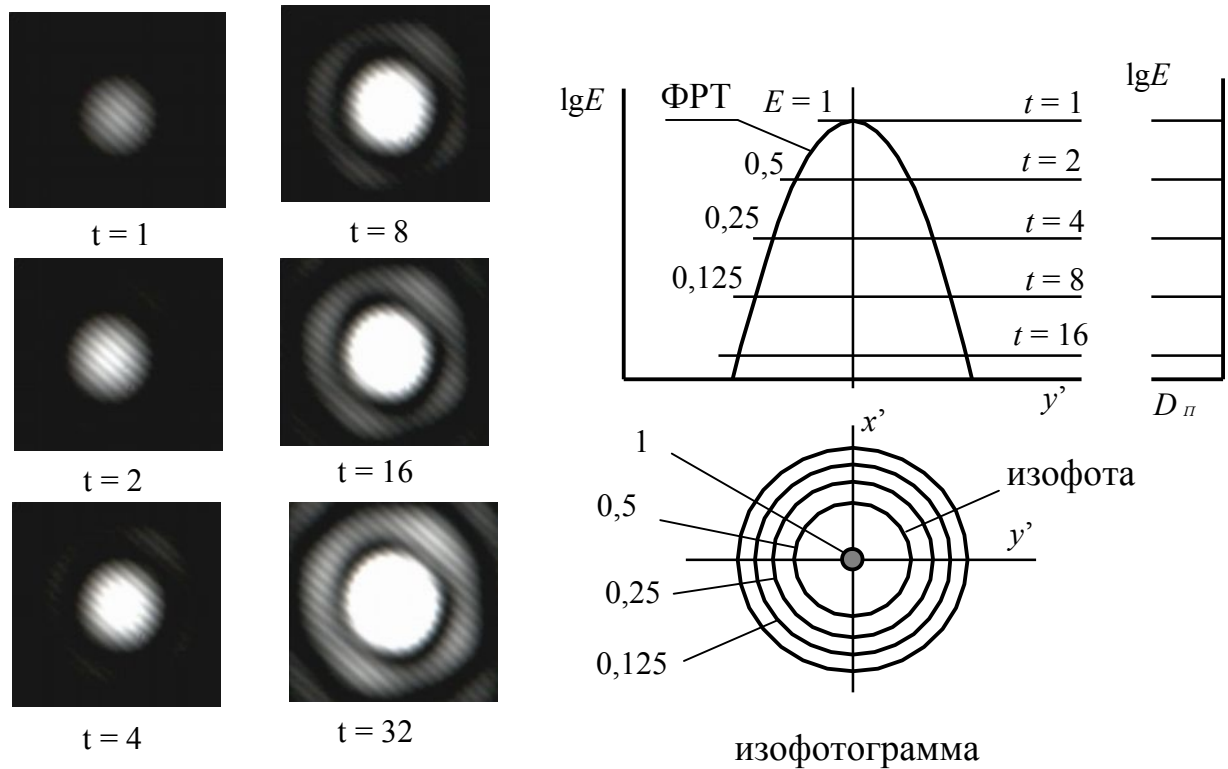


Рис. 1. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления и вид изофотограммы

Диапазон регистрации освещенности по данному методу не зависит от протяженности рабочего участка световой характеристики фотоприемника, а зависит от диапазона изменения времени накопления, который может быть свыше 10^3 .

В разделе 3.1 также разработаны алгоритм выделения изофоты и алгоритм определения ФРТ. В результате запоминания ряда фотометрических сечений и построения в пространственных координатах их исходного взаимного расположения формируется объемная диаграмма ФРТ, т.е. графическое отображение функции распределения освещенности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой. Двумерный массив численных значений ФРТ фиксируется в памяти компьютера и далее используется для вычисления ряда характеристик качества изображения, таких как ФРЛ, ЧКХ, ФКЭ.

На основе созданного алгоритма разработано программное обеспечение "КИЗО-ФРТ" («компьютерная изофотометрия») (рис. 2). Таким образом можно констатировать создание нового метода - компьютерной изофотометрии с

изменяющимся временем накопления. С помощью матричной камеры, управляемой компьютером, и с применением созданного программного обеспечения метод позволяет определить массив значений ФРТ и обработать результаты измерения для получения ряда характеристик качества изображения исследуемого объектива.



Рис. 2. Структура программного обеспечения «КИЗО-ФРТ»

В разделе 3.2 показана разработанная установка контроля качества изготовления оптических систем (рис. 3) по методу компьютерной изофотометрии. Она исполнена на базе скамьи ОСК-2ЦЛ. Установка обеспечивает определение характеристик качества изображения оптических систем с фокусным расстоянием до 500 мм, диаметром входного зрачка до 150 мм. Погрешность определения ЧКХ и ФКЭ меньше 5%.

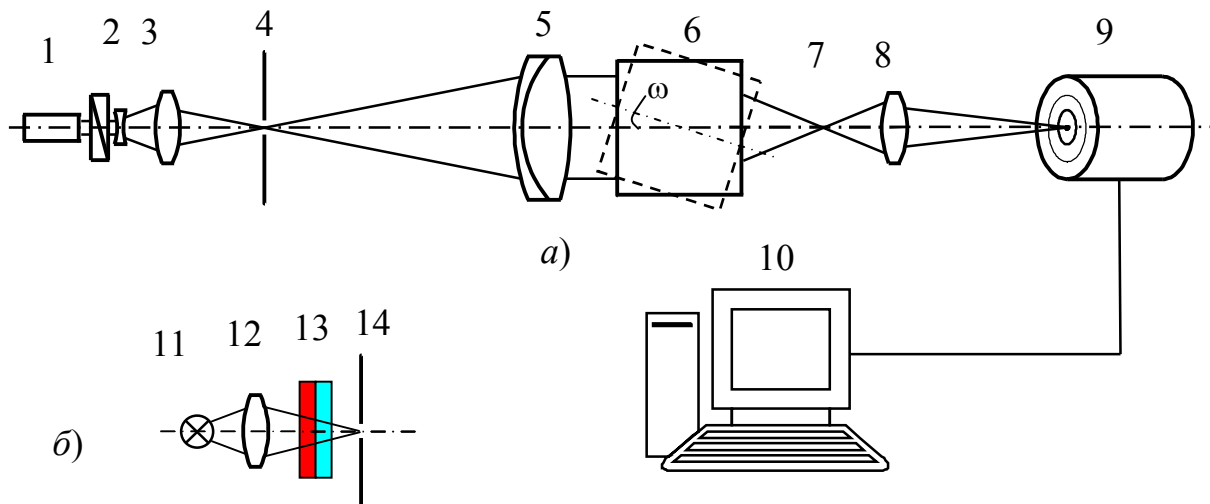


Рис. 3. Схема установки для измерения ФРТ фотообъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления при помощи ПЗС-камеры: 1 – лазер; 2 - фотометрический клин; 3 - система для фокусировки лазерного пучка; 4 - точечная диафрагма; 5 - объектив коллиматора; 6 - исследуемый объектив; 7 - изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния); 8 - проекционный микро-объектив; 9 – видеокамера (приемник изображения); 10 – компьютер; 11 – лампа накаливания; 12 – конденсор; 13 – светофильтр; 14 – точечная диафрагма;

В разделе 3.3 представлены экспериментальные результаты оценки качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» при использовании источника белого света (рис. 4). Разрешающая способность объектива по критерию Фуко составляет 30 мм^{-1} , что соответствует требованиям, предъявляемым к кинообъективам и элементам фотоаппаратуры, выпускавшимся в СССР до 1988 г.

В разделе 3.4 выполнена оценка погрешности метода изофотометрии ФРТ на основе математического анализа и ряда экспериментов. Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРТ по методу изофотометрии не превышает 1,5%, погрешность после расчета ЧКХ не более 5%.

Четвертая глава посвящена разработке и исследованию компьютерной изофотометрии для анализа характеристик качества изображения по ФРЛ.

В разделе 4.1 найдена формула для определения ФРЛ в точке (x, y) по методу изофотометрии:

$$L(x) = K/\tau(y), \quad (3)$$

где K – постоянная величина, которая зависит от внутренних параметров камеры; $\tau(y)$ – функция пропускания фотометрического клина (рис. 5); x, y – линейные координаты на плоскости ПЗС-матрицы;

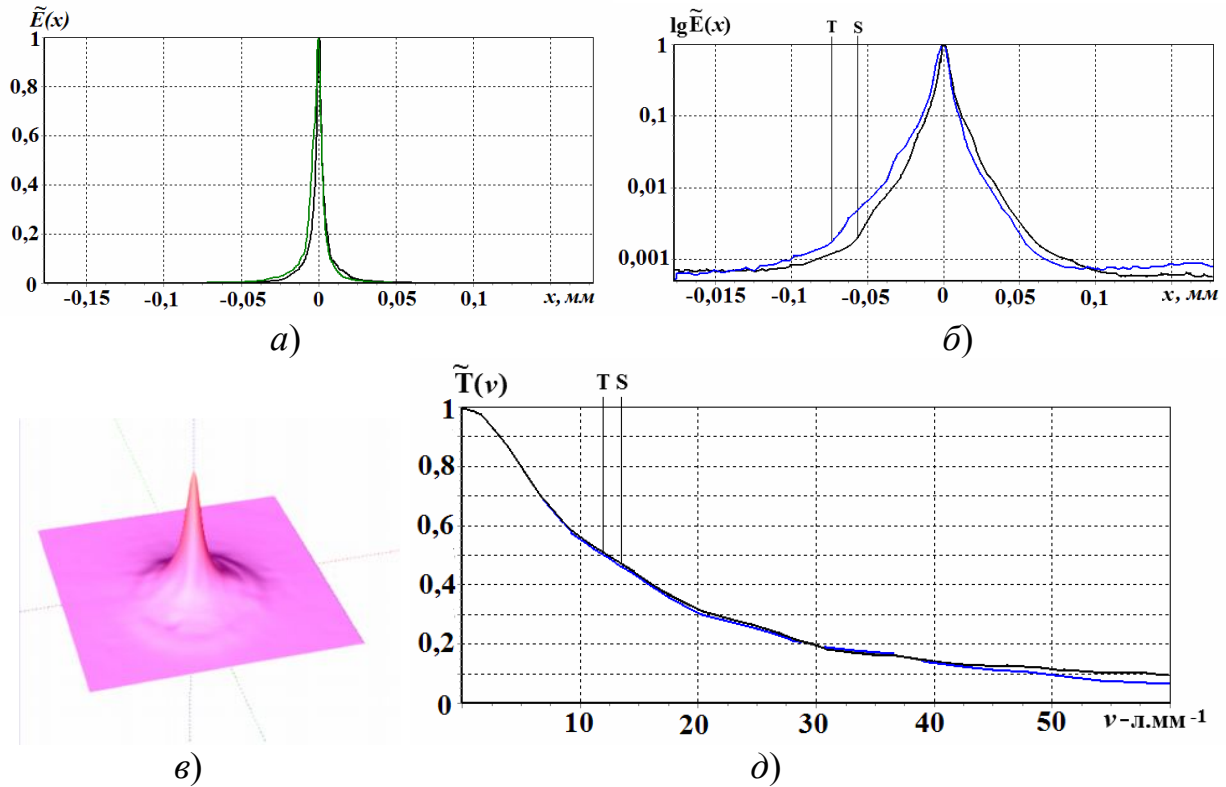


Рис. 4. Характеристики качества изображения фотообъектива Гелиос-44 при использовании белого света; точка предмета лежит на оптической оси: а) ФРТ в линейном масштабе; б) ФРТ в логарифмическом масштабе; в) объемная фигура ФРТ; д) график ЧКХ.

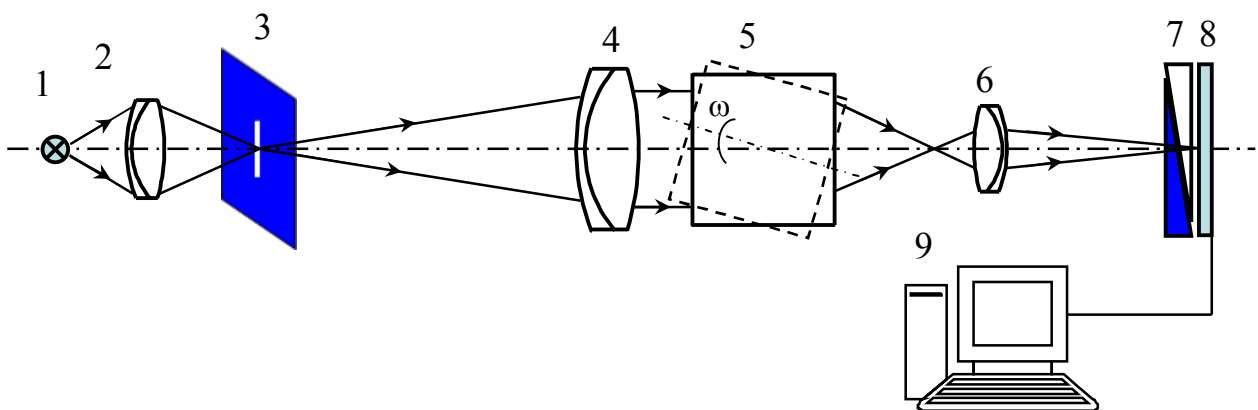


Рис. 5. Схема установки измерения ФРТ по методу изофотометрии 1- лампа; 2 – конденсор; 3 – узкая щель (тест – объект); 4 – объектив коллиматора; 5 - исследуемый объект; 6 –микрообъектива; 7–фотометрический клин; 8–ПЗС-камера; 9–компьютер;



Рис. 6 – Структурная схема программы КИЗО ФРЛ

При переходе в относительным единицам можно пренебречь K , тогда ФРЛ составит

$$L(x) = \frac{\min[\tau(y)]}{\tau(y)} \quad (4)$$

На основе предыдущего математического анализа разработана программа КИЗО-ФРЛ, которая оперативно обрабатывает изображения, полученные ПЗС камерой, для определения ФРЛ и других характеристик качества изображения оптических систем в реальном времени. Структура программы показана на рис. 6.

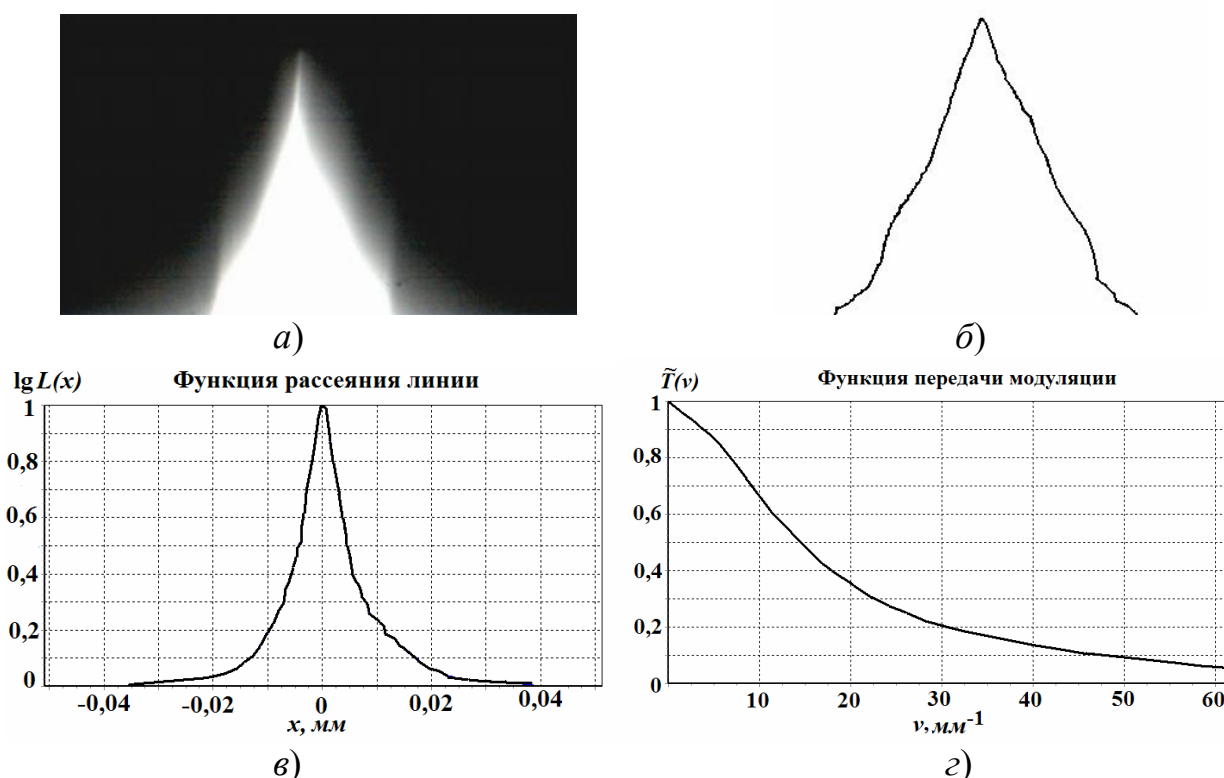


Рис. 7. Экспериментальная оценка качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» для осевой точки по методу изофотометрии ФРЛ: а) изображение тест-объекта (светящаяся линия), зарегистрированное ПЗС-камерой с фотометрическим клином; б) контур ФРЛ после обработки изображения тест-объекта; в) ФРЛ в линейном масштабе; д) кривая ЧКХ, полученная обработкой ФРЛ методом преобразования Фурье

Описанная выше установка построена в лаборатории оптических измерений кафедры ПиКО СПб ИТМО на основе скамьи ОСК-2ЦЛ. Создана установка (схема на рис. 5) и разработано программное обеспечение, названное «КИЗО-ФРЛ». Этот аппаратно-программный комплекс позволяет определять ФРЛ исследуемой оптической системы в динамическом диапазоне свыше 10^3 и обрабатывать измеренные данные для получения характеристик качества изображения, формируемого оптической системой, таких как ЧКХ (ФПМ), ПК и ФКЭ. Частота сеансов измерения для данной установки с созданным

программным обеспечением достигает $15 \div 20$ измерений в секунду, что позволяет исследовать свойства оптических систем в реальном времени в разных условиях работы, например, следить за изменением кривой ЧКХ в процессе фокусировки, при перемещении тест-объекта по полю или при регулировке (юстировке) детали в исследуемой системе. Такие возможности позволяют оценивать исследуемую систему в процессе ее сборки для получения наилучшего качества изображения.

Указанное преимущество в оперативности контроля позволяет рекомендовать данную установку к применению для оценки качества изображения изготовленных оптических систем в серийном производстве.

На рис. 7 представлены результаты определения характеристик качества изображения фотообъектива «Гелиос–44» на разработанной установке.

Выполнена оценка погрешности метода изофотометрии ФРЛ на основе математического анализа и экспериментов. Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРЛ по методу изофотометрии ФРЛ не превышает 1%, погрешность после вычисления ЧКХ не выше 5%.

Пятая глава посвящена исследованию косвенных методов контроля оптики и разработке системы алгоритмов и программ обработки интерферограмм.

В **разделе 5.1** представлены краткое описание интерференционного метода, его возможности и анализ источников погрешностей в этом методе.

Далее в **разделе 5.2** представлены схема и принцип работы интерферометра сдвига (рис. 8). Интенсивность в произвольной точке в интерференционной картине выражает формула:

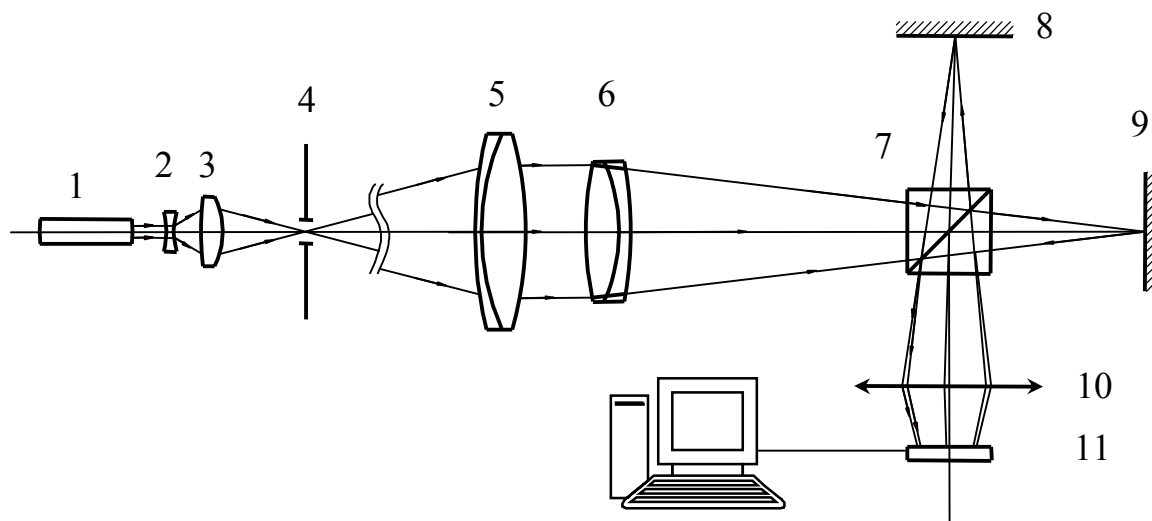


Рис. 8. Схема интерферометра бокового сдвига

1 – лазер; 2 и 3 – осветительный объектив; 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив; 6 – исследуемый объектив; 7 – светоделительный кубик; 8 и 9 – плоские автоколлимационные зеркала; 10 – объектив регистрирующей камеры; 11 – матрица регистрирующей камеры

$$I(x, y) = 2I_0 \left[1 + \cos \left(2\pi \frac{\Delta W(x, y)}{\lambda} \right) \right], \quad (5)$$

где I_0 - интенсивность каждой из световых волн,
 $\Delta W(x, y)$ - разность хода,
 λ - длина волны излучения.

На базе принципа разработаны алгоритм и программа для моделирования и исследования интерферограмм сдвига.

На рис. 9 показан действующий макет интерферометра сдвига.

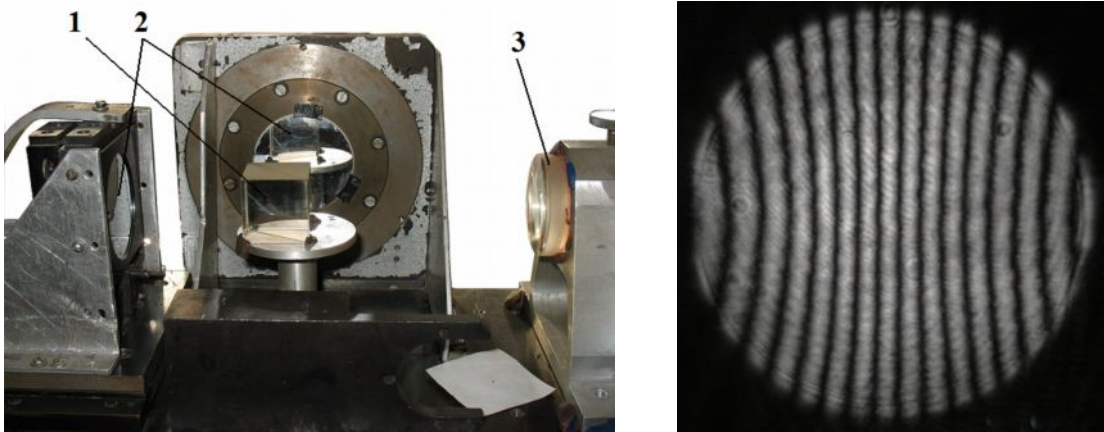


Рис. 9. Общий вид интерферометр сдвига и Экспериментальная интерферограмма сдвига: 1 – зеркала; 2 – светоделительный кубик; 3 – исследуемый объектив

Далее в этом разделе показанные разработанные алгоритм и программа расшифровки интерферограмм сдвига методом восстановления функции деформаций волнового фронта путем решения системы дифференциальных уравнений,

$$\begin{cases} \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = P_x(x, y) \\ \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = P_y(x, y) \end{cases} \quad (6)$$

где $P_x(x, y)$ - полином Цернике, полученный при обработке интерферограммы с сдвигом по оси x ;

$P_y(x, y)$ - полином Цернике, полученный при обработке интерферограммы с сдвигом по оси y .

Система уравнений (6) решается численным методом Рунге – Кутта. В результате этого получаем функцию деформаций волнового фронта.

Раздел 5.3 посвящен исследованию и модернизации интерферометра сдвига с дифракционной решеткой Ронки. Здесь представлена схема Ронки с диафрагмой, установленной в фокальной плоскости (рис. 10). Вычислен диаметр диафрагмы, который позволяет схеме Ронки работать как интерферометр сдвига.

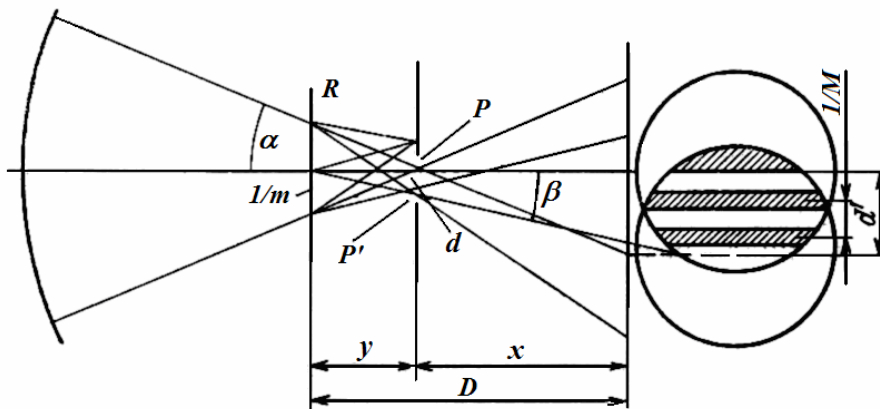


Рис. 10. Схема Ронки с диафрагмой: R – линейная решетка; P – диафрагма выделяет 2 дифракционных порядка.

В разделе 5.4 проводим исследование интерферометра с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом. Здесь представлено краткое описание структуры и работы интерферометра, его достоинства и методика проведения измерения. Далее анализируем точность обработки интерферограмм, регистрируемых ПЗС-камерой.

В разделе 5.5 рассмотрены основные этапы компьютерной обработки интерференционных картин:

1. Предварительная обработка интерферограммы с целью устранения шума;
2. Определение центра и преимущественного направления полос;
3. Отслеживание полос и расстановка точек на экстремумах;
4. Вычисление и отображение функции, характеризующей деформации волнового фронта.

В указанном процессе этап 3 играет большую роль. Рассмотрены факторы, влияющие на качество обработки интерферограмм. В первой версии программы мы используем алгоритм, который основан на «скольжении прямоугольника» по полосе и распознавании ее (рис. 11).

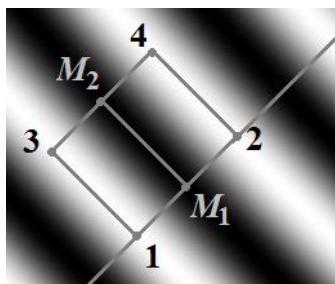


Рис. 11. Слежение по полосе

В разделе 5.6 приведен разработанный алгоритм для повышения точности определения координат экстремумов, то есть повышения точности обработки интерферограмм. Предлагаемый алгоритм определения координат

экстремальных точек интерферограммы использует информацию всех точек в сечении. Для этого перед процессом обнаружения экстремальных точек программа выполняет аппроксимацию сечения методом наименьших квадратов, тогда все точки в сечении участвуют в создании аппроксимирующего полинома. Определение экстремума полинома становится проще и результат увереннее (рис. 12).

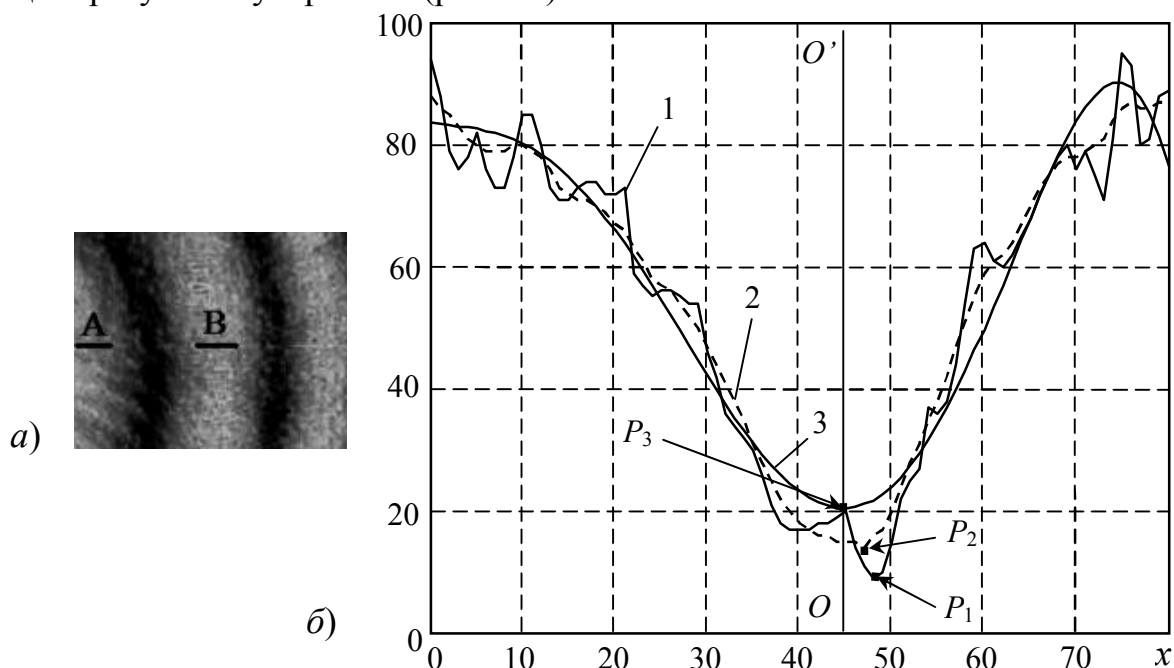


Рис. 12. К алгоритму повышения точности определения координат полос интерферограммы: а) участок интерферограммы; б) распределение пиксельной яркости в сечении АВ: 1 – исходное распределение; 2 – распределение после фильтрации шумов; 3 – распределение при аппроксимации.

На основе созданного алгоритма оцифровки разработана программа “Tiger” (рис. 13), которая позволяет регистрировать, обрабатывать и анализировать интерферограммы с целью получения информации о волновом фронте, и далее анализировать влияние деформаций волнового фронта на характеристики качества изображения. Особенность программы “Tiger” состоит в том, что она может автоматически анализировать не только классические интерферограммы с образцовым волновым фронтом, но и интерферограммы сдвига методом обработки двух сдвиговых интерферограмм, полученных с применением направления сдвига последовательно по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Программа имеет следующие возможности и особенности:

1. Регистрация интерферограмм с использованием устройств, работающих с библиотекой “Microsoft DirectX”.
2. Выполнение предварительной обработки изображения интерферограммы с целью повышения качества расшифровки (в частности, фильтрация шумов изображения).

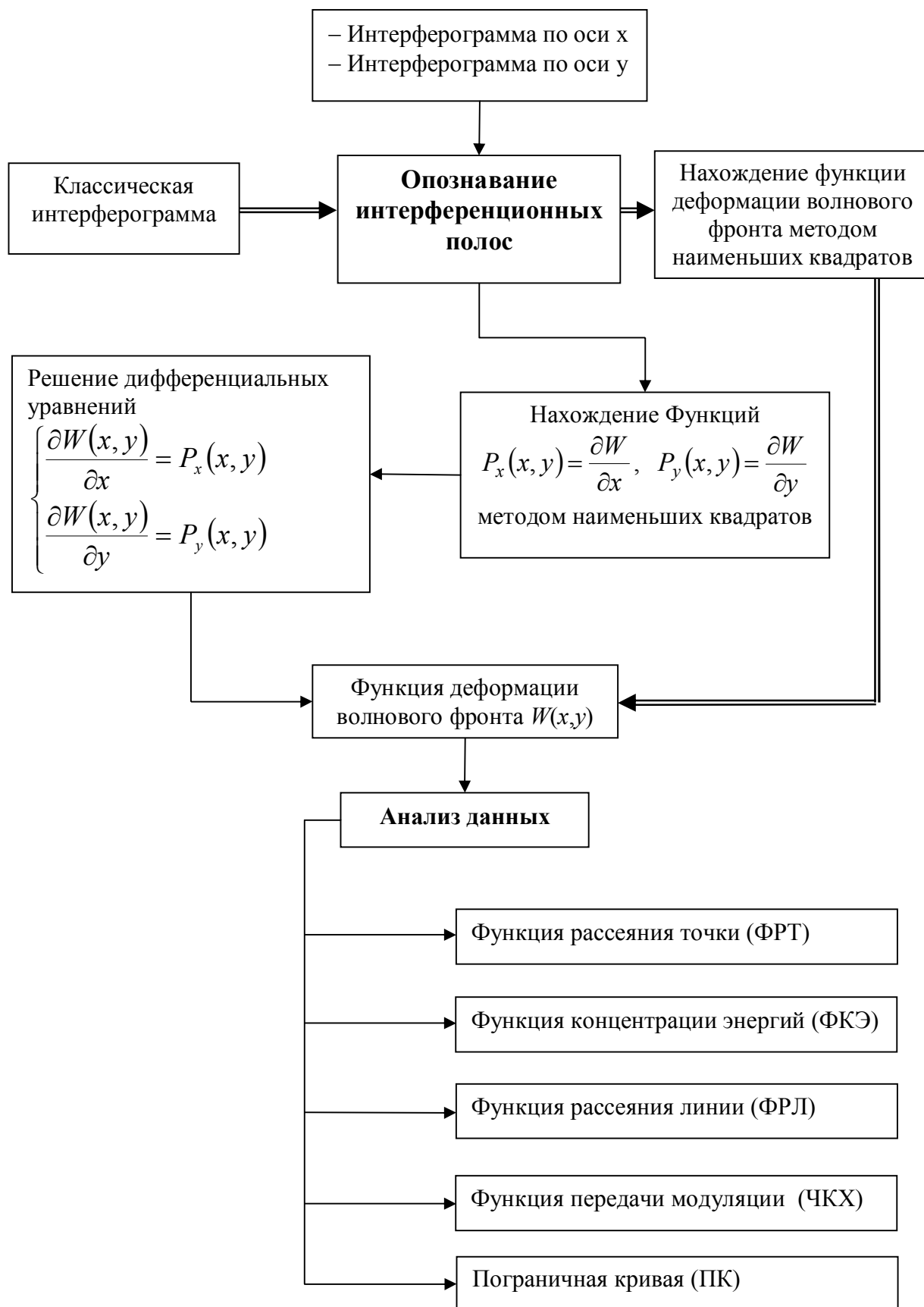


Рис. 13. Структурная схема программы «Tiger»

3. Выполнение автоматизированной оцифровки интерферограммы по усовершенствованному алгоритму с повышенной точностью.

4. Определение функции, характеризующей интерферограмму (функция деформаций волнового фронта для классической интерферограммы или функция первой производной деформаций волнового фронта для интерферограммы сдвига).

5. Выполнение решения системы уравнений дифференциального волнового фронта по методу “Рунге-Кутта” для восстановления деформаций волнового фронта (эта функция необходима только при обработке интерферограмм сдвига).

6. Выполнение математических операций для получения характеристик качества изображения, таких как ФРТ, ФРЛ, ПК, ФКЭ, ФПМ (ЧКХ).

В **Приложении 1** показаны интерфейс программы «КИЗО-ФРТ» и экспериментальные результаты оценки качества изображения объективов с различными назначениями.

В **Приложении 2** показан интерфейс программы «КИЗО-ФРЛ»

В **Приложении 3** показаны интерфейс программы “Tiger”, результаты обработки интерферограмм в программе “Tiger” и пример моделирования и обработки интерферограмм сдвига.

В **Приложении 4** показано исследование характеристик ближнепольных оптических зондов с помощью программы «КИЗО ФРТ» для регистрации распределения дальнего светового поля от зондов.

В **Заключении** приведен обзор основных полученных результатов и следующие из них выводы.

1. Проведено исследование способов оценки качества изображения, их связи с процессом формирования оптических изображений. Выведены достоинства и недостатки методов и требования к ним. Показано влияние диапазона регистрации интенсивностей в ФРТ на точность определения ЧКХ.

2. На основе исследования достоинств и недостатков прямых методов оценки качества изображения предложен способ, сочетающий достоинства нескольких методов. При этом предлагаемый метод – компьютерная изофотометрия является сочетанием методов изофотометрии и видео-фотометрии. Новый метод более простой и оперативный; он дает возможность регистрации диапазона передачи интенсивности в пятне рассеяния от 3 до 5 порядков с высокой точностью во всем диапазоне.

3. Разработаны математические основы метода компьютерной изофотометрии ФРТ, при этом найдены формулы применительно к задаче создания алгоритмов и программного обеспечения.

4. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение «КИЗО-ФРТ», которое позволяет измерять ФРТ по методу изофотометрии и обрабатывать измеренные значения ФРТ для получения различных характеристик качества изображения оптических систем, таких как ЧКХ, ФРЛ, ПК, ФКЭ.

5. Разработана установка контроля качества изображения оптических систем на основе скамьи ОСК-2ЦЛ, камеры VAC-135 и программы «КИЗО-ФРТ». Проведено экспериментальное исследование качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» на разработанной установке. Результаты соответствуют практике и согласуются с расчетными характеристиками объектива.
6. Выполнена оценка погрешности метода изофотометрии ФРТ на основе математического анализа и ряда экспериментов. Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРТ по методу изофотометрии не превышает 1,5%, погрешность после расчета ЧКХ не более 5%.
7. Разработаны математические основы метода компьютерной изофотометрии ФРЛ, при этом найдены формулы применительно к задаче создания алгоритмов и программного обеспечения.
8. Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, которое позволяет измерить ФРЛ по методу изофотометрии и преобразовать измеренные значения ФРЛ для получения различных характеристик качества изображения оптических систем, таких как ЧКХ, ПК, ФКЭ. Рабочая скорость программы достаточно высока, что позволяет получать результаты измерений в реальном времени.
9. Разработана установка контроля качества изображения оптических систем методом компьютерной изофотометрии ФРЛ на основе скамьи ОСК-2ЦЛ. Выполнен расчет основных узлов в схеме установки. Выполнены экспериментальные исследования качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» на разработанной установке. Результаты согласуются с данными расчета объектива и соответствуют практике; эти результаты согласуются также с данными метода изофотометрии ФРТ.
10. Выполнена оценка погрешности метода изофотометрии ФРЛ на основе математического анализа и экспериментов. Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРЛ по методу изофотометрии ФРЛ не превышает 1%, погрешность после вычисления ЧКХ не выше 5%.
11. выполнены исследование и разработка макетного интерферометра сдвига с оснащением ПЗС-камерой для автоматической регистрации интерферограмм.
12. Разработаны алгоритм и программа для моделирования и исследования интерферограмм сдвига.
13. Разработаны алгоритма и программы автоматической расшифровки интерферограмм сдвига методом восстановления функции деформаций волнового фронта путем решения системы дифференциальных уравнений, полученных при совместной обработке двух интерферограмм с взаимно-перпендикулярным направлением сдвига.
14. Выполнены исследование и разработка альтернативного алгоритма расшифровки интерферограмм, дающего снижение влияния шумов и существенно повышение точности.

15. Выполнена разработка программы “Tiger”, которая производит регистрацию, обработку и анализ интерферограмм с целью получения информации об ошибках волнового фронта, а также анализа влияния деформаций волнового фронта на определяемые программой характеристики качества изображения.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Ле зуй Туан, Кирилловский В. К. Компьютеризированный интерферометр сдвига // Оптический журнал. 2008. Т. 75. №03. С. 24–29.
2. Ле зуй Туан, Кирилловский В. К. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для установки контроля качества изображения объектива // Известие вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, №7. С. 52–57.
3. В. П. Вейко, В. К. Кирилловский, Ле Зуй Туан, Зыонг Ван Зунг. Характеризация апертуры сбом-зонда по распределению освещенности в дальней зоне // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, №7. С. 19–23.
4. Ле Зуй Туан, Кирилловский В. К. Фундаментальные проблемы широкодиапазонного исследования электромагнитного излучения и новый подход к разработке методов и аппаратуры // Сборник трудов седьмой Международной конференции «Прикладная оптика-2006», СПб: Уником, 2006. С. 214–222.
5. Ле Зуй Туан. Разработка алгоритма и программы для расширения возможностей аппаратуры оценки качества изображения оптических систем // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, Т. 2, СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. С. 122–127.
6. Ле Зуй Туан, Лишкевич. А. А. Разработка и исследование компьютеризированного интерферометра с дифракционной решеткой на основе схемы ронки и программного обеспечения для расшифровки интерферограмм // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, Т. 2, СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. С. 128–136.
7. Ле Зуй Туан. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для моделирования апертуры сбом-зондов на основе экспериментального исследования дальнепольной освещенности // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО, выпуск 42, СПб.: СПбГУ ИТМО, 2007. С. 60–67.
8. Yakovlev E.B, Veiko V. P, Kirillovski V.K., Varkentina N.V. Zuong C. Z. Le D. T. Analysis of SNOM tip aperture by far-field intensity distribution // Abstracts of international conference “Fundamentals of laser assisted micro – and nanotechnologies” (FLAMN-07). St. Petersburg, ITMO. 2007. P. 90

Тиражирование и брошюровка выполнены в учреждении
«Университетские телекоммуникации»
197101, Санкт–Петербург, Саблинская ул., 14
Тел. (812) 233 4669 объем 1 п.л.
Тираж 100 экз.

