

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ, МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2012

Кирилловский В.К., Точилина Т.В. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ. Учебное пособие. – СПб: НИУ ИТМО, 2012. – 125 с.

В пособии рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры и методов оценки качества оптического изображения и измерения его характеристик включая инновационные решения, предпосылки компьютерного моделирования этих процессов, типовые узлы приборов, методы и схемы для измерения и оценки параметров и характеристик качества изображения, даваемого оптическими системами и элементами. Кроме того, рассматриваются анализ и синтез схемных решений современной аппаратуры для измерения деформаций волнового фронта, связанных с абберациями оптических систем и ошибок оптических поверхностей. Рассмотрены эффективные косвенные методы оценки качества изображения оптических систем путем компьютерной расшифровки интерферограмм и математической обработки интерферометрической информации с целью определения характеристик качества изображения. Даны характеристики точности интерферометрии и современные методы повышения точности.

Указаны пути применения компьютеров в оптическом приборостроении при измерениях и контроле аббераций и качества изображения.

Учебное пособие предназначено для студентов оптических специальностей, изучающих методы оптических измерений по направлению подготовки «Оптотехника», а также может быть полезным для инженерно-технических работников исследовательских лабораторий и для технологов оптического производства.

Учебное пособие подготовлено на кафедре Прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

Рецензент: доктор технических наук, профессор В.Т. Прокопенко (НИУ ИТМО)

Рекомендовано Учебно-методическим объединением вузов Российской Федерации по образованию в области приборостроения и оптотехники для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки 200400 – Оптотехника.



В 2009 году Университет стал победителем многоэтапного конкурса, в результате которого определены 12 ведущих университетов России, которым присвоена категория «Национальный исследовательский университет». Министерством образования и науки Российской Федерации была утверждена программа его развития на 2009–2018 годы. В 2011 году Университет получил наименование «Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики»

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2012
© В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина, 2012

1. ВВЕДЕНИЕ

В основе современной системы познания материального мира лежит измерение. Закономерные связи, находимые в природе, обнаруживаются чаще всего в численной форме, в результате количественных оценок наблюдаемых объектов и явлений. От развития методов и средств исследований и измерений, от пределов точности и чувствительности, достигаемых в процессе измерений, зависит достоверность описания исследуемых объектов и, в конечном итоге, адекватность модели окружающего нас мира.

Из всех известных методов измерений оптические исследования и измерения относятся к наиболее точным. Пороговая чувствительность и точность классических методов оптических измерений находится на уровне длины волны применяемого излучения, которая для видимого (светового) излучения составляет величину порядка 0,5 мкм. Современные технологии, в том числе электронные и компьютерные, как и другие научно-технические достижения, дают возможность повышения точности и чувствительности еще в десятки раз. Незаменимым свойством результатов оптических измерений и исследований является их наглядность, надежность и убедительность. Отсюда значительная и все возрастающая роль оптических измерений в большинстве областей естественнонаучных и научно-технических исследований, в технической, медицинской и биологической практике.

В пособии для подготовки магистров рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры для измерения деформаций волнового фронта, связанных с абберациями оптических систем и ошибок оптических поверхностей.

Сведения о структуре изображения, построенного изготовленной оптической системой, могут быть получены прямым и косвенным путями. Рассмотрены современные **косвенные** методы оценки качества изображения оптических систем путем компьютерной расшифровки интерферограмм и математической обработки интерферометрической информации с целью определения характеристик качества изображения. Даны характеристики точности интерферометрии и современные методы повышения точности.

Указаны пути применения компьютеров в оптическом приборостроении при измерениях и контроле аббераций и качества изображения.

Способы **прямой** оценки состоят в наблюдении изображения тест-объекта, сформированного при помощи исследуемой системы, и измерении фотометрической структуры этого изображения.

Преимущества косвенных методов состоят в том, что они позволяют по известной топографии отклонений фронта волны рассчитать большинство характеристик качества изображения. Результаты, полученные этими методами, не зависят от особенностей приемника изображения в схеме контроля. Косвенные методы дают возможность определить влияние конкретных искажений волнового фронта, вносимых системой, на качество изображения, что служит предпосылкой широкого применения косвенных методов в условиях производства, например – при обработке оптических поверхностей, изготовлении оптических элементов и юстировке оптических систем.

К ограничениям косвенных методов следует отнести сложный математический аппарат обработки данных, требующий использования наиболее современных компьютеров и сложного, дорогостоящего программного обеспечения.

Кроме того, следует иметь в виду, что при таких оценках не учитывается влияние на качество изображения ряда факторов, действующих при изготовлении оптической системы, но не отображающихся в измерительном оптическом изображении второго рода, т.е. на интерферограмме, гартманограмме или тенеграмме. Обычно – это факторы, приводящие к появлению в испытуемой оптической системе рассеянного света, наложенного на структуру сформированного системой изображения и приводящего к искажению штатных (расчетных) характеристик качества изображения, что может показать существенное ухудшение реального качества изготовленной системы по сравнению с предсказанным на основе расчета и косвенных оценок.

Итак, указанные недостатки косвенных методов преодолеваются применением прямых методов исследования и измерения параметров качества изображения систем в процессе изготовления, при чем учитывается влияние на характеристики качества реального изображения всех без исключения факторов.

1.1. Этапы оптического измерения

В процессе оптического измерения обобщенно можно указать следующие основные этапы (рис. 1).



Рис. 1. Схема этапов оптического измерения

1. Создание оптического изображения, связанного с измеряемыми параметрами объекта (назовем такое изображение «оптико-измерительным изображением»).
2. Определение (считывание) координат элементов изображения путем оптических измерительных наводок («наведений», «установок»).
3. Обработка данных, полученных в результате оптических измерительных наводок на изображение, и получение результатов измерения с целью определения необходимых параметров объекта [1].
4. Анализ погрешностей измерений с целью определения точности полученных результатов [1, 2].

В качестве примера рассмотрим одну из простейших оптических измерительных схем. Длина элемента малого объекта измеряется при помощи визирного измерительного микроскопа (рис. 2).

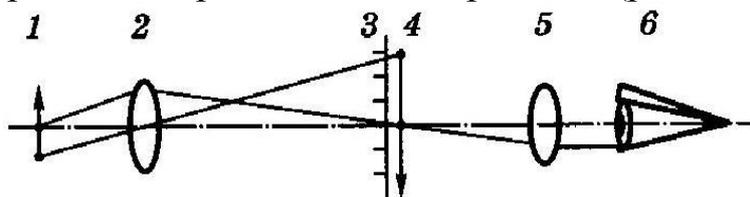


Рис. 2. Визирный измерительный микроскоп: 1 – объект; 2 – объектив микроскопа; 3 – измерительная шкала, совмещенная с плоскостью изображения объекта; 4 – изображение объекта; 5 – окуляр; 6 – глаз оператора измерений

Визирный измерительный микроскоп служит для совмещения визирной сетки, расположенной в фокальной плоскости его окуляра, с заданными точками изображения измеряемого объекта.

Приведенная схема обеспечивает все перечисленные этапы процесса оптического измерения. Как известно [2], измерение – процесс сравнения измеряемой физической величины (в явной или неявной форме) с единицей этой величины, хранимой применяемым средством измерения.

В приведенной схеме измерительный микроскоп хранит единицу измеряемой величины (пространственной протяженности или длины) в виде отградуированных делений точно изготовленной шкалы. Единицей длины в принятой у нас метрической системе является метр. Измерительная шкала за счет ее изготовления обеспечивает точное воспроизведение долей метра – миллиметров и их долей.

1.2. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований

Если обобщенно рассмотреть совокупность традиционных методов контроля и исследования оптических систем и элементов, то можно убедиться в том, что эти методы, в основном, сводятся к регистрации структуры волнового фронта, сформированного системой (деталью) в схеме контроля. Следующий шаг – исследование этой структуры, которая визуализируется в форме изображения того или иного вида (названного выше оптико-измерительным изображением), например, в виде интерференционных полос, теневой картины, совокупности пятен, составляющих диаграмму Гартмана, дифракционных изображений светящейся точки или линии и т.д.

Обобщенная схема подразумевает точечный источник излучения, из которого сферический волновой фронт распространяется во входной зрачок изображающей оптической системы. Волновой фронт, преобразованный исследуемым объектом в измерительной схеме, вписан в выходной зрачок. При изменении формы сферического волнового фронта изображение может удаляться, приближаться, поперечно перемещаться. Аберрации и ошибки изготовления оптической системы вносят искажения ΔW в волновой фронт, которые меняют структуру оптического изображения. Если искажений нет, то волновой фронт должен быть сферическим.

Структура волнового фронта, характеризующая качество исследуемой системы, может быть представлена функцией пространственных координат на зрачке и на предмете, зависящей, при наличии хроматизма, и от длины волны излучения.

Рассмотрим волновой фронт, сформированный исследуемым оптическим элементом в схеме контроля (рис. 3).

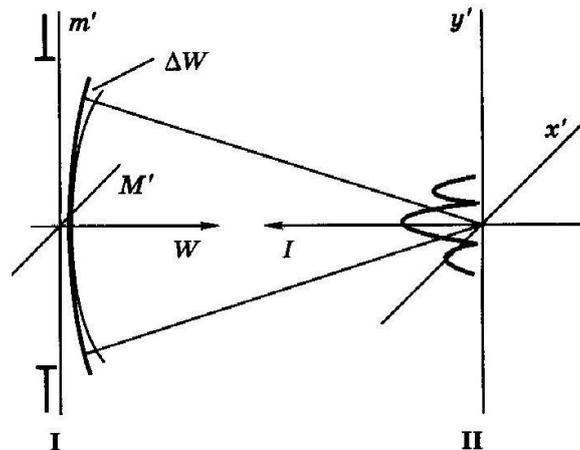


Рис. 3. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований: M' и m' – координаты на выходном зрачке оптического элемента в схеме; x' и y' – координаты в плоскости изображения тест-объекта; W – координата формы волнового фронта; I – относительная освещенность в изображении тест-объекта

Исследование оптического элемента осуществляется, главным образом, в двух зонах.

1. В зоне изображения II объектом исследования служит, в большинстве случаев, амплитудная характеристика излучения – двумерное распределение освещенности в плоскости изображения, характеризующее концентрацию энергии в изображении и полноту передачи информации о структуре изображаемого объекта.

Здесь формируется **оптическое измерительное изображение первого рода**, подобное объекту и несущее информацию, в первую очередь, о его геометрических параметрах и внешней структуре.

2. В зоне зрачка I объектом исследования служит, чаще всего, фазовая характеристика волнового фронта, а именно – отклонения ΔW формы фронта волны от формы, соответствующей требуемому качеству изображения (чаще всего – от сферической формы).

Здесь формируется **оптическое измерительное изображение второго рода**, обычно не подобное объекту, но несущее информацию о характере волнового фронта в части его фазовых деформаций, об абберациях исследуемых оптических систем и элементов и об ошибках формы оптических поверхностей.

Сведения о структуре изображения, построенного оптической системой, могут быть получены двумя путями: прямым и косвенным.

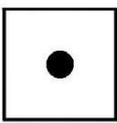
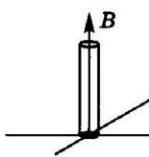
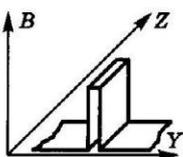
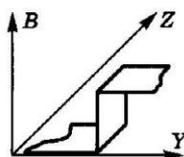
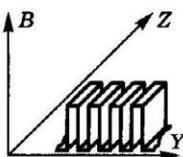
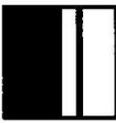
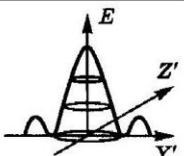
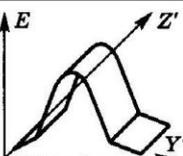
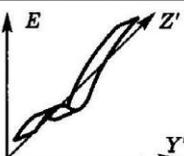
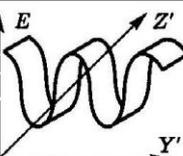
2. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА

2.1. Изображения первого рода. Типовые тест-объекты и функции, описывающие их изображения

Процесс выбора тест-объектов для исследования качества оптических систем и элементов складывался исторически. При этом определился ряд классических тест-объектов и математический аппарат функций, которые описывают структуру изображений этих тест-объектов и служат характеристиками качества изображения.

С развитием оптической промышленности выработан ряд типовых тест-объектов для оценки качества изображения. Типовые тест-объекты (точка, линия, полуплоскость, решетка) связаны с часто встречающимися в оптической практике (наблюдение, исследование, измерение) элементами реальных объектов. В приведенной таблице (табл. 1) представлены наиболее часто применяемые тест-объекты, изображения тест-объектов и двумерные функции, описывающие распределение интенсивности как в тест-объекте, так и в его изображении.

Таблица 1. Типовые тест-объекты и характеристики качества изображения

	Светящаяся точка	Светящаяся линия	Полуплоскость	Линейная решетка
Тест-объект				
Функция распределения яркости в объекте				
Изображение тест-объекта				
Функция распределения интенсивности в изображении				
	Функция рассеяния точки (ФРТ)	Функция рассеяния линии (ФРЛ)	Пограничная функция	Распределение интенсивности в изображении решетки

Изображение, построенное оптическим прибором, может быть дифракционным, т.е. иметь отчетливо различимые элементы в виде дифракционных осцилляций (например, табл. 1 – ФРТ), или быть недифракционным, когда дифракционные осцилляции не наблюдаются (например, табл. 1 – ФРЛ).

Дифракционной структурой характеризуется изображение, построенное высококачественной оптической системой, имеющей малые aberrации, а недифракционной структурой характеризуется изображение оптической системы, имеющей заметные остаточные aberrации.

В соответствии с характером структуры сформированного изображения оптические системы, предназначенные для построения изображений, разделяют на два класса.

1. Оптические системы с дифракционно-ограниченным качеством изображения. К этому классу относят оптические системы, структура и качество изображения для которых ограничено (обусловлено) в основном дифракцией.

В их числе – оптические системы наблюдательных приборов, таких как телескопы, бинокли, подзорные трубы, теодолиты, а также микроскопы и другие приборы, в которых приемником и анализатором изображения является глаз. Это естественно, так как угловая разрешающая сила нормального глаза, при наблюдении тест-объекта типа двойной звезды, составляет:

$$r''_{\text{гл}} = \frac{120''}{d_{\text{зр}}(\text{мм})},$$

где $d_{\text{зр}}$ – диаметр зрачка глаза.

Подобная формула применяется и при определении разрешения идеальной оптической системы. Таким образом, разрешение глаза близко к идеальному, и оптические приборы, рассчитанные для работы с глазом, должны обладать дифракционно-обусловленным качеством изображения [3].

Кроме того, к дифракционно-ограниченным системам относятся объективы измерительных зрительных труб, космических и прецизионных телескопов, исследовательских и измерительных микроскопов, оптических систем для технологий микроэлектроники и лазерной записи информации.

2. Оптические системы с aberrационно-ограниченным качеством изображения. К этому классу относят оптические системы, структура и качество изображения для которых ограничены

(обусловлены) в основном влиянием aberrаций; эти aberrации либо не были устранены на этапе расчета оптической системы («расчетные» aberrации), либо они обусловлены ошибками изготовления оптической системы и ее элементов.

Сюда относятся, например, оптические системы фото-, кино- и видеообъективов. Волновые aberrации систем этого класса могут быть в 5 раз выше, чем у систем с дифракционно-ограниченным качеством, при этом качество изображения, применительно к существующим приемникам изображения и большим полевым углам указанных приборов, считается вполне удовлетворительным.

2.1.1. Тест-объект «светящаяся точка»

Первичный и наиболее универсальный тест-объект при исследовании качества изображения оптических систем – тест-объект типа «светящаяся точка». Он материализуется в виде круглой диафрагмы малого диаметра, освещенной проходящим светом (или ее уменьшенного изображения).

Изображение тест-объекта «светящаяся точка» – **пятно рассеяния** или **дифракционный кружок** (рис. 4, а).

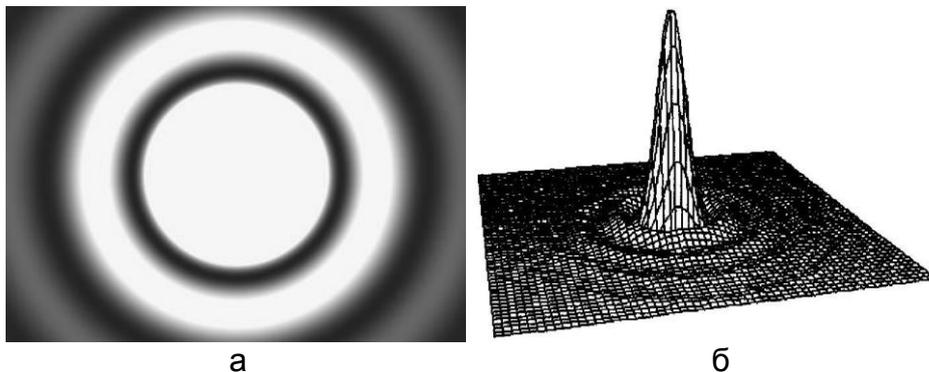


Рис. 4. Дифракционный кружок (а); ФРТ (б)

Наблюдение дифракционного кружка, формируемого исследуемой системой, позволяет обнаруживать aberrации системы с чувствительностью на уровне до $0,1\lambda$.

Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «светящаяся точка» – двумерная функция, носящая название **ФРТ** (рис. 4, б). Экспериментально найденная ФРТ, характеризуя качество системы, позволяет учитывать все особенности волновой поверхности, сформированной системой, в том числе и характер микрорельефа оптических поверхностей, дефекты оптических материалов, блики, отклонение пропускания (или отражения) на зрачке, сдвиги изображения, возникшие при работе

прибора и т.д. С помощью ФРТ в осредненной и мгновенной форме можно учитывать флюктуации оптических характеристик воздушного тракта, непрерывно изменяющиеся во времени по сложному случайному закону. ФРТ позволяет надежно аттестовать качество изображения системы с несколькими зрачками. ФРТ, являясь первичной характеристикой качества изображения, позволяет перейти к другим требуемым характеристикам качества изображения, таким как ФРЛ, частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), краевая функция, функция концентрации энергии (ФКЭ) и другие.

Тест-объект «светящаяся точка» моделирует важные для оптической измерительной практики объекты, такие как, например, небесные объекты типа звезд или орбитальные объекты военного и невоенного назначения [4].

2.1.2. Тест-объект «светящаяся линия»

Тест-объект типа «светящаяся линия» материализуется в виде щелевой диафрагмы малой ширины, освещенной проходящим светом.

Изображение тест-объекта «светящаяся линия» – пятно рассеяния в форме более или менее размытого изображения линии.

Понятие функции рассеяния распространяется и на изображение линии. Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «светящаяся линия» – двумерная (квазиодномерная) функция, носящая название **ФРЛ**.

Квазиодномерной называют двумерную функцию, которая сохраняет свою форму при перемещении графика функции по одной из координатных осей.

Это свойство позволяет в большинстве случаев изображать квазиодномерную функцию в виде одномерной, как функцию только одной переменной.

Общий вид графика ФРЛ показан на рис. 5. Видно, что данная функция квазиодномерна.

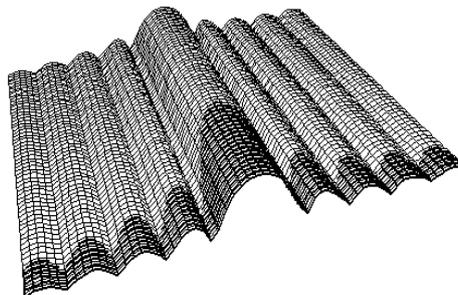


Рис. 5. ФРЛ

Тест-объект «светящаяся линия» описывает часто встречающиеся в оптической измерительной практике объекты, например, штрихи светящихся сеток и шкал приборов, спектральные линии.

2.1.3. Тест-объект «полуплоскость»

Этот тест-объект материализуется в виде прямолинейного края непрозрачной заслонки (лезвия) на освещенном фоне. В случае, когда необходимо характеризовать резкость деталей изображения, создаваемого исследуемой системой, рассматривают структуру изображения тест-объекта, представляющего собой прямолинейную границу черного и светлого полей, так называемого пограничного теста или **полуплоскости**.

Функция, описывающая распределение яркости в тест-объекте «полуплоскость» (рис. 6, а) – квазиодномерная функция скачка.

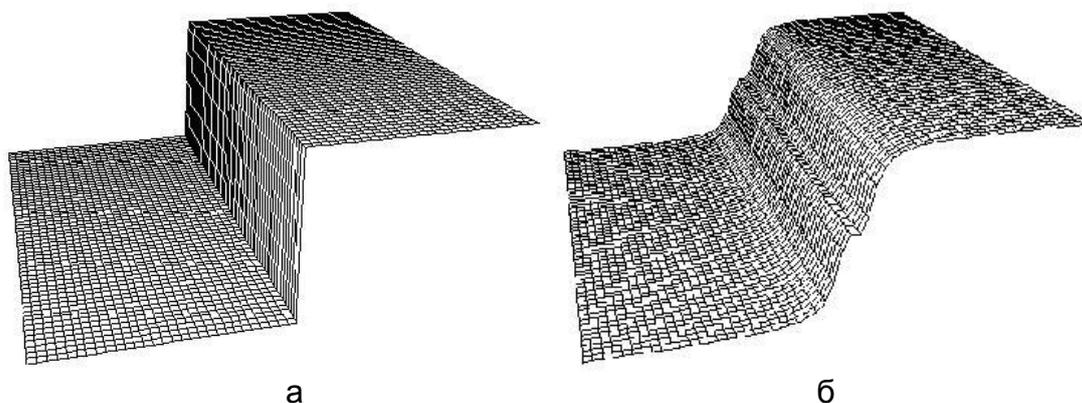


Рис. 6. Распределение яркости в тест-объекте «полуплоскость»: квазиодномерная функция скачка (а); двумерная функция края (б)

Изображение тест-объекта «полуплоскость» – пятно рассеяния в форме более или менее размытого изображения края. Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «полуплоскость» – двумерная (квазиодномерная) **функция края** или «краевая (переходная) функция» (рис. 6, б); ее график называется «**пограничная кривая**».

Резкость изображения характеризуется степенью наклона пограничной кривой. В то же время наклон пограничной кривой зависит от структуры пятна рассеяния. Чем более размыто пятно рассеяния, тем больше наклон пограничной кривой и хуже резкость изображения.

Тест-объект «полуплоскость» описывает часто встречающиеся в оптической измерительной практике объекты: например, край непрозрачного объекта на освещенном фоне, на который выполняются оптические измерительные наводки.

2.1.4. Тест-объект «линейная решетка»

Материализуется в виде ряда темных (непрозрачных) прямолинейных параллельных штрихов на освещенном фоне. Функция, описывающая распределение яркости в тест-объекте «линейная решетка» – квазиодномерная функция (рис. 7, а). Линейную решетку, состоящую из ряда непрозрачных штрихов на освещенном фоне, в которой ширина темных штрихов равна ширине темных промежутков, называют «мира Фуко». Такая решетка на практике находит наиболее широкое применение.

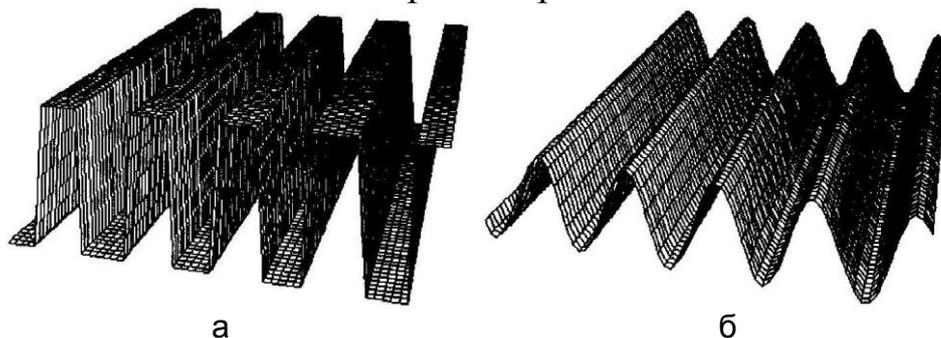


Рис. 7. Распределение интенсивности в тест-объекте «линейная решетка»: квазиодномерная функция (а); двумерная функция (б)

Изображение тест-объекта «линейная решетка» – более или менее размытое изображение ряда темных штрихов.

Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «линейная решетка» – двумерная (квазиодномерная) функция (рис. 7, б). Ее интересная особенность состоит в том, что на средних и высоких пространственных частотах структура изображения такой решетки характеризуется распределением интенсивности, близким к синусоидальному.

При оценке объективов, строящих изображение протяженных объектов, большую роль играют способы, основанные на наблюдении и измерении изображения решетки переменной частоты. В частности, до настоящего времени используется визуальная оценка по различимости штрихов в изображении штриховой миры, построенной системой.

Критерием разрешающей способности при этом служит частота того поля миры, в изображении которого можно различить темные и светлые штрихи и определить их количество. Частотной характеристикой качества изображения служит также модуляционная передаточная функция (МПФ), называемая иногда **ЧКХ**.

Тест-объект «линейная решетка» описывает часто встречающиеся в оптической измерительной практике объекты, например, такие как шкала, биссектор, периодические структуры на аэрокосмических снимках земной поверхности.

2.2. Оптические измерительные изображения второго рода

2.2.1. Теневая картина (тенеграмма)

Итак, на начальных этапах истории методов контроля качества изготовленных оптических систем – оценки выполнялись преимущественно качественно, по виду изображения того или иного тест-объекта, начиная с тест-объекта «светящаяся точка».

Процесс выбора тест-объектов для исследования качества оптических систем и элементов складывался исторически. При этом определился ряд классических тест-объектов и математический аппарат функций, которые описывают структуру изображений этих тест-объектов и служат характеристиками качества изображения.

Революцию в оптическом контроле и измерениях совершил Леон Фуко, впервые предложивший метод исследования деформаций волнового фронта, связанных с абберациями оптических систем и ошибками оптических элементов.

Метод «ножа Фуко» и вообще все теневые методы доказали свою исключительную полезность для контроля оптических поверхностей. Абберации, дифракция света и ошибки изготовления оптических поверхностей вызывают отклонение лучей от теоретических траекторий и искажение волнового фронта. Основная идея теневых методов состоит в обнаружении боковых смещений таких лучей за счет их задерживания или модификации. Это осуществляется путем помещения специальных экранов в плоскость схождения пучков лучей от контролируемой оптической поверхности или системы.

Для получения теневой картины деформаций исследуемого волнового фронта, соответствующих абберациям оптической системы или ошибкам оптической поверхности, в плоскости схождения параксиального пучка лучей устанавливается перпендикулярно оптической оси непрозрачный экран с прямолинейным краем (так называемый «нож Фуко»), который наполовину перекрывает пятно рассеяния (рис. 8, а). Теневая картина может наблюдаться в плоскости экрана, расположенной за пятном рассеяния (рис. 8, б), или характер освещения исследуемой оптической поверхности наблюдают из зафокальной области.

При отсутствии ошибок зеркало, создающее изображение точечного тест-объекта, выглядит равномерно освещенным. Наличие ошибок (например, краевая зона на рис. 8, а) создает светотень, визуализирующую рельеф ошибок поверхности в результате срезания «ножом» пучков лучей от неверно заклоненных участков волновой поверхности. Верхняя область краевой зоны зрачка исследуемого

фронта на рис. 8, б, дает участки потемнения в теневой картине. Нижняя область краевой зоны дает участки максимальной освещенности в теневой картине. Пучки от участков волновой поверхности, имеющих правильную сферическую форму, перекрываются (а, следовательно, и ослабляются) лишь наполовину, и соответствующая зона зрачка имеет освещенность порядка 50%. Если «нож» помещают между идеальным сферическим зеркалом и его фокусом и перемещают по нормали к оптической оси, то теневая картина состоит из резко разделенных темной и светлой областей и первая из них перемещается по зеркалу в том же направлении, что и «нож».

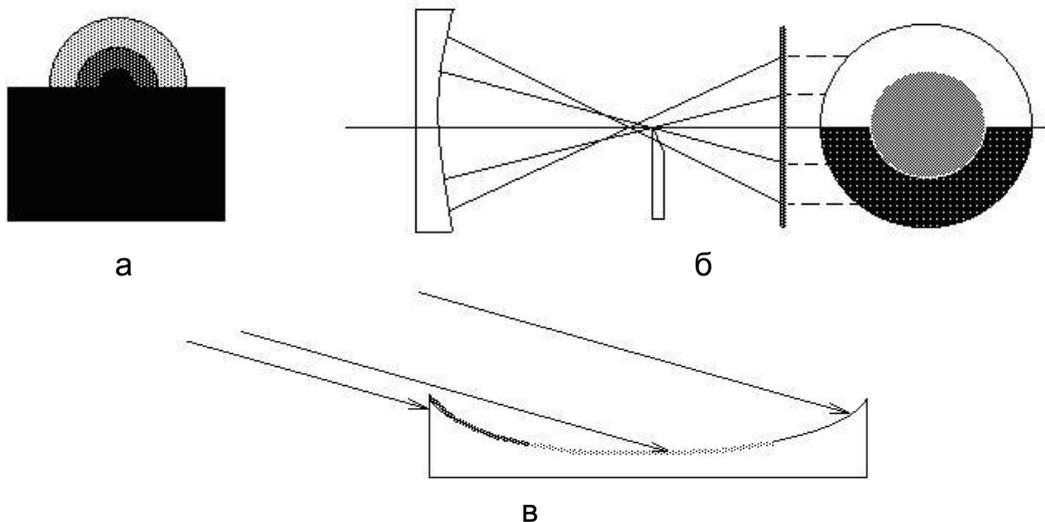


Рис. 8. Принципиальная схема теневого метода Фуко

Если «нож» находится за фокусом, направление перемещения темного участка меняется на противоположное. При введении «ножа» точно в фокус зеркало затемняется внезапно и полностью, без каких-либо заметных движений теневой картины. Это является, кстати, очень точным способом определения положения центра кривизны. Если контролируемое зеркало не является сферическим, и каждый его участок имеет свой отличный радиус кривизны, при помещении «ножа» в различные точки относительно оптической оси соответствующая зона поверхности темнеет.

У волнового фронта, распространяющегося от вогнутого зеркала с нарушениями формы, существуют участки с различными радиусами и центрами кривизны, и при перемещении «ножа» сразу или поочередно затемняются различные участки поверхности.

Для умозрительного представления процесса формирования теневой картины достаточно представить себе источник света, помещенный у противоположного «ножу» края поверхности

деформаций волнового фронта (рис. 8, в). При таком допущении качественная интерпретация теневой картины становится несложной.

Теневой метод применяется: для контроля деформаций волнового фронта, вызванных ошибками и абберациями в процессе изготовления оптических поверхностей, элементов и систем, особенно – крупногабаритных астрономических зеркал; при контроле свильности оптического стекла; исследованиях воздушных потоков и других явлений.

Основными достоинствами теневых методов являются их высокая чувствительность, простота схемной реализации и качественной интерпретации результатов. По простоте реализации метод Фуко является уникальным по сравнению с другими оптическими методами и может рассматриваться как первый по настоящему производственный способ, на основе которого были разработаны другие многочисленные варианты оптического контроля.

Теневой метод удобен для обнаружения поперечных аббераций системы. В процессе контроля с помощью непрозрачного экрана, который помещен в плоскость теоретического схождения лучей, часть лучей отраженного или дифрагированного света пересекают этот экран, в результате чего возникает теневая картина, указывающая на наличие погрешностей у контролируемой детали.

Достоинства метода.

1. Впервые получена возможность визуальных наблюдений малых деформаций волнового фронта на выходе из системы.
2. Высокая чувствительность, порядка $0,1\lambda$.
3. Наглядность, позволяющая наблюдать характер искажения волнового фронта, место расположения, форму, величину, протяженность деформаций волнового фронта и ошибок обрабатываемой оптической поверхности.

Недостатки метода.

К недостаткам можно отнести не преодоленные до конца трудности количественной интерпретации теневого изображения, в результате чего метод в настоящее время применяется преимущественно для технологического контроля в форме качественных оценок состояния оптических поверхностей и материалов, а также уровня аббераций оптических элементов и систем. Итак, метод применяется, в основном, как качественный метод оценки и используется при изготовлении оптических поверхностей на этапе формообразования, и иногда при контроле оптических элементов и систем.

2.3. Гартманограмма

Основной принцип методов контроля оптической системы с применением экрана вблизи выходного зрачка заключается в том, что волновой фронт оценивается в ряде предварительно выбранных точек, а результаты сравниваются с теоретическими значениями. Методы базируются на законах геометрической оптики; идея заключается в том, что наличие у волнового фронта погрешностей в некоторой области приводит к фокусировке света в точке, отличающейся от теоретического фокуса, или к пересечению сфокусированных пучков лучей с осью в плоскости, не совпадающей с плоскостью для случая идеального фронта. В результате погрешности волнового фронта, оценивают: в какой плоскости вдоль оптической оси пересекаются пучки лучей от некоторой области волнового фронта; каково различие в положении этой плоскости, и в теоретическом положении точки пересечения лучей для идеальной волны.

Если волновой фронт оценивается несколькими лучами или пучками, перпендикулярными к нему, отклонение следов лучей от их идеальных положений можно зафиксировать на некоторой регистрирующей плоскости. Идеальный волновой фронт при этом не обязательно должен быть точно сферическим, а может иметь любую форму, так как интерес представляют лишь отклонения от него.

В 1904 году Гартман опубликовал предложенный им метод, пригодный для точного количественного измерения различных aberrаций, включая хроматические. Исходя из геометрического рассмотрения задачи, Гартман выделял диафрагмами пучки лучей, выходящих из системы, создающей в схеме контроля изображение тест-объекта «светящаяся точка» и, пользуясь внефокальными фотоснимками следов пучков лучей, определял точки пересечения отдельных лучей с оптической осью. Метод Гартмана, разработанный первоначально для измерения aberrаций объективов, в последующие годы нашел эффективное применение при исследованиях качества различных оптических систем, в том числе – крупногабаритных астрономических зеркал.

В выходной зрачок исследуемой оптической системы устанавливается диафрагма Гартмана – непрозрачная заслонка с серией отверстий. Диафрагма пропускает отдельные пучки лучей, затем выполняется регистрация следов лучей во внефокальных зонах на фотографических пластинках и исследование направления хода лучей, связанное с искажениями волнового фронта. На каждой из пластинок

регистрируется гартманограмма, на которой зарегистрированы световые пятна, т.е. следы пучков лучей, которые пересеклись со светочувствительной площадкой приемника изображения.

Если волновой фронт не имеет деформаций, расположение пятен гартманограммы соответствует расположению отверстий на диафрагме Гартмана. Если имеется деформация волнового фронта, например, такая как на рис. 9, то крайние пятна на 1-ой фотопластинке сгруппируются на краю, а на 2-ой они сдвинутся к центру. Если измерить расстояние между пятнами, и если известно расстояние до пластинок, из подобия треугольников можно определить точки схождения лучей и пересечения ими оптической оси.

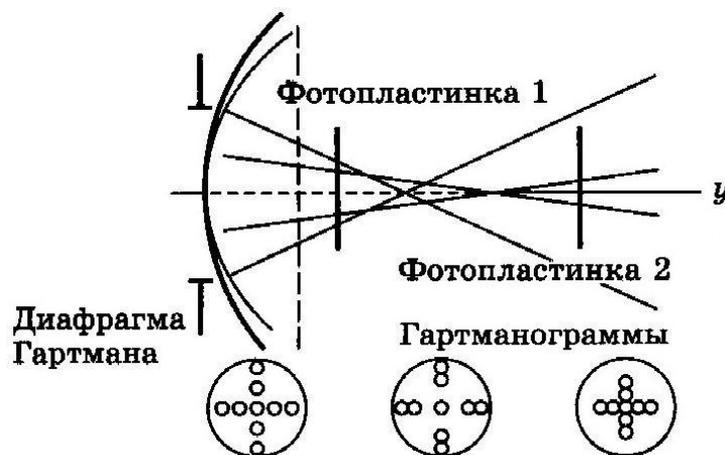


Рис. 9. Метод Гартмана

Итак, диафрагма Гартмана (рис. 9) устанавливается в зрачке исследуемого объектива; отверстия выполняются круглыми, оптимальный их диаметр выбирается из соотношения $d = 0,005 - 0,0025 f'$; где f' – фокус исследуемой системы или расстояние от зрачка до точки схождения лучей. Далее на фотопластинках (гартманограммах) измеряют координаты следов пучков лучей (пятен).

Тогда, в упрощенном рассмотрении (рис. 10), расстояние от A до точки I пересечения данного луча с осью может быть найдено из выражения:

$$x = \frac{a}{a+b} d. \quad (1)$$

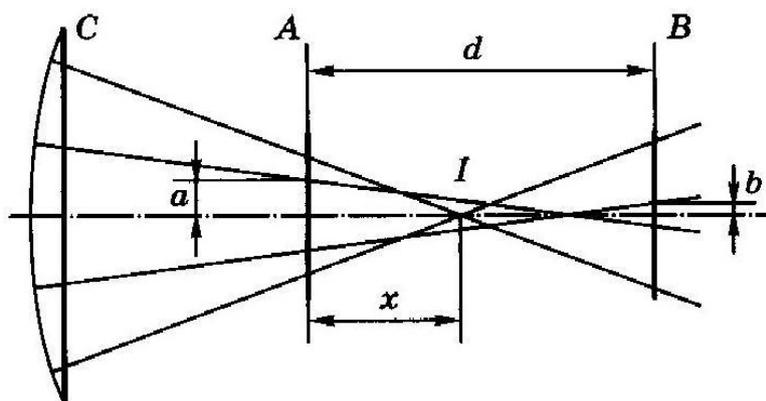


Рис. 10. Схема метода Гартмана: d – расстояние между предфокальным и зафокальным положениями фотопластинок; a – расстояние между следом оптической оси и следом данного луча (пятном) на предфокальной фотопластинке А; b – соответствующее расстояние на зафокальной фотопластинке

Достоинства метода.

1. Возможность количественного определения (измерения) aberrаций и деформации волнового фронта.
2. Метод прост (используется точечный источник света, диафрагма и две фотопластинки).
3. Метод позволяет исследовать параметры оптической системы прибора непосредственно по наблюдаемому объекту, т.е. в рабочем положении.

Недостатки метода.

1. Отсутствие наглядности.
2. Необходимо измерение координат пятен гартманогаммы с точностью порядка 1 мкм; для этого применяется дорогостоящая двумерная измерительная машина (например «Ascorecord»).

Фундаментальным недостатком является пространственная дискретность данных по зрачку, так как метод построен на выделении из общего волнового фронта отдельных пучков лучей. Есть пространственный предел интервала, с которым можно расположить отверстия. Получается лишь информация о макродеформациях волнового фронта; информация о мелкоструктурных деформациях поверхности здесь отсутствует.

3. Виброчувствительность: если элементы схемы вибрируют, то будет вибрировать и пятно рассеяния, а, следовательно, и все пучки лучей синхронно, что приводит к дополнительной нерезкости пятен гартманогаммы и снижает точность измерений. Если имеются флуктуации воздушного тракта, а значит и волнового фронта, то пятна будут вибрировать случайным образом, что также снижает точность измерений.

2.3.1. Интерферограмма

Для оптического контроля и измерений необходимо использовать экспресс-методы, обеспечивающие точную количественную информацию обо всем исследуемом фронте волны. Более полную количественную информацию о волновом фронте можно получить интерферометрическим методом. Так, волновой фронт может быть в принципе оценен с интервалом λ/n , где λ – длина световой волны источника, а n – число проходов лучей через систему.

Начало XX века ознаменовалось развитием методов бесконтактной интерферометрии. В 1918 году Твайман [5] сообщил о методе интерферометрии аберраций объективов и ошибок оптических поверхностей. Суть состояла в сравнении плоского опорного волнового фронта с фронтом от исследуемой системы или поверхности, форма которого приведена к плоской для случая отсутствия ошибок. Таким образом, проблема исследования оптической системы ставится как задача непосредственного выявления и измерения деформаций, претерпеваемых поверхностью волнового фронта. Интерферометрия позволяет, при точно сфокусированном интерферометре, получить интерференционную картину, подобную топографической карте профиля ошибок исследуемой волновой поверхности, где горизонталы (изолинии уровня) представлены в виде полос с интервалом, кратным длине световой волны.

При поперечной расфокусировке интерферометра, предложенного Твайманом (рис. 11), возникает система полос, форма каждой из которых соответствует профилю ошибок волнового фронта в данном сечении зрачка.

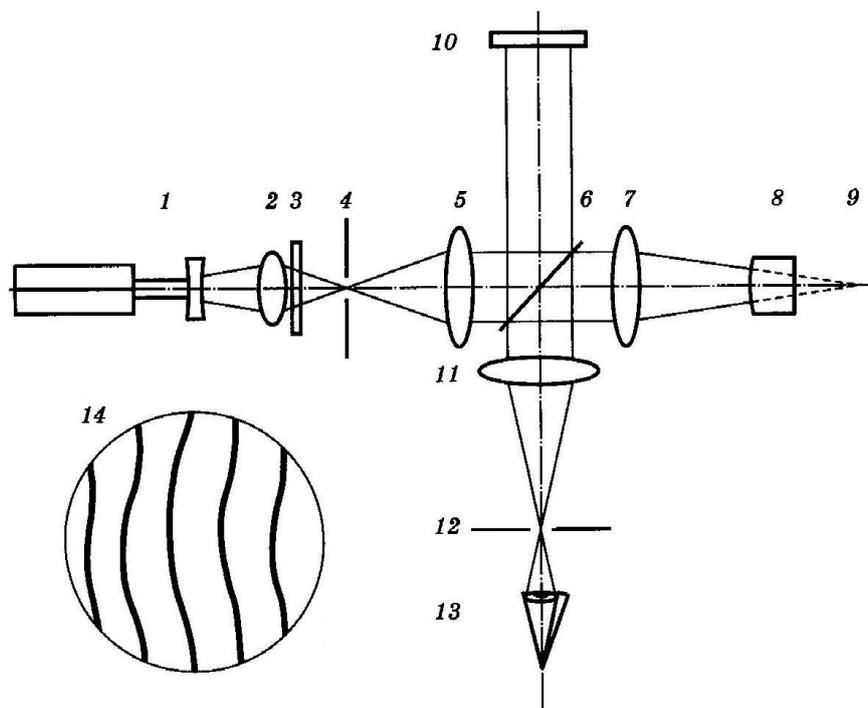


Рис. 11. Интерферометр Тваймана для исследования объектива:
 1 – лазер; 2 и 3 – осветительная система; 3 – светофильтр; 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив; 6 – светоделитель; 7 – исследуемый объектив; 8 – автоколлимационное сферическое зеркало; 9 – центр кривизны автоколлимационного сферического зеркала; 10 – образцовое плоское зеркало; 11 – объектив наблюдательной системы; 12 – наблюдательная диафрагма; 13 – приемник изображения (например – глаз)

Общий вид интерференционной картины часто позволяет опознать характер преобладающей аберрации для исследуемой системы (рис. 12).

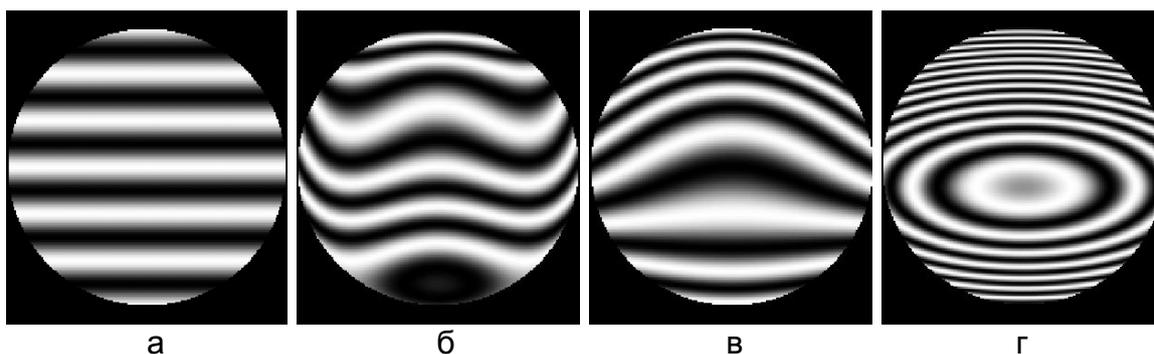


Рис. 12. Формы интерференционной картины для ряда типовых аберраций: отсутствие аберраций (а); сферическая аберрация (б); кома (в); астигматизм (г)

Ограничение интерферометрического метода в его исходной форме состоит в том, что освещенность поперек полосы изменяется по синусоидальному закону, контуры полос неотчетливы и поэтому погрешность визуальной расшифровки не менее 0,05 ширины полосы. Современные методы специальной регистрации дают возможность не только записать информацию, содержащуюся в той или иной картине

при оптических измерениях, но и преобразовать структуру изображения к виду, позволяющему достичь максимально возможной точности при его расшифровке, в том числе и при помощи устройства автоматического ввода графиков в персональный компьютер (ПК). Например, каждая интерференционная полоса синусоидальной структуры трансформируется в пару четких контуров (рис. 13).

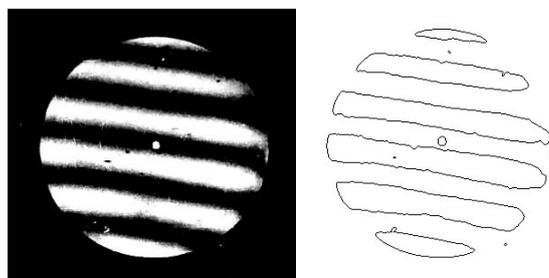


Рис. 13. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности расшифровки интерферограммы

Таким образом, метод интерферометрии сочетает достоинство наглядности, подобно теневого методу, с достоинством возможности количественных оценок деформаций волнового фронта, присущие методу Гартмана, связанных с aberrациями оптических систем и ошибками оптических поверхностей и элементов.

Твайман предложил на основании сведений о форме волнового фронта рассчитывать интенсивность светового поля, заложив, таким образом, основу косвенного метода экспериментального исследования качества оптической системы (рис. 14).

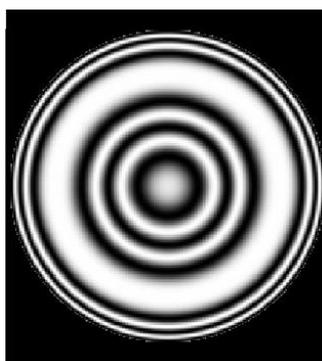


Рис. 14. Вид интерферограммы, полученной в соответствии со схемой по рис. 8

На теоретически возможной точности интерферометрического метода часто отрицательно сказывается его чувствительность. Она снижается, например, если среда между контролируемой и эталонной системами турбулентна, или если контролируемая система колеблется относительно эталонной.

Влияние турбулентности воздуха обычно устраняют, контролируя систему в камере с частичным вакуумом. Воздействие

вибраций можно уменьшить до допустимого уровня применением противовибрационных устройств. Впрочем, такое решение становится экономически неоправданным при контроле систем большого диаметра или с большим фокусным расстоянием. В этих случаях полезно использовать скоростную регистрацию интерференционной картины (например, видеозапись) и последующую покадровую расшифровку [6]. Практика показала, что такой прием позволяет устранить вредное влияние вибрации и существенно повысить точность интерферометрии.

2.4. Прямые и косвенные способы оценки качества изображения

2.4.1. Анализ ФРТ

Прямые способы оценки качества изображения состоят в наблюдении изображения тест-объекта, сформированного при помощи исследуемой системы в зоне II (зоне изображения, рис. 3), и измерении фотометрической структуры этого изображения, т.е. определении функции рассеяния (например, ФРТ или ФРЛ). Функции рассеяния и связанные с ними оптическая передаточная функция (ОПФ), функция передачи модуляции (ФПМ) и ФКЭ в изображении точечного тест-объекта служат на практике количественными характеристиками качества изображения оптической системы.

Косвенные способы оценки качества изображения состоят в измерении структуры деформаций волнового фронта в зоне I (зоне зрачка, рис. 3), на выходе оптической измерительной схемы, и последующем вычислении, на основе полученной карты волнового фронта, функций, описывающих структуру и качество оптического изображения.

Преимущества косвенных методов состоят в том, что они позволяют по известной топографии отклонений фронта волны рассчитать большинство характеристик качества изображения (таких, как ФПМ или ФКЭ). Косвенные методы дают возможность определить влияние конкретных искажений волнового фронта, вносимых системой, на качество изображения.

К ограничениям косвенных методов следует отнести: высокую трудоемкость расшифровки данных; сложный математический аппарат обработки данных; дорогостоящее программное обеспечение. Кроме того, при таких оценках не учитывается влияние на качество изображения ряда важных факторов, которые могут в корне изменить структуру изображения и резко ухудшить его качество по сравнению

с предсказанным (смоделированным) при помощи упомянутого косвенного метода.

К таким факторам относятся:

- мелкоструктурные дефекты оптических поверхностей (например, возникающие при ретуши крупногабаритной оптической поверхности малым полировальником), а также их остаточная шероховатость;
- мелкоструктурные дефекты оптических сред (свилы, неоднородности, включения, мутность);
- дефекты оптических покрытий;
- дефекты склеек;
- рассеянный свет в системе;
- блики в оптической системе;
- свет, отраженный от элементов оправы оптической системы и элементов внутренней конструкции оптического прибора.

Однако в ответственных случаях, при оценке реального качества изображения, сформированного изготовленной оптической системой, влияние этих факторов необходимо учитывать, так как они способны существенно снизить качество реального изображения.

Прямыми методами оценки качества изображения учитываются все без исключения факторы, участвующие в формировании структуры реального оптического изображения. В этом состоит существенное и основное достоинство прямых методов, поэтому в ответственных случаях, при исследованиях и измерениях оптических систем высокой точности, методы прямой и косвенной оценки качества изображения применяются совместно.

2.5. Анализ погрешностей метода интерферометрии

Испытания и аттестация реализованных дифракционных интерферометров не выявили погрешностей, которые превышали бы значения $0,02\lambda$. Практика работы дифракционных интерферометров с обработкой интерференционного изображения с целью повышения точности измерения координат полос (например, при помощи телевизионного анализатора интерферограмм (ТАИ)-1 [7]) показала возможность обнаружения и оценки ошибок волнового фронта на уровне $0,005\lambda$ в реальном времени и в интерактивном режиме.

Сферические вогнутые поверхности могут контролироваться таким прибором с точностью более $0,01\lambda$.

Для контроля асферических поверхностей предусмотрены два способа:

1. использование анаберрационных схем контроля с применением технологических зеркал, изготовленных под данный интерферометр;
2. применение коррекционного объектива, также изготовленного и аттестованного под данный интерферометр.

Анализ источников погрешностей метода интерферометрии на основе разработанной модели дифракционной интерферометрии показал, что погрешность измерения ошибки рефракции оптических систем и элементов методом интерферометрии определяется погрешностью измерения координаты границы элемента интерферограммы, но эта граница является нерезкой. Следовательно, для увеличения точности метода интерферометрии, необходимо увеличение градиента пограничной зоны границы интерференционного изображения в зрачке исследуемой оптической системы.

Распределение интенсивности интерферограммы формируется в два этапа:

1. формирование оптического изображения интерферограммы в зоне выходного зрачка исследуемой оптической системы;
2. формирование интерференционного изображения на чувствительной площадке приемника изображения.

Функция распределения интенсивности в этом изображении формируется как свертка ряда функций.

Из литературы и практики хорошо известен недостаток метода интерферометрии, состоящий в существенной нерезкости края интерференционной полосы, которое можно описать функцией $I_{ИНТ}$. Для анализа причин и разработки путей устранения этого недостатка традиционных методик, мы рассматриваем здесь источники указанной нерезкости.

С учетом влияния $I_{ФРТ(П)}$ – ФРТ приемника изображения, структура края полосы интерференционного изображения, сформированного на поверхности чувствительной площадки приемника, описывается операцией свертки:

$$I_{\Sigma 1} = I_{ИНТ} \otimes I_{ФРТ(П)}.$$

Далее, с учетом влияния ФРТ для оптической системы $I_{ФРТ(Г)}$, которая определяется, главным образом, аберрациями и дифракцией на зрачке, можем записать:

$$I_{\Sigma 1} = I_{\Sigma 2} \otimes I_{ФРТ(Г)}.$$

Рассмотрение источников погрешностей метода показало, что одной из основных является погрешность считывания координат элементов картины. Причиной неопределенности в процессе

совмещения измерительной марки с заданным элементом теневой картины является нерезкость элементов интерферограммы.

Показано, что СКО σ_n наведения измерительной марки на край не вполне резкого элемента изображения зависит от величины максимального пограничного градиента g_{\max} в этом изображении и связана с ней практически обратно пропорциональной зависимостью.

Предлагается, наряду с рассмотренными способами повышения резкости интерферограммы, также способ повышения резкости, основанный на трансформации структуры изображения (рис. 15).



Рис. 15. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности измерения координат полос

Метод основан на дискретизации пограничной зоны интерференционной полосы, что, в результате, дает эффект выделения контура изображения, как его изофоты. Выделение изофоты изображения достигается путем использования приемника изображения, имеющего световую характеристику импульсной формы [8].

Пограничная зона интерферограммы при трансформации изображения, характеризуемого применением импульсной функции преобразования, сама приобретает импульсный характер распределения интенсивности; происходит оконтуривание края тени с выделением изофоты. При этом резко возрастают пограничные градиенты в полученном изображении.

В процессе такой трансформации изображения выделение изофоты осуществляется программно в ходе цифровой (компьютерной) обработки массива данных, описывающих теневую картину. При макетировании и отладке метода использован образец РДИ-интерферометра, оснащенный ТАИ, а также компьютер с программным пакетом Adobe Photoshop, в котором присутствует опция выделения контура обрабатываемого изображения.

Немногочисленные местные мелкоструктурные искажения контурной пограничной линии связаны с местными дефектами полученного оптического изображения и остаточными шумами системы отображения и обработки изображения. Исследованиями и

практикой проведения измерений здесь выявлено, что такие местные искажения не сказываются на точности и достоверности измерений.

Экспериментальная отладка и испытания метода показали, что проводимая изофотометрия интерференционной картины позволяет дополнительно повысить точность считывания координаты края интерферограммы в 8–12 раз.

На полученном таким способом изображении интерферограммы, как видно из рис. 16, плавная пограничная зона преобразована в четкую штриховую линию.

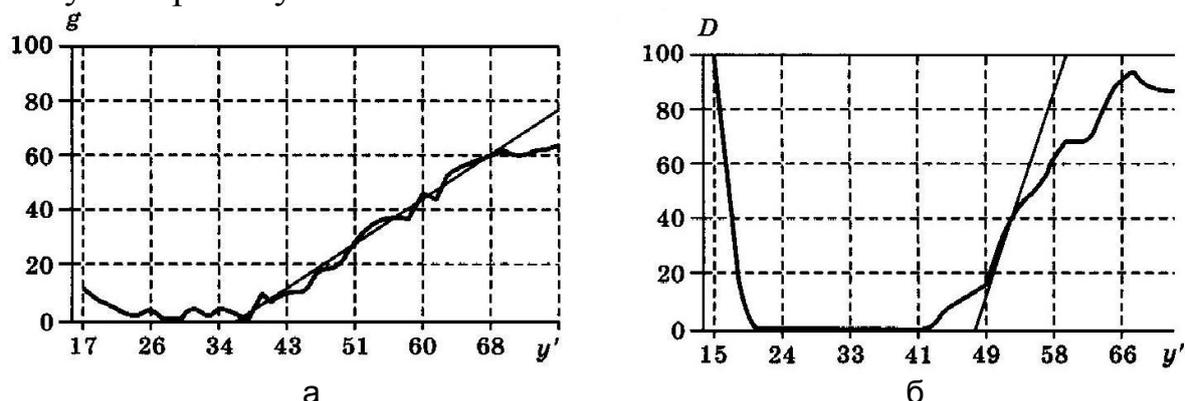


Рис. 16. Изображение интерферограммы: оконтуривание края интерференционной полосы (а); возрастание пограничных градиентов (б)

Наблюдаемые местные отклонения формы штрихового края объясняются наличием шумов изображения (рис. 17). Сопоставление ширины пограничной зоны на исходном фотоснимке и ширины штриха на трансформированном изображении показывает, что в результате операции оконтуривания наблюдаемая ширина пограничной зоны интерферограммы, полученная с применением разработанных здесь оптических средств повышения резкости изображения, уменьшается не менее, чем в 8 раз для локального участка пограничной зоны.

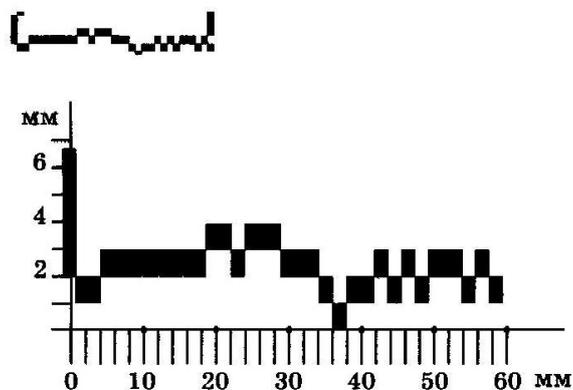


Рис. 17. Влияние шума вдоль штриховой границы полосы

Влияние шума вдоль штриховой границы полосы несколько снижает этот результат. За счет шумовых разбросов область локализации границы штрихов возрастает с 0,1 мм (для данной разрешающей способности сканирования) до 0,4 мм по максимальным шумовым разбросам. Наиболее объективной характеристикой такой штриховой границы можно считать величину среднего квадратического отклонения (СКО) координаты границы. Дан анализ этой величины в цифровом изображении оконтуренной границы.

Статистическая обработка дала следующие результаты:

$$\sigma_{z'} = \pm 0,087 \text{ мм},$$

где $\sigma_{z'}$ – СКО координаты границы.

Таким образом, можно считать, что под влиянием шумов штриховая граница расширяется в 2 раза. Итак, с учетом шумов изображения, точность локализации координаты границы в результате оконтуривания пограничной зоны в интерферограмме (рис. 18) возрастает не менее, чем в 4 раза.

Достигнутый результат, на наш взгляд, является достаточно убедительным, так как во многих областях исследований повышение точности, например, в 2 раза служит серьезным достижением.

Получена экспериментальная зависимость СКО наведения на границу интерферограммы от уровня градиента (рис. 18).

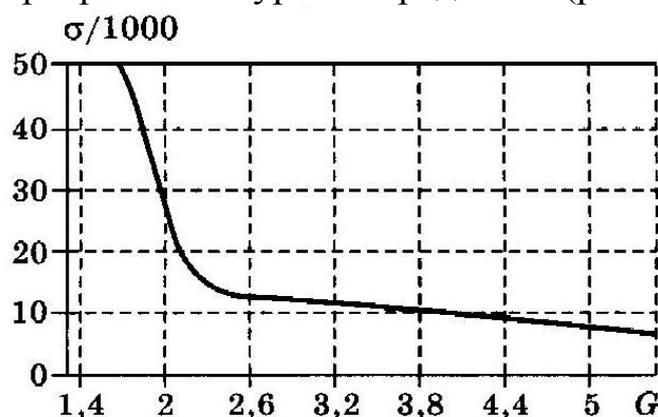


Рис. 18. Экспериментальная зависимость СКО наведения на границу интерферограммы от уровня градиента

3. МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ И ИНТЕРПРЕТАЦИИ ИНТЕРФЕРОГРАММ

3.1. Компьютерные методы

Примером высококачественного программного обеспечения для обработки интерферограмм служит пакет исследовательских программ **Zebra MathOPTIX**, предназначенный для обработки и анализа данных интерферометрических измерений. Программное обеспечение разработано в Санкт-Петербургском национальном исследовательском университете информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО) на кафедре прикладной и компьютерной оптики (ПиКО) творческим коллективом MathOPTIX Group. Пакет содержит ряд специализированных программ, позволяющих осуществлять автоматизированный ввод интерферограммы в компьютер, выполнять ее автоматизированную расшифровку, всестороннюю обработку и интерпретацию данных, включая определение характера и величины аберраций, а также вычисление характеристик качества изображения.

Программа **Zebra Master** предназначена для регистрации, обработки и анализа интерференционных картин с целью получения информации о деформации исследуемых волновых фронтов.

Программа позволяет конвертировать интерференционные картины из наиболее распространенных графических форматов файлов (BMP, TIFF, GIF и JPEG), что дает возможность использовать эту программу и без непосредственного подключения компьютера к интерферометру.

Практика показала возможность и удобство применения цифровой фотокамеры для регистрации интерферограмм и последующего накопления их на компьютерных носителях информации с тем, чтобы далее, после отбора необходимых изображений ввести их в программу **Zebra Master**, выполнить цикл обработки и получить требуемые результаты. Такая технология особенно продуктивна, если иметь в виду действие вибраций, приводящих к постоянному и нерегулярному перемещению системы интерференционных полос. В этих условиях принятый в производственной практике способ регистрации состоит в получении серии кадров интерферограммы в заданных условиях с последующим отбором наиболее удачных изображений.

Zebra Master автоматизирует все этапы обработки интерферограмм, делая этот процесс удобным, быстрым и точным.

3.2. Основные возможности программы

- Регистрация интерферограммы с использованием любого устройства ввода изображений, поддерживающего интерфейс TWAIN (такие, как видеокамера, цифровая фотокамера или сканер).
- Конвертирование интерференционных картин из наиболее распространенных графических форматов файлов (BMP, TIFF, GIF и JPEG).
- Сохранение интерферограммы, а также результатов их обработки, в файл с дополнительными параметрами в формате IGM (IGM – стандартный формат программы Zebra Master, который можно использовать в случае необходимости повторной обработки ранее зарегистрированных, обработанных и сохраненных на диске интерферограмм).
- Выполнение предварительной обработки интерферограмм с целью улучшения их качества (учет неравномерности освещенности интерферограммы, устранение шумов).
- Выбор из серии зарегистрированных интерферограмм лучшей по контрасту.
- Выполнение автоматизированной обработки интерферограмм (определение преимущественного направления полос, контура интерферограммы, координат максимумов интерференционных полос (рис. 19)).

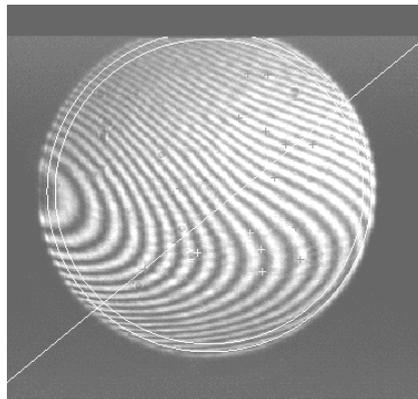


Рис. 19. Сложная интерферограмма как модель для отладки нового поколения программного обеспечения расшифровки

- Определение параметров математической модели измеряемой функции волнового фронта и ее числовых характеристик (коэффициенты разложения по полиномам Цернике, размах деформации и среднеквадратическое значение, размах и направление составляющей комы, направление астигматической составляющей и т.п.).

3.3. Дифракционная интерферометрия

В настоящее время происходит бум в области исследований и разработок в направлении дифракционной интерферометрии. Это выражается в явном увеличении числа публикаций в зарубежных изданиях, расширении числа исследователей, связавших себя с развитием данной тематики. Ведущие зарубежные фирмы изучают, заимствуют и даже патентуют созданные нами решения.

Причиной такого повышения научно-технической активности в данном направлении можно считать появление новых научно-технических направлений, требующих применения ведущих достижений интерферометрии, так как возможности традиционных методов и интерферометрических схем оказались недостаточными для решения вновь возникающих задач высоких технологий, таких как современная нанолитография, космическое телескопостроение, современная прецизионная исследовательская микроскопия.

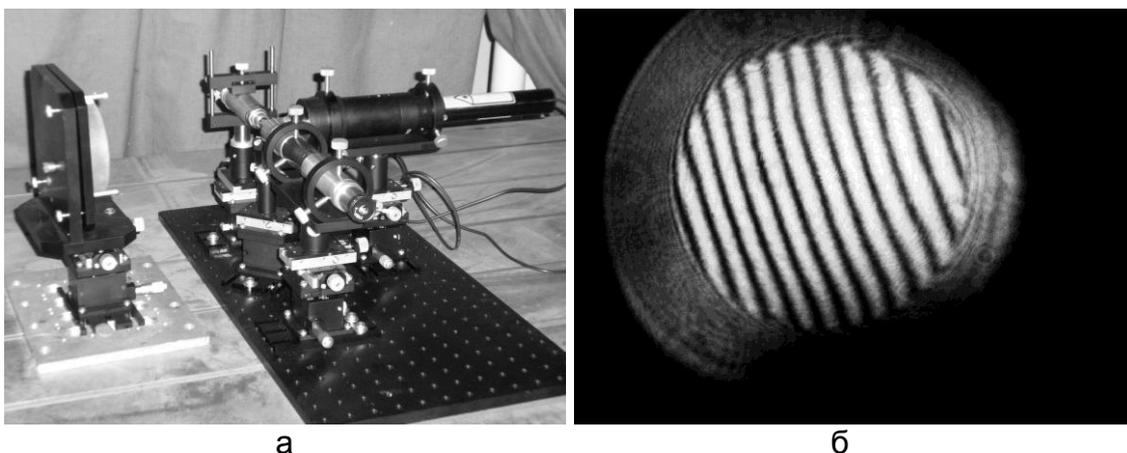


Рис. 20. Установка исследования прецизионного сферического зеркала на основе PDI-интерферометра на виброизолирующем интерференционном столе (а) и вид интерферограммы (б)

На рис. 20 показан образец конструктивного решения дифракционного интерферометра. Интерферометр для исследования прецизионной оптики микроскопов, обеспечил создание нового комплекта объективов для современных микроскопов (выпускаемых ныне в России и в Китае). На макете рассмотренного интерферометра проводились исследования опытных образцов микрообъективов ОА-6,3Л, ОПХ-10Л, ОПХ-25Л, ОПХ-40Л, ОПХ-100Л и ОА-63ЛБ, которыми комплектуются опытные образцы люминесцентных микроскопов ЛЮМАМ. Эта работа продемонстрировала широкие возможности прибора, в частности, его способность контролировать микрообъективы с большим диапазоном увеличений при минимальном времени перенастройки.

Представленный образец интерферометра (рис. 20), созданный для решения задач современной нанолитографии В.К. Кирилловским и Н.Б. Вознесенским на базе узлов, серийно выпускаемых фирмами Melles-Griot и ОАО «ЛОМО».

Более совершенная конструкция (рис. 21, а), разработана по техническому заданию В.К. Кирилловского талантливым инженером В.А. Удаловым для технологического контроля и аттестации прецизионных оптических систем космических телескопов в условиях производства. Обращает на себя внимание высокое качество интерферограммы (рис. 21, б). Технические данные интерферометра ПК-881М, представлены в табл. 2.

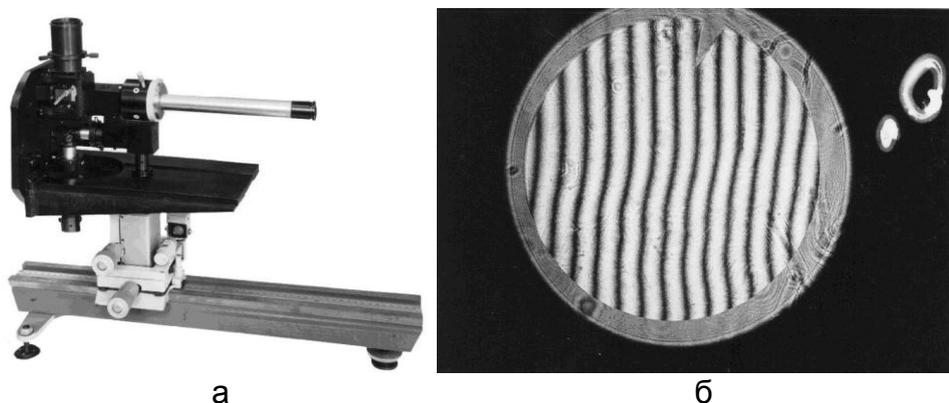


Рис. 21. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом (а) и вид интерферограммы (б)

Таблица 2. Технические данные интерферометра ПК-881М (ОАО «ЛОМО»)

Предельная инструментальная погрешность	$\lambda/100$
Апертура проверяемых поверхностей	не более 0,25
Числовая апертура осветительных объективов	0,2
Числовая апертура объектива наблюдательной системы	0,3
Пределы перемещения интерференционной головки по 3-м осям, мм	± 10
Приемник изображения	фотокамера «Зенит-Е» и цифровая фотокамера
Источник света	Лазер ЛГ-52-1
Длина волны излучения, мкм	0,6328
Габариты, мм	735×400×590
Масса, кг	16

3.4. Основные правила работы с программой Zebra Master

1. Интерферограмма может быть открыта из файла в графических форматах BMP, TIFF, GIF и JPEG или из файла в формате IGM.
2. Фильтрация интерференционной картины – является первым этапом обработки интерференционной картины (рис. 22).

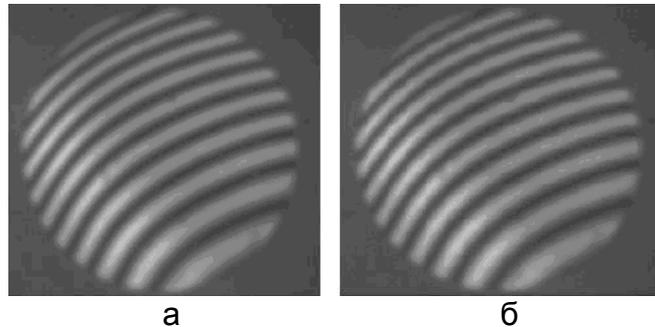


Рис. 22. Фильтрация шумов интерферограммы в программе Zebra Master: до фильтрации (а); после фильтрации (б)

Фильтрация интерферограммы приводит к устранению шумов, что способствует более стабильной работе алгоритмов расшифровки.

3. Вторым этапом обработки интерференционной картины является определение контура интерферограммы (рис. 23).

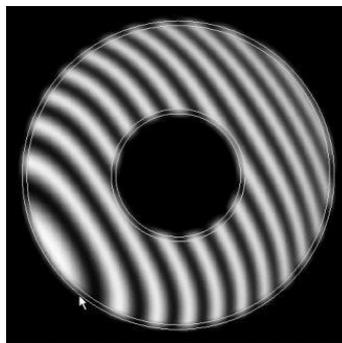


Рис. 23. Автоматическое определение контура интерферограммы программой Zebra Master

При обработке интерферограмм, полученных при контроле деталей с отверстием в поле «Экранирование» необходимо указать относительный коэффициент экранирования. Размеры и положение контура можно изменять с использованием мыши.

4. Третьим этапом обработки интерференционной картины является определение линии первоначального сканирования. При переходе к этому этапу программа определяет линию сканирования автоматически (рис. 24).

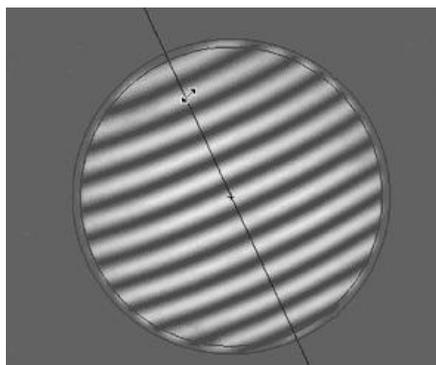


Рис. 24. Автоматическое определение линии первоначального сканирования

5. Четвертый (основной) этап обработки – расстановка точек на интерференционных полосах (рис. 25).

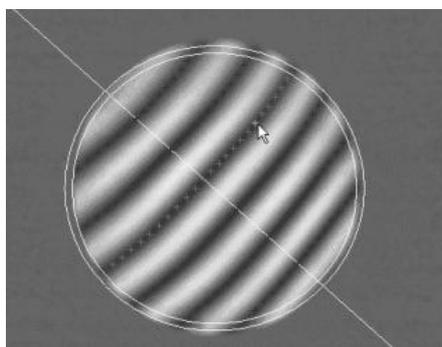


Рис. 25. Расстановка точек на интерференционных полосах

Расстановка точек на минимумах полос является более стабильной и менее зависимой от уровня шумов и яркости интерференционных полос.

Также возможна расстановка точек на максимумах интерференционных полос, которую предпочтительно использовать при обработке качественных (не зашумленных, с равномерной освещенностью) интерференционных картин.

Каждая интерференционная полоса соответствует определенному значению деформации волнового фронта, причем значение деформации волнового фронта от полосы к полосе изменяется на одну длину волны. При нумерации полос не существенно с какой стороны начинается нумерация полос, но обязательным условием восстановления функции деформации волнового фронта является точное соблюдение относительного изменения величины деформации волнового фронта. Для выполнения этого условия требуется, чтобы полосы имели сквозную нумерацию.

Если алгоритм при автоматической расстановке точек пропускает полосу, т.е. между полосой, предшествующей пропущенной, и полосой, следующей за пропущенной,

автоматически принимается разность функции деформации волнового фронта, равная одной длине волны, следует увеличить номер полосы на единицу. Для этого нужно нажать кнопку «Увеличить номер полосы» и выбрать в списке полос номер полосы, следующей за пропущенной. Если пропущено больше одной полосы, то номер полосы, следующей за последней пропущенной, следует увеличить на количество пропущенных полос.

6. Пятый (последний) этап обработки интерференционной картины – аппроксимация функции деформации волнового фронта по полиномам Цернике (рис. 26).

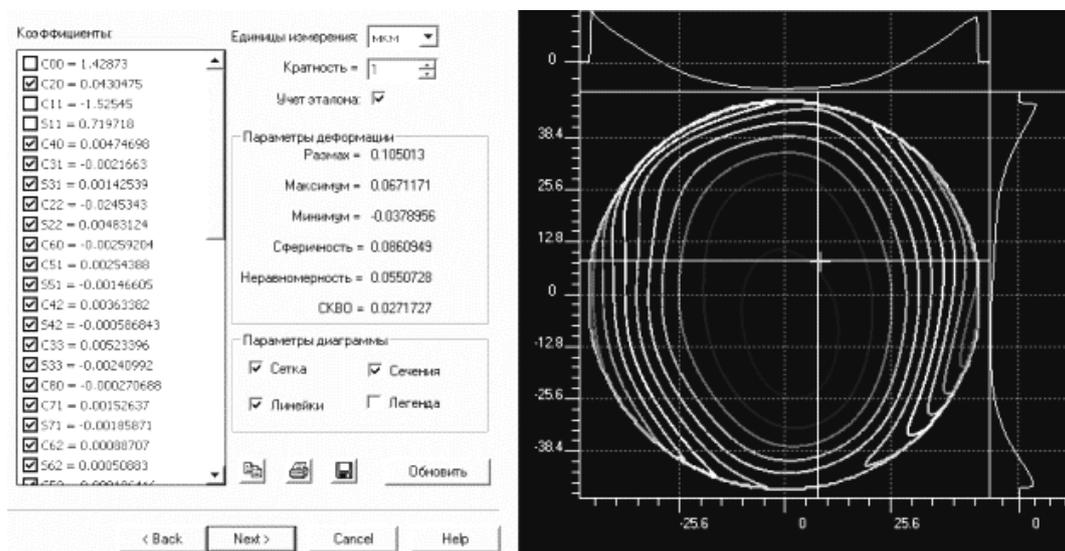


Рис. 26. Аппроксимация функции деформации волнового фронта по полиномам Цернике

С использованием данного диалогового окна можно выполнить рабочий анализ результатов, полученных после аппроксимации.

В списке «**Коэффициенты**» отображаются все коэффициенты полиномов Цернике.

В зависимости от выбранного набора коэффициентов определяются все характеристики функции деформации волнового фронта: размах, максимальное и минимальное значения волнового фронта, СКО деформации, величина сферичности и нерегулярности.

В группе «**Параметры деформации**» отображаются основные параметры деформации волнового фронта. Размах, максимум, минимум и СКО вычисляются согласно выбранным коэффициентам деформации и выборки восстановленного волнового фронта. Сферичность и нерегулярность вычисляются независимо от выбранных коэффициентов.

Элементы управления из группы **«Параметры диаграммы»** позволяют изменить внешний вид диаграммы волнового фронта: включить и отключить отображение сетки, линейки, сечений и легенды. С помощью мыши в области просмотра можно установить линии анализируемых горизонтального и вертикального сечений.

3.5. Программа Zebra Imager

Программа Zebra Imager предназначена для анализа характеристик качества оптического изображения: ФРТ; ФРЛ; ФКЭ; пограничной кривой; МПФ; фазовой передаточной функции.

4. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ, СФОРМИРОВАННОГО ИССЛЕДУЕМОЙ СИСТЕМОЙ, МЕТОДАМИ ПРЯМЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

4.1. Понятие качества изображения оптической системы

Сложный процесс создания современной оптической системы может быть разделен на два этапа: проектирование и изготовление. На первом этапе производится расчет параметров системы и расчетная оценка качества изображения, которое она может обеспечить. При изготовлении стремятся получить реальную систему с параметрами, насколько возможно близкими к расчетным. Полученное качество изображения оценивается средствами оптических измерений.

Сведения о структуре изображения, построенного изготовленной оптической системой, могут быть получены прямым и косвенным путями. Способы прямой оценки состоят в наблюдении изображения тест-объекта, сформированного при помощи исследуемой системы, и измерении фотометрической структуры этого изображения. В качестве тест-объектов обычно используются: освещенная точечная диафрагма, узкая щель, полуплоскость, линейная и радиальная решетки абсолютного контраста, решетка с синусоидальным законом распределения яркости. Данные измерений позволяют определить значения таких критериев качества изображения, как: разрешающая способность, пороговый контраст, концентрация энергии и т.д.

Эти величины могут быть получены при необходимости и косвенным путем – при математической обработке данных – по форме волнового фронта, сформированного в зрачке исследуемой системы. Преимущества косвенных методов состоят в том, что они позволяют по известной топографии отклонений фронта волны рассчитать большинство характеристик качества изображения. Результаты, полученные этими методами, не зависят от особенностей приемника изображения в схеме контроля. Косвенные методы дают возможность определить влияние конкретных искажений волнового фронта, вносимых системой, на качество изображения.

В ряде случаев косвенные методы обеспечивают высокую точность измерения отдельных характеристик системы, например, концентрации энергии в изображении, если этому не препятствуют ограничения, присущие таким методам. К ограничениям косвенных методов следует отнести высокую трудоемкость расшифровки данных для их ввода в ПК, сложный математический аппарат

обработки данных, требующий использования сложного и дорогостоящего программного обеспечения. Кроме того, при таких оценках не учитывается влияние на качество изображения малых дефектов оптических поверхностей, возникающих в процессе обработки, например, при ретуши астрономических зеркал, а также светорассеяния и бликов в системе.

Эти факторы учитываются прямыми методами оценки качества изображения, к ограничениям которых следует отнести субъективность оценок при визуальных наблюдениях, экспериментальные трудности при измерениях и сложность определения места расположения дефектов систем, приводящих к потере качества изображения.

В наши дни этот метод широко применяется: для контроля качества вогнутых сферических поверхностей, оптики микроскопов, высококачественных фотообъективов, объективов зрительных труб и т.д. Исследуемая оптическая система при этом устанавливается так, чтобы образовалось действительное изображение светящейся точки, которое рассматривают в окуляр или в микроскоп.

Если контролируемая поверхность имеет идеальную форму, то отраженные лучи образуют гомоцентрический пучок, а изображение светящейся точки имеет вид дифракционного кружка: резко очерченный яркий центральный максимум и гораздо менее яркое светлое кольцо.

Тест-объектом при количественных исследованиях служит освещенная диафрагма малого диаметра или ее уменьшенное изображение. Диаметр светящейся точки должен быть на порядок меньше диаметра дифракционного кружка, который способна построить исследуемая система, что можно выразить соотношением:

$$d = \frac{0,122\lambda}{A}, \quad (2)$$

где A – передняя апертура оптической системы ($A = \sin \sigma$, где σ – апертурный угол в пространстве предметов); λ – длина волны света в схеме контроля.

Если контролируемый волновой фронт, образованный исследуемой системой, искажен ошибками, это вызывает перераспределение энергии в дифракционных кольцах и искажение формы дифракционного кружка. В практике контроля оптических систем по виду дифракционной точки иногда достаточно установить сам факт отклонения контролируемой поверхности от идеальной формы; при этом оценка погрешностей имеет, конечно,

ориентировочный характер. Экспериментальные данные о распределении освещенности в изображении точки, построенном данной системой, часто анализируются сопоставлением с характеристиками дифракционного пятна для идеальной системы данной апертуры.

4.1.1. Передача изображения через оптическую систему

Значение функции рассеяния $D(y', z')$, характеризующей закономерность распределения освещенности в изображении светящейся точки, дает возможность рассчитать распределение освещенности в изображении $I(x', y')$ при заданном распределении яркости объекта $O(x, y)$ [9, 10].

Изображаемый предмет рассматривается как совокупность светящихся точек при некоторых исходных условиях:

- оптическая система изопланатична, т.е. для любой точки объекта ФРТ в плоскости изображения одна и та же;
- система линейна, т.е. если яркостям в точках объекта соответствуют определенные освещенности в сопряженных точках изображения: $O_1 \rightarrow I_1, O_2 \rightarrow I_2$, то соблюдается соотношение $O = C_1 O_1 + C_2 O_2 \rightarrow C_1 I_1 + C_2 I_2$;
- соблюдается условие единичного увеличения, т.е. масштаб изображения приведен к масштабу объекта.

В этом случае освещенность в любой точке изображения определяется как сумма освещенностей (от всех точек предмета), распределенных в эту точку, что выражается формулой:

$$I(x', y') = \iint_O O(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy. \quad (3)$$

Этот интеграл называется **сверткой**. Сокращенно операция свертки обозначается как

$$I = O \otimes h. \quad (4)$$

Итак, распределение освещенности в плоскости изображения есть свертка функций распределения освещенности в объекте и в пятне рассеяния оптической системы.

В современной теории образования изображения применяется и второй способ представления объекта, заключающийся в том, что объект рассматривается как сумма элементарных объектов, яркость в которых распределена по синусоидальному закону. Таким образом, объект представляется в виде суперпозиции синусоидальных решеток, различающихся амплитудой, пространственной частотой и

фазой, т.е. расположением на плоскости. При рассмотрении особенностей изображения оптической системой синусоидального объекта обнаруживается, что его изображение также является синусоидальной решеткой. Изображение сложного объекта получается суммированием изображений синусоидальных составляющих.

В этом случае передача изображения через оптическую систему описывается математическим аппаратом Фурье. Непериодическая функция, выражающая распределение яркости в объекте, может быть выражена интегралом Фурье, представляющим бесконечную сумму бесконечно близких по частоте составляющих. В комплексном выражении некоторую непериодическую функцию $f(y)$ можно записать как:

$$f(y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega y} d\omega,$$

где $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) e^{-i\omega y} dy$; ω – круговая частота; v – пространственная частота, мм^{-1} .

Функция $F(\omega)$ – преобразование Фурье-функции $f(y)$ или ее спектр пространственных частот.

Найдем преобразование Фурье двумерного объекта:

$$O(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x, y) e^{-2\pi i(\mu x + \nu y)} dx dy. \quad (5)$$

Эту операцию можно записать сокращенно:

$$O(x, y) \xrightarrow{F} o(\mu, \nu).$$

Аналогично для функции двумерного изображения

$$I(x, y) \xrightarrow{F} i(\mu, \nu),$$

$$h(x, y) \xrightarrow{F} D(\mu, \nu).$$

Известно, что преобразование Фурье-свертки можно выразить просто как произведение Фурье-преобразований, свертываемых функций. Получаем в итоге следующее соотношение:

$$i(\mu, \nu) = o(\mu, \nu) D(\mu, \nu), \quad (6)$$

откуда следует, что Фурье-преобразование функции изображения равно произведению Фурье-преобразований функции объекта и функции изображения изолированной точки. Это значит, что если объект и его изображение выражены в виде суперпозиции наложенных синусоидальных решеток различных частот и амплитуд, то амплитуда каждой частотной составляющей изображения $i(\mu, \nu)$

может быть найдена перемножением соответствующей частотной составляющей объекта $o(\mu, \nu)$ на некоторую функцию $D(\mu, \nu)$, которая называется **ОПФ**. Как мы видели, ОПФ может быть получена как Фурье-преобразование ФРТ.

Спектральный подход к процессу образования изображения оптическим прибором создает ряд преимуществ. Он позволяет находить распределение освещенности в изображении, при известной функции объекта и ФРТ и в то же время без вычисления свертки. ОПФ каскада приборов определяется как простое произведение всех ОПФ отдельных звеньев.

В приборах, предназначенных для передачи мелкой структуры протяженных объектов (например, в аэрофотографии), можно значительно нагляднее судить об особенностях передачи структуры по ОПФ, чем по ФРТ.

В приборах, предназначенных для получения изображений точечных объектов (например, в телескопах) или изображений линии (в спектральных приборах) функции рассеяния дают самое прямое и наглядное представление о качестве изображения.

Распределение освещенности в изображении точки, построенном идеальной оптической системой, описывается выражением:

$$D(y', z') = \left[\frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2, \quad (7)$$

где $J_1(Z)$ – функция Бесселя 1-го рода 1-го порядка аргумента Z .

$$Z = 2\pi r' \cdot \frac{A'}{\lambda},$$

где r' – расстояние от центрального максимума в плоскости изображения точки; λ – длина волны света; A' – задняя апертура объектива.

$$A' = \sin \sigma',$$

где σ' – апертурный угол в пространстве изображений.

$$r' = \sqrt{(x')^2 + (y')^2},$$

где x' и y' – текущие координаты в плоскости изображения.

Значения функции рассеяния для идеального оптического прибора используются в виде таблицы. Радиусы дифракционных колец, выраженные в значениях Z , составляют для светлых максимумов дифракционного кружка: $Z_{\max} = 0; 5,14; 8,46; 11,62$ и т.д.

Для темных минимумов освещенности, где функция Бесселя $J_1(Z)$ принимает нулевые значения, имеем: $Z_{\min} = 3,83; 7,02; 10,17$ и т.д.

Известны также и значения относительных освещенностей в дифракционном кружке идеального прибора. В минимумах они должны быть равны нулю, а в максимумах, начиная с центрального, они составляют: $D(y'_{\max}) = 1; 0,0175; 0,0042; 0,0016$ и т.д.

Представляют также интерес величины освещенности при различных значениях величины Z , которые приведены в табл. 3.

Таблица 3. Величины освещенности при различных значениях величины Z

Z	0	1	2	3	4	5	6
$h(x', y')$	1	0,77	0,33	0,05	0,017	0,001	0,0017

На практике широко используется величина радиуса первого темного кольца дифракционного пятна:

$$r_0 = \frac{0,61\lambda}{A'}. \quad (8)$$

В частности, эта величина связана с так называемым **критерием Релея**, согласно которому предельное разрешение оптического прибора при изображении им двух близко расположенных светящихся точек достигается при попадании центрального максимума одного дифракционного кружка на первый минимум второго кружка. Эту величину называют также **линейным пределом разрешения по Релею** [4, 9].

Теперь рассмотрим более подробно ОПФ. Из уравнения (6) видим, что преобразование Фурье распределения освещенности в изображении $i(\mu, \nu)$ отличается от преобразования Фурье-функции распределения яркости в объекте $o(\mu, \nu)$ коэффициентом $d(\mu, \nu)$, который и назван ОПФ и является преобразованием Фурье ФРТ. Таким образом, ОПФ может быть представлена в виде:

$$d(\mu; \nu) = \iint_{-\infty}^{\infty} D(y; z) e^{-2\pi i(\mu y + \nu z)} dy dz. \quad (9)$$

Для одномерного тест-объекта (освещенной щели) имеем:

$$d(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} D(y) e^{-2\pi i\mu y} dy. \quad (10)$$

Пользуясь формулой Эйлера

$$e^{-2\pi i\mu y} = \cos \pi\mu y - i \sin \pi\mu y,$$

получим выражение для одномерной ОПФ, состоящее из вещественной и мнимой частей:

$$d_{\text{л}}(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} D_{\text{л}}(y) \cos \pi \mu y dy - i \int_{-\infty}^{\infty} D_{\text{л}}(y) \sin \pi \mu y dy =$$

$$= T_c(\mu) - iT_s(\mu). \quad (11)$$

ОПФ можно записать с помощью модуля $T(\mu)$ и аргумента $\varphi(\mu)$:

$$d_{\text{л}}(\mu) = T(\mu) e^{i\varphi(\mu)}. \quad (12)$$

Модуль ОПФ характеризует способность системы передавать контраст объекта при изображении структур различной частоты и называется **МПФ** или ЧКХ-системы. Вторая часть выражения является аргументом ОПФ

$$\varphi(\mu) = \arg d_{\text{л}}(\mu),$$

который характеризует правильность передачи оптической системой пространственного расположения малых структурных элементов и называется **частотно-фазовой характеристикой (ЧФХ)**.

Объект, состоящий из постоянной составляющей и синусоидальной гармоники, может быть описан выражением:

$$O(y) = b_0 + b_1 \cos 2\pi \mu y, \quad (13)$$

где b_0 – средняя яркость; b_1 – амплитудное значение яркости; μ – частота.

Распределение освещенности в изображении объекта

$$I(y) = b_0 + b_1 T_{\mu} \cos(2\pi \mu y - \varphi). \quad (14)$$

Выражения (13) и (14) отличаются появлением фазового угла φ , показывающего смещение изображения – фазовый сдвиг, и изменением амплитуды b_1 в T_{μ} раз.

Используем формулу для определения контраста синусоидального объекта:

$$K = \frac{E_{\text{max}} - E_{\text{min}}}{E_{\text{max}} + E_{\text{min}}} = \frac{b_1}{b_0}, \quad (15)$$

где E_{max} и E_{min} – соответственно максимальная и минимальная интенсивности (яркость предмета или освещенность изображения).

Определим контраст объекта

$$K_o = \frac{b_1}{b_0}.$$

Для изображения

$$K_I = \frac{b_1 T_\mu}{b_0}$$

отсюда коэффициент изменения амплитуды

$$T_\mu = \frac{K_I}{K_o}. \quad (16)$$

Значение МПФ на фиксированной частоте называют **коэффициентом передачи контраста**.

Типичная МПФ оптической системы при увеличении частоты плавно приближается к оси частот. Следовательно, оптическая система неодинаково воспроизводит крупные и мелкие детали объекта: мелкие, соответствующие высоким пространственным частотам, воспроизводятся с меньшим контрастом.

Если ФРТ симметрична, то ЧФХ равна нулю, и для оценки такой системы достаточно использовать только МПФ.

4.1.2. Критерии оценки качества оптического изображения

Практика оценок оптических систем в условиях их крупносерийного производства показывает, что характеризовать качество изображения функциональной зависимостью недостаточно удобно и излишне трудоемко. Требуется охарактеризовать качество изображения одним числом. Такое число, называемое **критерием качества изображения**, получают: при анализе выбранной характеристики качества изображения; либо непосредственно из самого изображения выбранного тест-объекта.

Рассмотрим критерии качества изображения в порядке, близком к исторической последовательности их появления.

1. Линейный предел разрешения по Релею. Это один из первых критериев. Он был разработан с появлением телескопов и микроскопов. Линейный предел разрешения измеряется как минимальное расстояние между двумя точками объекта, при котором они видны раздельно через оптический прибор при непосредственном наблюдении в высококачественный микроскоп.

Определим линейный предел разрешения с помощью ФРТ и ОПФ. Если $D_1(y, z)$ и $D_2(y, z)$ – распределения освещенности в двух раздельных изображениях светящихся точек, то при близком расположении точек их изображения частично накладываются друг на друга и дают некоторое суммарное распределение освещенности.

Обозначив расстояние между точками в объекте как ε , определим контраст в изображении пары точек:

$$K = \frac{I(y=0) - I\left(y = \frac{\varepsilon}{2}\right)}{I(y=0)} \geq K_{\text{п}}, \quad (17)$$

где $K_{\text{п}}$ – пороговый контраст приемника изображения.

Две точки объекта различаются, если контраст в их изображении больше или равен пороговому контрасту приемника. Если разрешение удовлетворяет критерию Релея, то центральный максимум первой точки накладывается на первый минимум второй точки. При этом контраст в изображении пары точек составляет 22,5%.

2. **Частотный критерий.** На практике разрешающая способность часто определяется по предельному числу линий R , воспроизводимых на 1 мм длины изображения:

$$R = \frac{1,64 A'}{\lambda}, \quad (18)$$

где A' – задняя апертура исследуемой системы.

Величина разрешения показывает, какую частоту можно воспроизвести при данной апертуре идеальной системой, т.е. системой, не имеющей aberrаций и формирующей сферический волновой фронт.

Для оценки по частотным критериям пользуются ФПМ. Графики МПФ позволяют осуществить анализ создаваемого объективом изображения и наглядно показывают, с каким контрастом передает объектив ту или иную пространственную частоту.

Критерием оценки качества системы по МПФ служит точка пересечения графика МПФ и графика контрастной чувствительности приемника изображения.

Применяя частотные критерии к объективам, строящим изображение для последующего рассматривания (фотокинообъективы, телевизионные и проекционные системы), стремятся к определению числовых соотношений, связывающих результаты измерений с субъективной оценкой качества изображения. При этом критерии классифицируются в соответствии с требованиями, предъявляемыми к изображению.

3. **Разрешающая способность** является удобным критерием для оценки объективов, предназначенных для различения малых деталей объекта. В настоящее время этот критерий используется при контроле качества

большинства кинофотообъективов. Его ограниченность состоит в том, что во многих случаях передача деталей, близких к пределу разрешения, не влияет решающим образом на оценку изображения.

Известны попытки использовать для получения критерия качества изображения среднее значение МПФ в «сюжетно важном» интервале пространственных частот. Например, для малоформатных фотообъективов принимают интервал $\mu = 0 - 40$ мм. Критерий вычисляется по формуле

$$J = \frac{1}{\mu_{\text{пр}}} \int_0^{\mu_{\text{пр}}} T(\mu) d\mu, \quad (19)$$

где $\mu_{\text{пр}}$ – частота, принятая в качестве предельной на «сюжетно важном» интервале.

Предложено также оценивать качество изображения по МПФ, определяя значение контраста на некоторой критической частоте $\mu_{\text{кр}}$. Наиболее распространенным является определение $\mu_{\text{кр}}$ при $E = 0,8$.

При оценке оптических систем для телевидения используется соотношение

$$\mu_{\text{кр}} = \frac{n}{2h_r}, \quad (20)$$

где n – число строк разложения, $n = 625$; h_r – размер чувствительной площадки передающей телевизионной трубки. Обычно $h_r = 24$ мм, тогда $\mu_{\text{кр}} = 13$ мм⁻¹.

Существует ряд других критериев, основанных на математической интерпретации МПФ, однако до настоящего времени исследования по определению преимущественного критерия не завершены.

4. **Концентрация энергии в пятне рассеяния.** Значение концентрации энергии пятна рассеяния в кружке заданного диаметра широко используется в качестве критерия оценки качества астрономических систем.

Строго говоря, энергия распределена по всей плоскости, в которой сформировано изображение светящейся точки. Однако это распределение чрезвычайно неравномерно, и около 84% всей энергии, прошедшей через зрачок при отсутствии аберраций, сосредоточено в центральном максимуме дифракционного пятна.

Концентрацию энергии определяют, исходя из ФРТ системы, и выражают в виде процентного отношения количества энергии, сконцентрированной в кружке данного диаметра, ко всей энергии, формирующей пятно рассеяния:

$$L_K = \frac{F_d}{F}, \quad (21)$$

$$F_d = \int_0^{d/2=r} D(r)rdr, \quad (22)$$

где $D(r)$ – ФРТ.

С другой стороны, вся энергия в пятне рассеяния:

$$F = \int_0^{\infty} D(r)rdr. \quad (23)$$

Величины F_d и F в ряде случаев могут быть непосредственно измерены фотометром. Кроме того, их можно определить математической обработкой ФРТ, методика измерения которой рассмотрена в табл. 4.

Таблица 4. Концентрация энергии для ФРТ идеальной системы

Z	3,832	7,016	10,173	13,324	16,471
$L_k(y')$	0,8378	0,9099	0,9376	0,9523	0,9614
Диф. минимум	1	2	3	4	5

4.1.3. Задача исследования структуры пятна рассеяния

Обобщая изложенные теоретические предпосылки методов контроля и аттестации оптических систем, отметим следующее.

1. При контроле качества оптических систем требуются оценки следующих основных характеристик:

- качества изображения;
- aberrаций системы;
- формы оптических поверхностей.

Указанные характеристики связаны между собой однозначными математическими зависимостями, которые позволяют, при известных волновых aberrациях, рассчитать распределение освещенности в изображении светящейся точки, т.е. ФРТ. Однако при этом приходится помнить, что такие вычисления требуют мощного компьютера и дорогостоящего программного обеспечения. Не менее затратна расшифровка результатов измерения формы волнового фронта (например, по

интерферограмме) и ввод этих данных в ПК.

2. При оценке качества изображения большой интерес представляет способ прямого измерения структуры изображения точечного тест-объекта. Экспериментально найденная ФРТ, характеризующая качество системы, позволяет учитывать все особенности волновой поверхности, сформированной системой, в том числе и характер микрорельефа оптических поверхностей; дефекты оптических материалов; блики; отклонения пропускания (или отражения) на зрачке; сдвиги изображения, возникающие при работе прибора и т.д. С помощью ФРТ в усредненной и мгновенной форме можно учитывать флуктуации оптических характеристик воздушного тракта, непрерывно изменяющиеся во времени по сложному случайному закону. ФРТ позволяет надежно аттестовать качество изображения системы с несколькими зрачками.
3. ФРТ, являясь первичной характеристикой качества изображения, позволяет перейти к требуемым характеристикам качества изображения, таким, как ФРЛ, ЧКХ, краевая функция, концентрация энергии и другие.

5. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

5.1. Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния

Метод контроля оптических систем и поверхностей по виду дифракционного изображения точки в условиях крупносерийного и массового производства позволяет быстро установить факт отклонения контролируемого волнового фронта от идеальной сферической формы и характер аберраций.

Для контроля качества сферических и плоских поверхностей используется автоколлимационный микроскоп. Предметная точка микроскопа, в которой находится действительное изображение точечной диафрагмы, совмещается с центром кривизны вогнутой сферической поверхности.

Контроль плоских поверхностей по виду дифракционного изображения точки осуществляется с помощью вспомогательного сферического вогнутого зеркала, предварительно аттестованного.

Крупногабаритные вогнутые зеркала обычно контролируются из центра кривизны при внеосевом положении точечного источника и его изображения. Разнос предмета и изображения на практике составляет доли миллиметра.

Если не преследуется цель измерения распределения освещенности в изображении точки, то диаметр диафрагмы, используемой при контроле системы по виду дифракционного кружка, может быть вдвое больше величины, определенной из выражения (2). При этом чувствительность оценки практически не снижается, но повышается световой поток в схеме контроля.

Перед началом контроля проверяют качество и размер светящейся точки, устанавливая в предметной плоскости микроскопа плоское зеркало.

Контроль выпуклых сферических поверхностей в подобной схеме по качеству дифракционного изображения точки требует использования высококачественного высокоапертурного объектива достаточно большого диаметра, превышающего диаметр контролируемой поверхности.

Поскольку диаметр дифракционного кружка зависит от длины волны, то при использовании источника белого света наблюдается радужное окрашивание дифракционных колец и снижается контраст дифракционной картины. В этом случае при аттестации высо-

коточных систем полезно пользоваться в схеме контроля зональным светофильтром.

Контроль линзовых систем производится в проходящем свете (рис. 27).

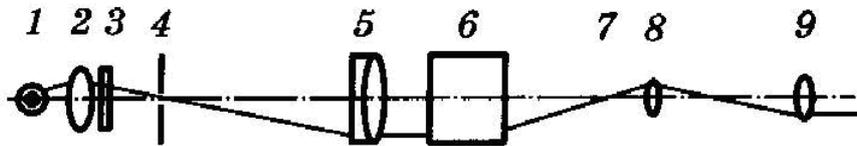


Рис. 27. Контроль линзовых систем

Свет от источника 1 проходит конденсор 2 , светофильтр 3 и собирается в точечную диафрагму 4 , расположенную в фокальной плоскости коллиматора 5 , параллельный пучок лучей, входящий из коллиматора в контролируемый объектив 6 , фокусируется в его фокальной плоскости 7 ; изображение точки рассматривается в микроскоп $8, 9$. Отверстие диафрагмы, которая устанавливается в фокальной плоскости коллиматора, должно удовлетворять соотношению (2). При этом достигается максимальная чувствительность контроля.

При контроле качества изображения по полю апертура микрообъектива определяется из соотношения

$$\sin \sigma_m = \sin(\sigma'_0 + \beta'),$$

где σ_m – апертурный угол микрообъектива; σ'_0 – апертурный угол контролируемого объектива; β' – полевой угол, при котором наблюдается дифракционный кружок.

Требуемый апертурный угол может быть уменьшен, если исследуемую систему повернуть вокруг узловой точки на полевой угол.

5.2. Методы измерения структуры изображения светящейся точки

Результаты визуальных оценок не позволяют определить в количественной форме распределение освещенности в пятне рассеяния $D(y; z)$. Следовательно, они не дают возможности перейти к однозначным количественным критериям оценки качества изображения. Это, в свою очередь, не дает возможности точно количественно аттестовать систему и исключает автоматизацию контроля. В связи с этим в современных условиях, при повышении требований к качеству изображения оптических систем, быстро

развиваются методы количественной оценки структуры пятна рассеяния, которые можно разбить на три основные группы:

1. методы фотоэлектрического сканирования;
2. методы фотографической фотометрии;
3. изофотометрические методы.

5.3. Фотографическая фотометрия

Фотографический процесс, используемый в оптической измерительной системе, имеет ряд существенных достоинств (необходимо указать, что большинство приводимых возможностей сегодня успешно реализуются в быстро развивающейся цифровой фотографии):

1. двумерное воспроизведение исследуемой картины весьма доступными и надежными средствами; стабильность изображения во времени; возможность получения неограниченного количества копий;
2. простота системы регистрации; возможность переноса процесса анализа данных с рабочего места в цехе на универсальную лабораторную аппаратуру обработки изображения и ввода данных в ПК;
3. возможность накопления световой энергии, регистрации малых световых потоков; возможность статистического осреднения освещенности по заданному отрезку времени (таким путем в методе Гартмана устраняются ошибки, вносимые атмосферной турбуляцией);
4. возможность обработки измерительных данных на устройствах двумерной обработки информации;
5. использование самого фотопроцесса в режиме двумерного преобразования информации; квантование по уровням плотности; выделение линий равной плотности; фильтрация пространственных частот при фотообработке; устранение оптических шумов, т.е. приведение измерительной информации к виду, оптимальному для ввода в ПК.

Рассмотрим основные характеристики фотографического процесса применительно к задаче исследования структуры оптического изображения. Светочувствительность фотослоя имеет иной характер, чем чувствительность к свету человеческого глаза или фотоэлектрического приемника. Если последние в обычных условиях реагируют на мгновенное значение яркости объекта, то фотографическая эмульсия реагирует на общее количество световой

энергии, которое в фотографической практике называют **экспозицией** и обозначают как H . При этом действует соотношение:

$$H = Et, \quad (24)$$

где E – освещенность оптического изображения в данной точке на поверхности фотослоя; t – время действия света.

Рассматривание фотографического изображения глазом, т.е. визуальный анализ, в области научной и прикладной фотографии является не единственным и не главным способом извлечения информации. Чаще всего фотоизображение подвергается измерению. Важнейшей измеряемой характеристикой является фотографическое почернение. За меру фотографического почернения принята величина оптической плотности

$$D_{\text{п}} = \lg \frac{I_0}{I} = \lg \frac{1}{\tau}, \quad (25)$$

где I_0 – световой поток, падающий на участок фотографического почернения; I – световой поток, прошедший через участок почернения; $\tau = I/I_0$ – коэффициент пропускания участка изображения.

Оптическая плотность почернения является функцией логарифма экспозиции:

$$D_{\text{п}} = f[\lg(Et)]. \quad (26)$$

Кривая взаимосвязи между измеренным почернением и наложенной экспозицией называется **характеристической кривой фотоматериала**. Этот график строится в осях $D_{\text{п}}$ и $\lg(Et)$ (рис. 28).

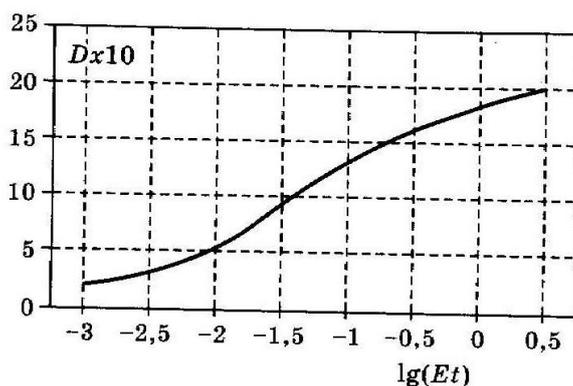


Рис. 28. Характеристическая кривая фотографического материала

Вся характеристическая кривая может быть разделена на четыре участка. Начало характеристической кривой с постоянным почернением небольшой плотности – так называемая «**вуаль**», которая появляется после проявления на участках фотоматериала, не подвергшихся действию света. Область недодержек характеризуется

нелинейной зависимостью плотности от экспозиции. Рабочая часть – прямолинейный участок – характеризуется зависимостью

$$D_{\text{п}} = \gamma \lg(Et), \quad (27)$$

где $\gamma = \operatorname{tg} \alpha$ – тангенс угла наклона прямолинейного участка к оси абсцисс, называемый иначе **коэффициентом контрастности**.

Форма характеристической кривой фотоматериала зависит главным образом от его типа и условий проявления.

На практике, как правило, в выражении (26) значение $t = \text{const}$, т.е. экспонируется все изображение целиком и время экспозиции всех его участков одинаково, в этом случае характеристическая кривая отражает зависимость:

$$D_{\text{п}} = f(\lg E), \quad (28)$$

т.е. связывает оптическую плотность почернения в фотографическом изображении с освещенностью в оптическом изображении, спроецированном на поверхность фотослоя. Это свойство фотографического слоя и используется при исследовании структуры пятна рассеяния методом фотографической фотометрии.

Рассмотрение процессов формирования оптико-измерительных изображений приводит нас к необходимости использования понятия развитой характеристики или функции преобразования (ФП) метода контроля оптической системы (элемента).

При этом под характеристикой преобразования понимается функция одной или нескольких переменных, связывающая параметры структуры волнового фронта, построенного системой или деталью в схеме контроля, со структурой формируемого оптико-измерительного изображения.

Таким образом, характеристическая кривая фотоматериала служит ФП при использовании фотоматериала для измерения структуры изображения и исследовании характеристик качества изображения, сформированного оптической системой.

Это свойство фотографического слоя используется при исследовании структуры оптического изображения, например, пятна рассеяния, методом фотографической фотометрии [9].

5.4. Методика фотографической фотометрии пятна рассеяния

Чтобы использовать фотографический материал в качестве средства для измерения фотометрической структуры оптического изображения, необходимо установить и поддерживать соответствие между освещенностями в оптическом изображении и оптическими плотностями в фотографическом изображении, выражаемое характеристической кривой. Перечислим условия соблюдения этого соответствия:

1. на фотоматериале наряду с исследуемым оптическим изображением объекта должен быть зарегистрирован фотометрический клин;
2. время экспозиции изображения объекта и клина должно быть равно;
3. необходимо учитывать непостоянство свойств фотоматериала внутри партии, поэтому изображения объекта и клина желательно иметь на одном куске фотоматериала;
4. режимы проявления обоих изображений должны быть строго одинаковы;
5. должна быть нормирована и методика измерения оптической плотности, так как в зависимости от направленности светового пучка при измерении подученные значения плотности могут различаться.

Рассмотрим случай фотографической фотометрии идеального дифракционного кружка. Нам известно, что освещенность в максимумах дифракционных колец распределяется в соотношении: 1; 0,0175; 0,042; 0,0016. В логарифмической шкале соотношение этих величин $\lg E_{\max} = 0; -1,8; -2,4; -2,6; \dots$

Соотнесем распределение освещенности в дифракционном пятне с характеристической кривой нормального фотоматериала, рассматривая регистрацию на прямолинейном участке.

Спроецируем линейный участок на ось $\lg E$ графика распределения освещенности. Как видно из рис. 29, а–в, диапазон пропорционального воспроизведения не позволяет произвести регистрацию распределения освещенности в идеальном дифракционном кружке. В этот диапазон $\Delta \lg E$, называемый **фотографической шириной фотоматериала**, укладывается лишь часть центрального максимума без дифракционных колец. Либо, наоборот, могут быть зарегистрированы дифракционные кольца, при этом пик центрального максимума оказывается на участке нечувствительности (рис. 29, г). Таким образом, требуется не менее двух снимков для

того, чтобы воспроизвести распределение освещенности идеальной дифракционной точки на фотоматериале.

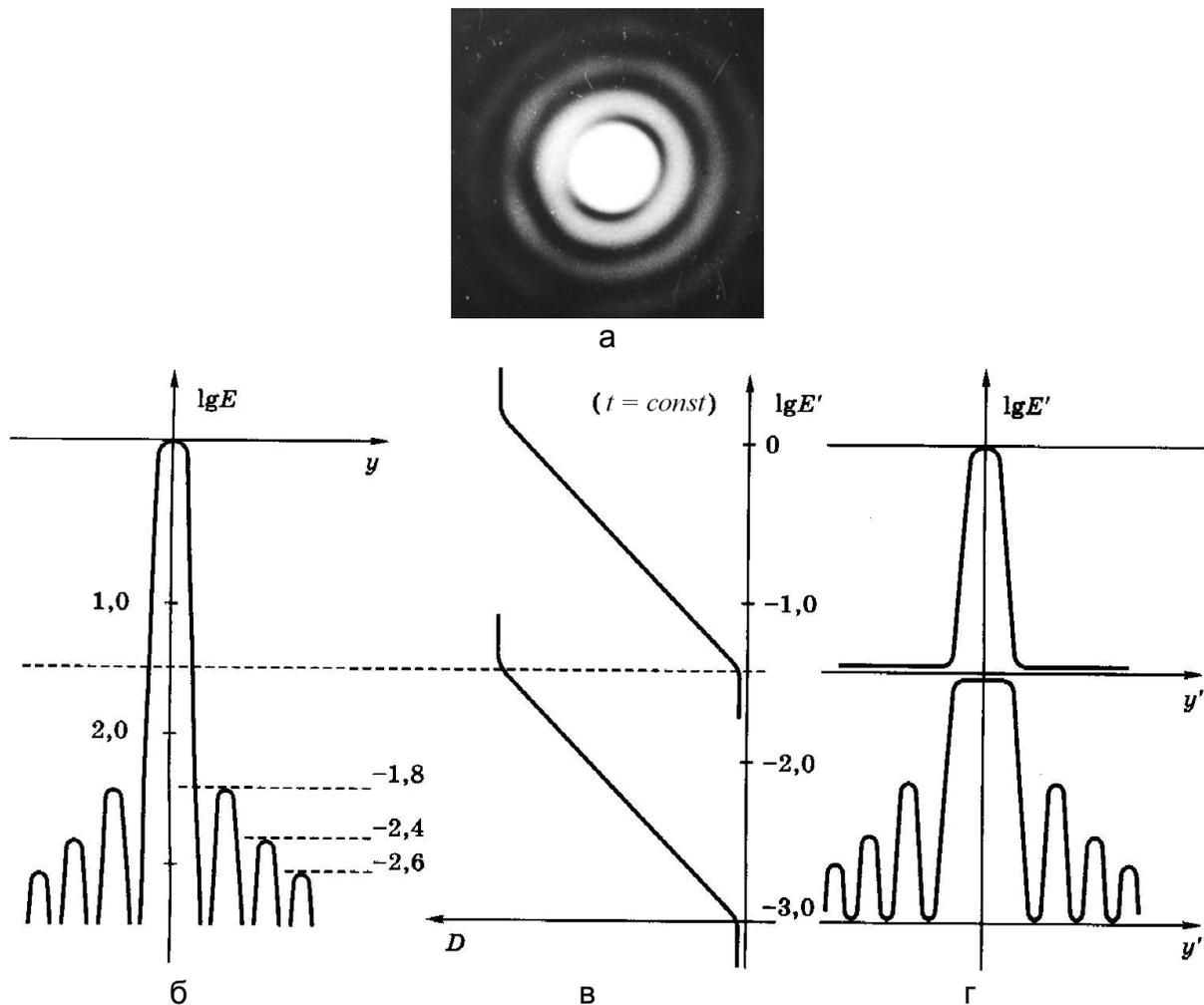


Рис. 29. Дифракционный кружок, близкий к идеальному (а) и схема фотографической фотометрии дифракционного кружка: распределение освещенности в дифракционном пятне (б); с характеристической кривой нормального фотоматериала (в); в области передержек (г)

Для восстановления по фотографическим изображениям функции распределения освещенности в оптическом изображении прежде всего измеряют распределение оптической плотности в фотоизображении, используя для этой цели микрофотометр. Сигнал с микрофотометра поступает на самописец и записывается на движущейся ленте в виде графика $D_{\Pi}(y')$. Далее, исходя из характеристической кривой, по значениям плотностей определяют уровни освещенности, после чего график $D_{\Pi}(y')$ преобразуют в искомую ФРТ.

Для сокращения этих преобразований и выполнения их в один этап полезно характеристическую кривую фотоматериала в ее рабочем варианте строить сразу в осях $D_{\Pi} = f(E)$ (рис. 30, а). После

преобразования результатов микрофотометрирования через эту характеристику получаем сразу график ФРТ. Разумеется, он будет верен только в пределах линейного участка и, частично, начального и конечного участков исходной характеристической кривой $D_{\Pi} = f(\lg E)$ (рис. 30, б).

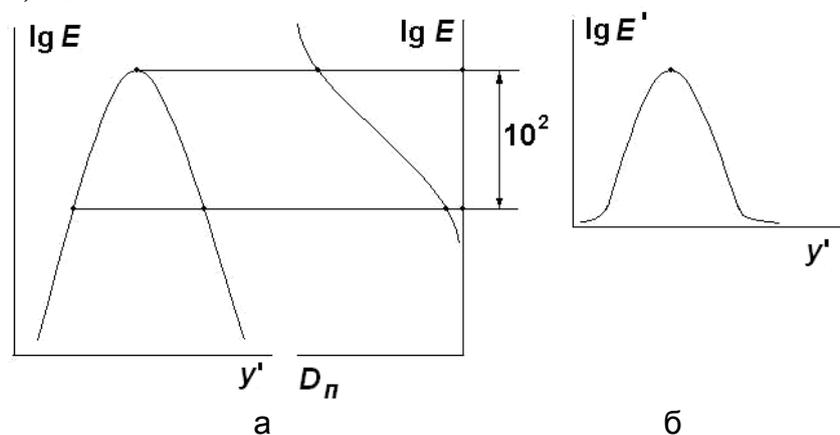


Рис. 30. Схема метода фотографической фотометрии пятна рассеяния для определения ФРТ: ограничение регистрируемого диапазона интенсивностей пятна рассеяния протяженностью рабочего участка световой характеристики приемника изображения (а); результат регистрации ФРТ в условиях ограниченного динамического приемника изображения (б)

Измеряя изображение светящейся точки по нескольким направлениям, если оно имеет асимметричную форму, находим двумерную функцию $D(x'; y')$.

Полученная функция будет верно отображать искомое распределение освещенности в исследуемом оптическом изображении только в пределах диапазона освещенностей, соответствующего протяженности проекции на ось прямолинейного участка характеристической кривой. Эта величина для реальных фотоматериалов соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую 10^2 .

В то же время, как показывают исследования, для корректного определения на основании измеренной ФРТ других характеристик качества изображения (ФКЭ, ЧКХ) требуется измерение ФРТ в диапазоне не менее чем 10^3-10^5 .

Попытки расширения указанного диапазона фотографическими средствами путем снижения величины g , давая незначительный выигрыш в расширении диапазона регистрируемых освещенностей, ведут к нарушению линейности световой характеристики и усилению вредного влияния фотографических шумов на результаты измерений.

Итак, ФП метода фотографической фотометрии может быть названо выражение линейной зависимости, описывающее

прямолинейный участок характеристической кривой. Подобная ФП характеризует и методы фотоэлектрического сканирования.

Далее ФРТ используется для оценки качества изображения либо для определения одного из известных критериев оценки качества.

Например, для определения ЧКХ проводим одну из осей в наихудшем сечении пятна рассеяния (т.е. в том направлении, в котором пятно имеет наибольший размер на данном уровне относительной освещенности). Обозначим эту ось y' . Проведем ось y' перпендикулярно оси x' . В этих осях определяется функция $D(x'; y')$. Далее выполняют интегрирование ФРТ по направлению y' :

$$E(x') = \int_{-\infty}^{\infty} D(x'; y') dy'. \quad (29)$$

Результатом такого интегрирования будет ФРЛ исследуемой системы. ЧКХ для данного направления:

$$T(\mu) = \left| \int E(y') e^{-2\pi i \mu y'} dy' \right|. \quad (30)$$

5.5. Фотоэлектрический метод измерения распределения освещенности в пятне рассеяния

Метод осуществляется с помощью сканирующих диафрагм [5, 11, 12]. Увеличенное оптическое изображение пятна рассеяния сканируется диафрагмой, диаметр которой в 40–50 раз меньше исследуемого поля. Обычно сканирование производится по ряду параллельных прямолинейных строк. Выводя на осциллограф сигнал строки, наблюдают график изменения напряжения видеосигнала по этому сечению, которое в определенных пределах, зависящих от формы световой характеристики фотоприемника, пропорционален освещенности в каждой точке строки сканирования.

Однако за пределами этого линейного участка напряжение сигнала при сканировании непропорционально уровню освещенности, причем отклонение от пропорциональности изменяется по нелинейному закону. В связи с этим фотометрическая структура пятна искажается, и измерения носят лишь ориентировочный характер. Линейный участок световой характеристики для существующих фотоприемников в режиме непрерывного сканирования не позволяет оценивать перепады освещенности более чем в 100 раз.

Тем не менее, этот метод позволяет восстановить приближенную фотометрическую структуру пятна рассеяния в виде совокупности фотометрических сечений.

Микрофотометр по этому методу был разработан Г.В. Креопаловой и Д.Т. Пуряевым для наблюдения структуры пятна рассеяния системы, работающей в ИК-области спектра. Прибор состоит из оптической скамьи, сканирующего устройства и регистрирующей электронной схемы (рис. 31).

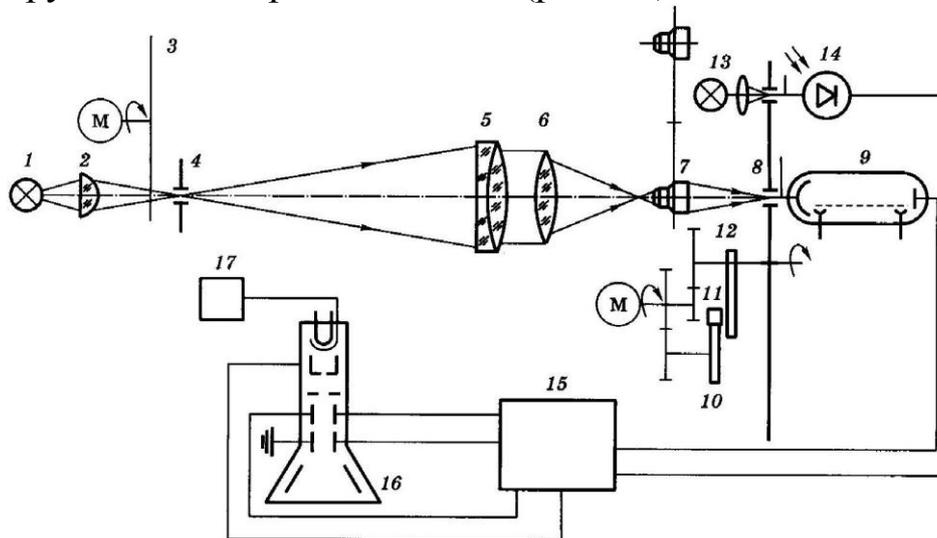


Рис. 31. Микрофотометр ФРТ

Лампа 1 через конденсор 2 освещает диафрагму 4 в фокальной плоскости коллиматорного объектива 5. Перед диафрагмой размещен модулятор 3 в виде вращающегося диска с отверстиями. Исследуемый объектив 6, установленный за коллиматором, изображает диафрагму 4 в виде пятна рассеяния, которое увеличивается вспомогательным микрообъективом 7. Сканирующее устройство выполнено в виде диска 10 с диафрагмой 8 диаметром 0,02 мм, за которым помещен фотоэлектронный умножитель 9; за один оборот диска его ось смещается по вертикали на величину диаметра сканирующей диафрагмы. Второе отверстие диска 10 с находящимся за ним фотоприемником 11 служит для синхронизации механической и электронной разверток. Регистрирующая электронная система 12 с блоком питания 13 выводит график ФРТ на осциллограф 14.

Другие известные схемы фотоэлектрического сканирования пятна рассеяния в принципе подобны описанной и отличаются чаще всего лишь аппаратным оформлением. Причины основных затруднений в реализации таких измерений:

- малые размеры пятна рассеяния;
- недостаток света в схеме контроля;
- вибрации в схеме, вызывающие перемещение исследуемого пятна рассеяния во время измерений.

Указанные затруднения взаимосвязаны. Малый размер сканирующей диафрагмы не позволяет создать на фотокатоде приемника освещенности, достаточные для применения высоких скоростей сканирования. С другой стороны вибрации, неизбежные в условиях производства, вызывают перемещение пятна рассеяния по полю анализа, что может привести к весьма большим погрешностям измерений, если весь цикл сканирования занимает отрезок времени, за который пятно рассеяния смещается на расстояние, превышающее 5–10% его диаметра.

В связи с этим установки указанного типа должны быть отнесены к лабораторным устройствам, и их применение для контроля серийной продукции в цеховых условиях связано с серьезными затруднениями.

Другое ограничение, затрудняющее количественные оценки концентрации энергии в пятне рассеяния по данным фотоэлектрического сканирования, связано с ограниченным диапазоном регистрируемых освещенностей, который не превышает двух порядков. Например, практика исследования ФРТ реальных астрономических приборов показывает, что для достоверной оценки концентрации энергии в пятне рассеяния необходимо измерить ФРТ в диапазоне не менее четырех порядков.

5.6. Метод изофотометрической фоторегистрации (метод изофот)

Для устранения недостатков традиционных методов определения ФРТ разработаны изофотометрические методы экспериментального анализа пятна рассеяния. Эти методы позволяют регистрировать перепады освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков, строить графики ФРТ в любом сечении, топограмму распределения освещенности, а также вычислять концентрацию энергии в пятне.

Изофотометрическая регистрация ФРТ нашла применение при контроле астрономических зеркал, оптических материалов и различных оптических систем по концентрации энергии в пятне рассеяния.

Рассмотрим принципиальное отличие в механизме оценки структурных характеристик по методу изофот по сравнению с методом эквиденсит [13]. Изобразим в логарифмическом масштабе распределение относительной освещенности, полученное многократно при различных световых потоках от объекта (рис. 32). Наложим на изображенную совокупность распределений шкалу с равномерно и достаточно часто расположенными фотометрическими сечениями, проходящими через все отдельные распределения. Из

построения видно, что независимо от общего уровня освещенности в исследуемом распределении само распределение может быть отображено одинаково детально совокупностью расположенных по логарифмическому закону фотометрических сечений.

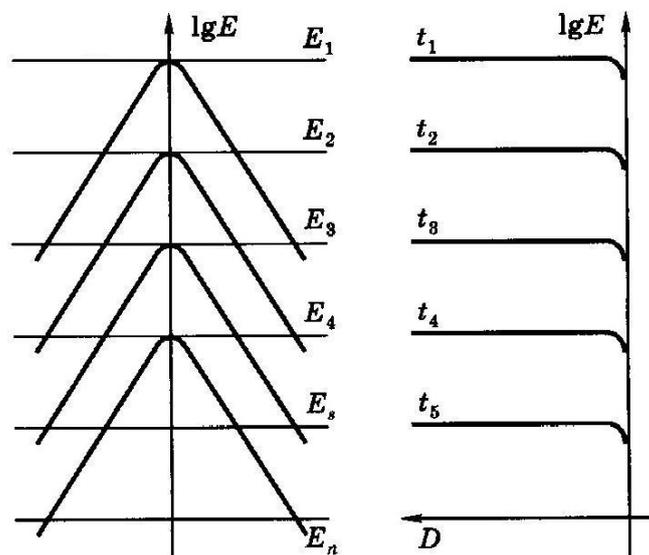


Рис. 32. Обобщенный принцип метода изофотометрии

Построим характеристическую кривую высококонтрастного материала в виде функции $D_{\Pi} = f(\lg E)$ при $H = Et = const$, где t – время. В этих координатных осях каждому времени экспозиции соответствует своя характеристическая кривая, смещенная вдоль оси E .

Равномерная шкала логарифмов времени экспозиции позволяет последовательно «наводиться» характеристической кривой высококонтрастного фотоматериала на равномерный ряд фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону. Таким образом, исследуемое распределение освещенности отображается в виде совокупности равномерно расположенных сечений независимо от общего (среднего) уровня освещенности, с одинаковой степенью подробности передачи фотометрической структуры. Для построенного семейства характеристических кривых $D_{\Pi} = f(\lg E)$ при $t = const$, каждой отдельной кривой соответствует соотношение из следующей серии:

$$E_1 = \frac{H}{t_1}; E_2 = \frac{H}{t_2}; \dots; E_n = \frac{H}{t_n}. \quad (31)$$

Нормируя полученный ряд освещенностей к значению максимальной освещенности в данном распределении, получим выражение в относительных (безразмерных) единицах:

$$E_{\text{отн}} = \frac{H}{t_{\text{отн}}} \quad (32)$$

или, в логарифмической форме $-\lg E_{\text{отн}} = \lg t_{\text{отн}}$, при этом время удобно задавать в целых числах, а относительную освещенность – в долях от максимального значения, принятого за единицу.

Последние две формулы являются основными выражениями структурометрического метода изофотометрической фоторегистрации.

На практике, при контроле качества изображения оптической системы, изображение светящейся точки, построенное исследуемой системой, многократно фотографируют на однотипный фотоматериал высокой контрастности при различных длительностях экспозиции. Изофоты различных уровней, расположенные на отдельных снимках, после оконтуривания совмещают в топограмму распределения освещенности (изофотограмму).

Для учета фотографического эффекта невзаимозаменяемости, который описывается формулой

$$(Et^p)_{D_{II}=const} = const, \quad (33)$$

где p – показатель невзаимозаменяемости.

Параллельно с изофотометрическим анализом исследуемого распределения освещенности производят экспонирование того же фотоматериала изображением дифракционного кружка с идеальным дифракционным распределением. Такое распределение хорошо воспроизводится при перекрывании лазерного луча точечной диафрагмой. Диаметр первого темного кольца в таком изображении составляет

$$d = \frac{2,44\lambda l}{d_r}, \quad (34)$$

где d_r – диаметр точечной диафрагмы; l – расстояние от диафрагмы до экрана.

После промера изофотограммы дифракционного кружка строят градуировочный график $\lg E_T = f(\lg E_s)$, где E_s – уровни освещенности дифракционного пятна, а E_T – соответствующие им относительные освещенности, вычисленные по основному выражению изофотометрии.

Таким образом получают графическое выражение исследуемой ФРТ, градуированное в точных значениях $E_{\text{отн}}$, не искаженных влиянием невзаимозаменяемости и других факторов. ФРТ, полученная в численных значениях, служит для расчета

концентраций энергии в изображении точки, ЧКХ-системы, числа Штреля и других требуемых критериев качества изображения.

5.7. Телевизионная изофотометрия

Средства телевизионной техники создают ряд существенных преимуществ при разработке оптико-измерительных информационных систем для оптического производства:

- возможность управления контрастом, яркостью и структурой изображения;
- возможность устранения влияния вибраций на качество изображения;
- комфортные условия наблюдения и оценки изображений;
- возможность сплошного выборочного сканирования с визуализацией графика фотометрической структуры;
- возможность автоматического считывания координат элементов изображений, полученных при оптических измерениях, и вывода их для обработки на ПК;
- возможность дистанционного наблюдения изображений и управления аппаратурой контроля, находящейся в замкнутом объеме, лишенном воздушных потоков (например, в вакууме);
- возможность контроля и регистрации параметров исследуемой системы в ходе технологических операций (юстировки, регулировки) и непрерывного проведения этих операций до достижения оптимальных характеристик оптической системы.

Современные видеосистемы имеют приемлемые габариты и оснащены автоматическими схемами поддержания необходимых рабочих режимов приема и передачи изображения.

Телевизионная система позволяет изменением коэффициента усиления видеоусилителя изменять контраст изображения на экране. Для получения максимального контраста применяется программный пороговый усилитель. Его использование позволяет выполнять трансформацию видеоизображения исследуемой ФРТ в импульсы, формирующие на экране контуры изображения.

Прямая телевизионная изофотометрия пятна рассеяния позволяет еще более оперативно получать данные о форме ФРТ в процессе измерения, существенно снижая трудоемкость контроля. Работа в режиме накопления позволяет регистрировать изображение при малых световых потоках в схеме контроля. Устранение влияния нелинейности передающей трубки в режиме дискретизации способствует повышению точности и надежности измерений.

К создаваемому методу телевизионной изофотометрии предъявляются следующие требования:

1. возможность получения в практически приемлемые сроки аттестационных характеристик кружка рассеяния (в соответствии с предусмотренным критерием оценки качества изображения): распределения энергии в различных диаметрах кружка, размеров кружка на сопоставимом уровне относительной освещенности и т.д.;
2. наглядность результатов и возможность качественной оценки формы кружка рассеяния и его фотометрической структуры.

5.7.1. Телевизионная изофотометрия с накоплением

Суть метода состоит в следующем. Оптическое изображение точки, построенное исследуемой системой и увеличенное микроскопом, переносится в плоскость фотокатода передающей телевизионной трубки. В телевизионном канале формируется видеосигнал, соответствующий изображению фотометрического сечения. Видеосигнал преобразуется – контраст изображения увеличивается до максимального значения, т.е. подвергается дискриминации и дифференцированию, и, таким образом, выделяется линия контура фотометрического сечения – **изофота**. Для получения системы фотометрических сечений изображения светящейся точки необходимо образовать ряд сечений, расположенных на уровнях относительной освещенности, связанных определенным математическим соотношением. На практике наиболее удобно оказалось расположение уровней освещенности по закону:

$$E_{\text{отн}} = 2^{-i}, \quad (35)$$

где i – порядковый номер изофоты.

Получение требуемой системы сечений производится введением в телевизионную систему блока запирающего электронного луча, включенного в цепь катода передающей трубки. С управляющим входом блока запирающего соединен выход таймерного устройства. Выход телевизионной системы работает в режиме выделения контура изображения. Совокупность контуров сечений регистрируется устройством памяти, на котором могут быть последовательно записаны все выделенные изофоты и получена топограмма распределения освещенности в исследуемом пятне рассеяния.

Современные видиконы обладают хорошими накопительными характеристиками, т.е. у них хорошо выдерживается соотношение взаимозаменяемости:

$$E_t = \text{const}. \quad (36)$$

Можно получить фотометрические сечения, соответствующие диапазону перепада освещенности в ФРТ на уровне 10^5 . На выходе телевизионной системы подключаются вычислительные устройства для расчета концентрации энергии или Фурье-преобразования ФРТ.

Принцип и аппаратура телевизионной изофотометрии нашли успешное применение при контроле и аттестации второго главного зеркала шестиметрового большого телескопа альт-азимутального; объективов современных исследовательских микроскопов, а также оптики для предельно совершенных технологий микро- и нанолитографии, обеспечивающих осуществление инноваций в создании аппаратуры микроэлектроники.

Рассмотрим принципиальную схему установки для телевизионной изофотометрии с накоплением (рис. 33). Она содержит точечный источник света *1*, полученный фокусированием расширенного лазерного пучка. Изображение *3* светящейся точки строится исследуемой оптической системой *2*. Это изображение переносится с увеличением при помощи микроскопа *4, 5* и объектива телевизионной камеры *6* на мишень передающей трубки *7*. В катодную цепь трубки (например, видикона) включен блок запираания электронного луча *8*. Его управляющий вход соединен с выходом реле времени *9*. К выходу телевизионной системы подключается блок выделения контура *10*, выход которого подается на опцию запоминания *11* изофоты, соответствующей уровню относительной освещенности пятна рассеяния для данного времени экспозиции.

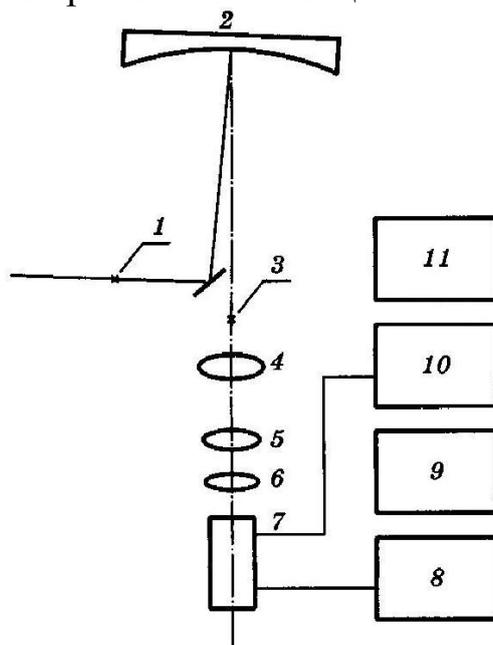


Рис. 33. Принципиальная схема установки для телевизионной изофотометрии с накоплением

Установка работает следующим образом. В исходном состоянии программа сканирует матрицу и попиксельно снимает с нее сигнал, соответствующий структуре пятна рассеяния для данной величины экспозиции; формируется изображение фотометрического сечения.

Соответствующая изофота формируется опцией выделения контура и регистрируется устройством памяти.

Соответствующая программа обеспечивает выполнение регистрации серии кадров; регистрации с нарастанием экспозиции от кадра к кадру, с формированием и запоминанием необходимой серии изофот. Суммарное изображение, содержащее все зафиксированные изофоты – карта распределения интенсивности, отображающая структуру ФРТ для данного пятна рассеяния.

5.8. Телевизионный изофотометр с модулированным световым потоком

Описанный телевизионный изофотометр с накоплением создает существенные преимущества по сравнению с фотографической изофотометрией, особенно в схемах контроля, имеющих дефицит световой энергии.

Ограничением данного устройства является то, что из-за необходимости получения серии кадров накопления с удлиняющимся рядом времен экспозиции накопления, один цикл измерения может длиться десятки минут. Это не позволяет следить за изменениями качества изображения в течение времени измерения, а эти изменения недопустимы, так как, измерительная система чувствительна к вибрациям и осредняет влияние воздушных потоков и других искажающих факторов.

Рассмотрим пример реализации данного изофотометра – с изменяющимся световым потоком в схеме контроля – на примере телевизионного изофотометра, построенного на базе аналоговых блоков, что дает возможность вести наблюдения и измерения ФРТ в реальном времени.

Итак, работа над телевизионным изофотометром была продолжена. Ее целью стало повышение экспрессности измерений за счет формирования всех фотометрических сечений в новом изофотометре при одинаковых временах экспозиции. Результаты измерений выводятся на кинескоп практически одновременно с процессом анализа изображения точки.

Эта цель была достигнута за счет того, что в схему были введены новые элементы. Позади осветителя установлен фотометрический клин,

который может перемещаться в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Клин связан с электрическим преобразователем перемещения, выход которого подключен к вертикальной развертке двухкоординатного регистрирующего устройства, например, к осциллографу с памятью.

К горизонтальной развертке регистратора подключен выход телевизионной установки через осциллограф с блоком выделения строки и блоки, формирующие контур изображения.

На рис. 34 изображена принципиальная схема устройства. Оно содержит осветительную систему, в которую входят лазер 1, расширительная линза 2 и объектив, формирующий точечный источник света. В осветительную систему введен перемещающийся (вращающийся) фотометрический клин 4, плавно меняющий световой поток. Клин оснащен приводом 6 и датчиком угла поворота 5. Сформированный точечный источник света посылает расходящийся пучок в зрачок исследуемой системы 7, которая строит пятно рассеяния O' . Это изображение переносится с увеличением при помощи микроскопа 8, 9 и объектива телевизионной камеры 10 на мишень передающей трубки 11. Телевизионная трубка через блоки 12 и 13, формирующие контур фотометрического сечения, связана с регистрирующим устройством 14, блоком измерения площади изображения 15 и видеоконтрольным устройством 16. Выход датчика угла поворота клина соединен с входом вертикальной развертки регистратора.

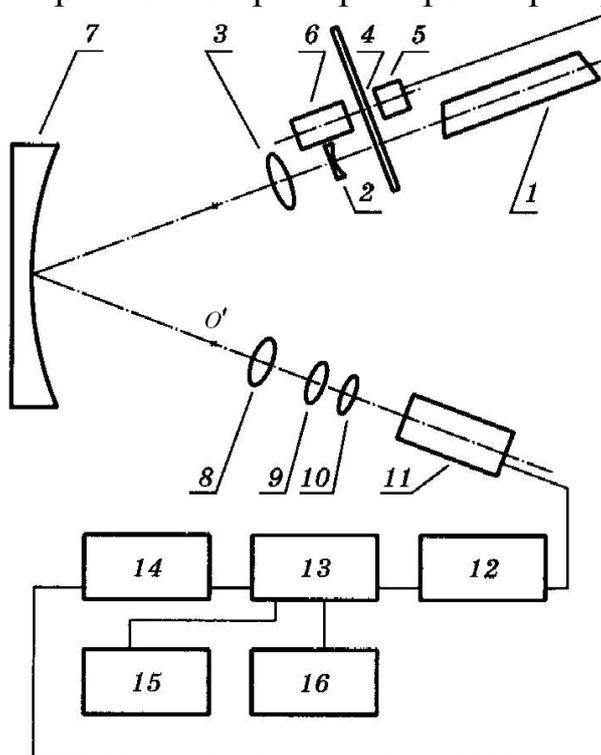


Рис. 34. Принципиальная схема телевизионного изофотометра с изменяющимся световым потоком

В исходном состоянии фотометрический клин введен полностью, и чувствительность телевизионной системы установлена таким образом, что исходный световой поток в схеме контроля формирует изображение линии разного уровня освещенности (изофоты) в изображении точечного источника, соответствующей максимуму освещенности E_1 , которое принимается равным единице. При перемещении фотометрического клина на расстояние, соответствующее повышению светового потока вдвое, кривая распределения освещенности сместится в новое положение, а крутая световая характеристика телевизионной системы с дискриминатором [13] выделит из распределения освещенности изофоту, соответствующую уровню освещенности, вдвое меньшему, чем первоначальный, и на экране видеоконтрольного устройства будет сформировано изображение изофоты для уровня освещенности $E_2 = 0,5$. Следующее удвоение светового потока вызывает формирование изофоты, соответствующей уровню относительной освещенности $E_3 = 0,25$ и т.д. Промежуточные положения клина дают изофоты промежуточных уровней освещенности.

Видеосигналы всех изофот последовательно подаются на электронно-лучевую трубку с памятью, например, на экран осциллографа типа СВ-7А, дополненного блоком кадровой развертки. Таким образом, в результате запоминания ряда фотометрических сечений и воспроизведения на экране их исходного взаимного расположения формируется изофотограмма, т.е. топограмма распределения освещенности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой. Далее с помощью построения осциллографа выделяется строка, проходящая через максимум освещенности изображения. Затем фотометрическому клину сообщается непрерывное возвратное перемещение (например, круглый клин вращают), что вызывает изменение светового потока в системе по пилообразному закону. При этом, благодаря датчику перемещения (угла поворота), изменяется высота расположения строки на экране осциллографа пропорционально смещению клина, т.е. пропорционально увеличению его оптической плотности.

Одновременно в соответствии с плотностью клина изменяются уровень и величина выделяемого фотометрического сечения и изменяется расстояние между парой импульсов на строке, соответствующих концам диаметра фотометрического сечения. Таким образом, благодаря изменению расстояния между импульсами при одновременном изменении высоты расположения строки на экране

осциллографа, формируется график, отображающий форму ФРТ в данном сечении.

Изофотометр позволяет в процессе фокусировки и юстировки системы следить за изменением качества изображения по форме графика ФРТ и точно определять оптимальное положение, соответствующее наилучшему качеству изображения.

5.9. Контроль оптических систем по ФРЛ

Наряду с ФРТ, первичным критерием качества изображения оптической системы является распределение освещенности в изображении светящейся линии или ФРЛ. Как было показано, на основе этой функции могут быть определены другие известные характеристики качества оптического изображения, такие, как пограничная кривая, ЧКХ, фотографическая разрешающая способность и др.

ФРЛ, получаемая путем анализа изображения освещенной щелевой диафрагмы через исследуемую оптическую систему, обладает своими преимуществами как критерий оценки качества изображения оптической системы. В схемах определения ФРЛ по сравнению со схемами измерения ФРТ получается существенный выигрыш в энергии, проходящей через систему, что облегчает выбор приемника и анализ изображения. При исследовании оптических систем спектральной аппаратуры метод определения ФРЛ позволяет получать непосредственно аппаратную функцию прибора.

Другим преимуществом контроля по ФРЛ является отсутствие жестких требований к положению строки сканирования освещенности поперек изображения линии.

Для измерения ФРЛ обычно применяются методы построчного фотоэлектрического сканирования. К сканирующей системе предъявляются следующие жесткие требования:

1. сохранение точности в широком диапазоне чувствительности (10^6), что заставляет применять сложные и дорогостоящие источники питания для фотоумножителя, усилителя и регистратора, причем все эти элементы должны быстро и многократно менять свои диапазоны чувствительности при помощи переключателей;
2. ширина щели не должна превышать 0,1–0,2 диаметра дифракционного пятна, следовательно, ее ширина в обычных условиях составляет микрометры.

Следствием указанных требований к сканирующей системе являются ее ограничения: требуется весьма прецизионная механика,

требующая особо квалифицированного обслуживания. Малые размеры диафрагм не позволяют достичь достаточного уровня светового потока в системе, что вынуждает пользоваться малыми скоростями сканирования. В процессе сканирования требуется переключение электрооборудования, а так как после переключения режимы должны установиться, то приходится прерывать процесс сканирования. Кроме того, система в силу своей прецизионности чувствительна к вибрациям, которые всегда имеются в цеховых условиях оптико-механического производства. По этим причинам методы определения ФРЛ путем фотоэлектрического сканирования не получили распространения.

Интересный способ исследования ФРЛ был описан Джонсом и Вольфом. Распределение освещенности поперек изображения щели получают в виде логарифмической кривой ФРЛ, фотографируя изображение щели через серый клин. Существо метода – в следующем. Оптическое изображение щели перекрывается клином, плотность в котором изменяется вдоль клина

$$D_k = KX, \quad (37)$$

где D_k – оптическая плотность; X – протяженность вдоль клина; K – постоянная клина.

Результирующее двумерное распределение относительной освещенности характеризуется в поперечном сечении ФРЛ, а в поперечном направлении – функцией модуляции освещенности клином

$$-\lg E = KX. \quad (38)$$

Изофота такого распределения дает график ФРЛ с логарифмической шкалой освещенностей.

Фотографический изофотометрический метод определения ФРЛ нашел применение при исследованиях фотографических объективов и объективов любительской киноаппаратуры. Телевизионный метод изофотометрического анализа ФРЛ позволяет визуально оценивать качество изображения по форме графика функции, непрерывно наблюдать и измерять характеристики качества изображения при втировках, фокусировках и других перестройках систем и, кроме того, расширить диапазон измеряемых освещенностей в ФРЛ до значений, достаточных для надежных оценок качества системы. Установка для испытания объективов собрана на базе оптической скамьи. Изображение освещенной щели, построенное исследуемой системой, и увеличенное микроскопом, переносится на мишень передающей телевизионной трубки, а затем по телевизионному каналу воспроизводится на телевизионном экране с максимальным контрастом. Изофота выделяется как граница черного и

белого в изображении на телевизионном экране. Градуировка осей координат полученного графика ФРЛ производится следующим образом: для определения масштаба оси относительных освещенностей необходимо знать постоянную клина и величину поперечного увеличения от плоскости клина до экрана телевизора. Масштаб по оси абсцисс определяется, исходя из увеличения от плоскости изображения щели, построенного исследуемым объективом, до экрана телевизора.

Практика контроля серийных объективов по ФРЛ показала, что метод телевизионной изофотометрии ФРЛ позволяет надежно оценивать изменение качества изображения при появлении комы в любом из рассмотренных объективов. При исследовании комы щель в фокальной плоскости коллиматора ориентируется в направлении, перпендикулярном направлению вектора комы.

6. ОБ ИСТОРИИ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ АБЕРРАЦИЙ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ОШИБОК ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

6.1. Теневой метод Фуко

Более ста лет теневой метод Фуко [4] считался чисто качественным. Однако в последние годы появились работы, направленные на получение количественных оценок ошибок системы по данным испытаний теневым методом. К достоинствам теневого метода относятся следующие:

- простота реализации и экономичность;
- высокая чувствительность при обнаружении и оценке деформаций волнового фронта и ошибок оптических поверхностей;
- наглядность, позволяющая не только обнаружить отдельные ошибки и отметить их расположение на оптической поверхности или в зрачке, а также указать общий характер aberrаций (кома, сферическая, астигматизм и их сочетания).

Теневой метод можно охарактеризовать как метод, обладающий высокой наглядностью, но преимущественно качественный.

6.2. Метод Гартмана

Дальнейшее развитие методов испытания оптических поверхностей и систем, развитие и расширение в конце XIX – начале XX века серийного производства оптических систем, в частности – фотообъективов, привели к созданию Гартманом метода для оценки ошибок волновой поверхности по данным, полученным по ряду локальных точек на зрачке [4]. Осуществляя физическое моделирование механизмов геометрической оптики, Гартман изолировал диафрагмами отдельные узкие пучки лучей, которые формировались исследуемой системой, и с помощью экстрафокальных фотографий прослеживал ход лучей, определяя, например, точки, в которых эти пучки пересекали ось.

Таким образом, достоинства метода Гартмана состоят в возможности измерения и количественной оценки aberrаций оптической системы, что позволяет оценивать оптическую систему на соответствие расчету. Метод прост в реализации.

В противоположность теневому, метод Гартмана обеспечивает количественный характер исследования aberrаций, однако не обеспечивает наглядности, и рассмотрение гартманограммы aberrационно-корректированной оптической системы не позволяет

судить о наличии и величине aberrаций. Эти данные могут быть определены лишь по итогам расшифровки координат пятен гартманограммы и выполненной математической обработки данных.

Другое ограничение метода Гартмана состоит в следующем: следы отверстий диафрагмы на фотопластинке являются дифракционными изображениями, которые тем больше по диаметру и тем сильнее размыты, чем меньше диаметры самих диафрагм. В связи с этим существует некоторый оптимальный диаметр диафрагмы, который, согласно Гартману, лежит в пределах между $1/200$ и $1/400$ фокусного расстояния. Этот минимум не только ограничивает размеры определяемых зон зрачка, но и их число.

6.3. Интерферометрия

В 1918 году Твайман сообщил о своем методе оценки aberrаций. Суть его состояла в сравнении плоского волнового фронта с фронтом волны от исследуемой системы, форма которой приведена к плоской для случая отсутствия ошибок и aberrаций, т.е. речь шла об интерферометрическом методе, когда проблема исследования оптической системы ставится как задача о деформациях, претерпеваемых поверхностью световой волны [4].

Особое преимущество интерферограммы состоит в том, что при определенных условиях может быть получена интерференционная картина, подобная топографической карте исследуемой волновой поверхности, где изолинии уровня (горизонтали) представлены в виде полос с разностью хода, кратной длине волны.

7. ИНТЕРФЕРОМЕТР ФИЗО

7.1. Контроль плоской поверхности

Высокая чувствительность к вибрации двухлучевого интерферометра Тваймана послужила стимулом к поиску схемных решений интерферометров, в которых этот недостаток снижен. В наши дни получил распространение интерферометр Физо. В его схеме рабочее плечо, содержащее исследуемую поверхность или систему, совмещено с опорным плечом, содержащим образцовую «эталонную» деталь или поверхность, формирующую опорный волновой фронт. Такое совмещение стало возможным благодаря применению, в качестве образцовой, детали с образцовой поверхностью, работающей в проходящем свете.

На рис. 35 дана схема интерферометра Физо для контроля плоской поверхности. Здесь в качестве образцовой применяется пластина δ , фронтальная поверхность, которой выполнена с образцовой точностью (на уровне до $1/20\lambda$). В практике контроля поверхностей средней точности погрешности образцовой поверхности в интерферометре по традиционной схеме принято считать пренебрежимо малыми.

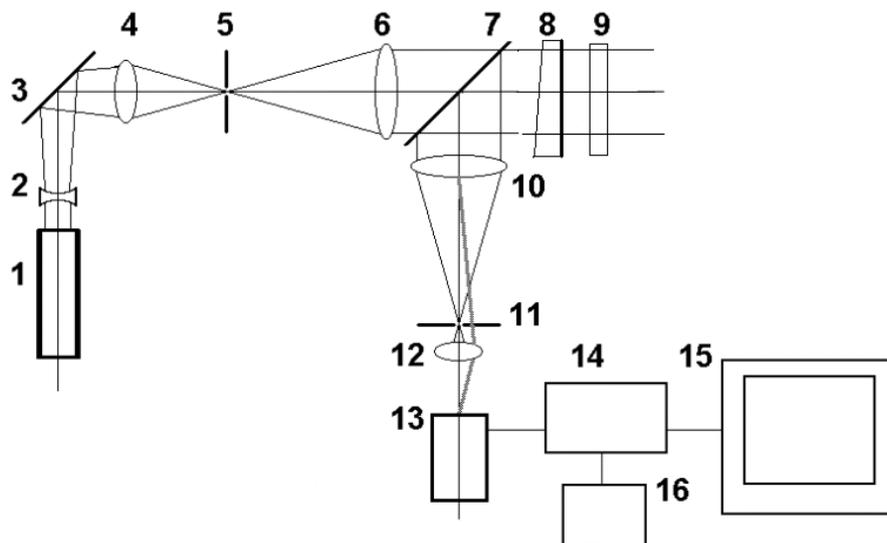


Рис. 35. Схема интерферометра Физо при контроле плоской оптической поверхности: 1 – лазер; 2 – отрицательный компонент осветительной системы; 3 – наклонное зеркало; 4 – объектив осветительной системы; 5 – точечная диафрагма; 6 – коллиматорный объектив; 7 – светоделиватель; 8 – пластина с образцовой плоской фронтальной поверхностью; 9 – исследуемая плоская поверхность; 10 – объектив наблюдательной системы; 11 – наблюдательная диафрагма; 12 – объектив регистрации интерферограммы (линза Бертрана); 13 – регистрирующая камера; 14 – электронный блок телевизионного анализатора интерферограмм; 15 – телевизионный монитор; 16 – пульт управления

С целью исключения влияния паразитной интерференционной картины, возникающей при отражении плоского фронта от обратной, нерабочей поверхности образцовой пластины, эта поверхность выполнена с небольшой клиновидностью, порядка 0,5–1 мм снижения толщины от верхнего края пластины к нижнему. При этом возникающая паразитная интерференционная картина от обратной поверхности имеет полосы высокой частоты (порядка 1000 полос на всю поверхность), которые практически не разрешаются приемником изображения и не мешают восприятию основной интерферограммы.

7.2. Контроль сферической поверхности

Интерферометр построен по схеме автоколлимационного микроскопа, в котором между исследуемой поверхностью и микрообъективом установлен мениск. Фронтальная поверхность мениска играет роль образцовой поверхности, отражая волновой фронт сравнения, интерферирующий с волновым фронтом, отраженным от исследуемой оптической поверхности (рис. 36, 37).

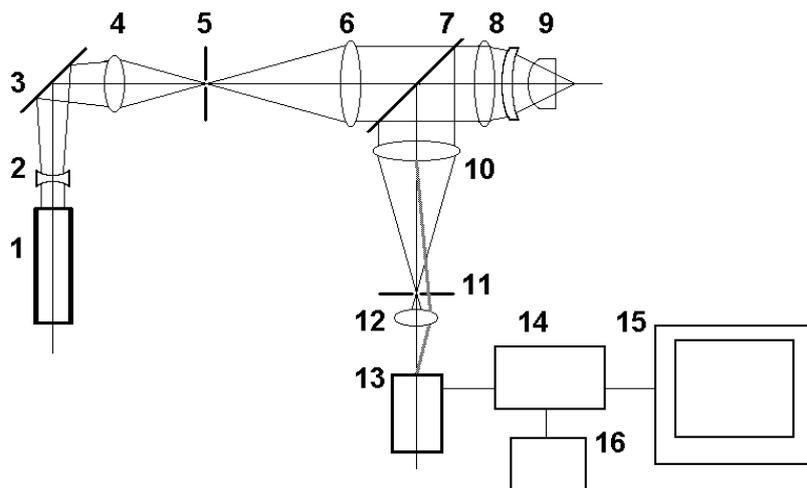


Рис. 36. Схема интерферометра Физо при контроле сферической оптической поверхности: 1 – лазер; 2 – отрицательный компонент осветительной системы; 3 – наклонное зеркало; 4 – объектив осветительной системы; 5 – точечная диафрагма; 6 – коллиматорный объектив; 7 – светоделитель; 8 – объектив интерферометра с образцовой фронтальной поверхностью; 9 – исследуемая деталь; 10 – объектив осветительной системы; 11 – наблюдательная диафрагма; 12 – объектив регистрации интерферограммы (линза Бертрана); 13 – регистрирующая камера; 14 – электронный блок ТАИ; 15 – телевизионный монитор; 16 – пульт управления ТАИ

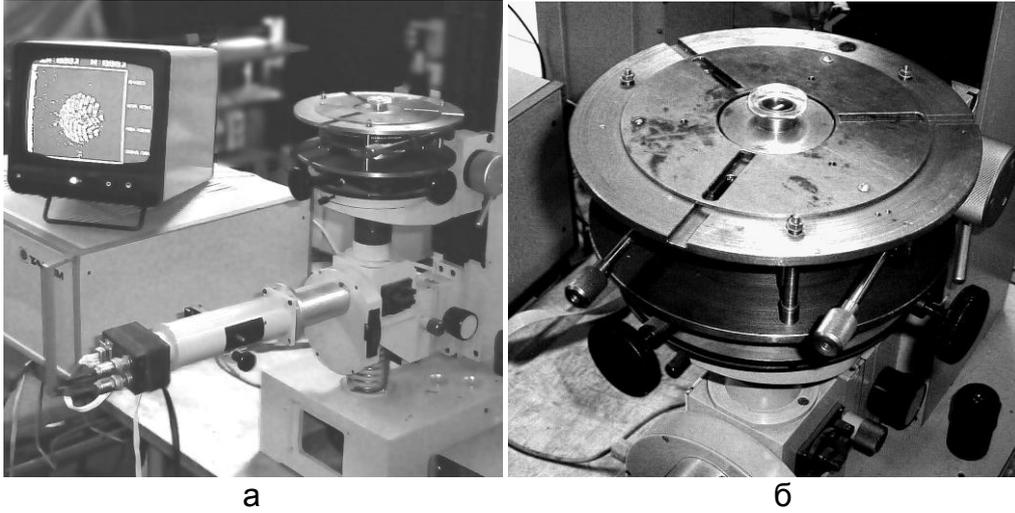


Рис. 37. Общий вид интерферометра Физо при контроле линзы (а); контроль линзы на интерферометре Физо (б)

8. ОПТИЧЕСКИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС НА БАЗЕ ЛАЗЕРНОГО ДИФРАКЦИОННОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА

8.1. Требования к точности образцовых элементов для классических и традиционных интерферометров

Разность хода δ лучей света с длиной волны λ для образцового волнового фронта и рабочего фронта, отраженного по нормали к исследуемой поверхности, составит:

$$\delta = 2h. \quad (39)$$

Если разность хода кратна четному числу $\lambda/2$, то происходит усиление света согласно выражению

$$I = 2a^2 \left[1 + \cos \left(\frac{2\pi\delta}{\lambda} \right) \right], \quad (40)$$

где I – интенсивность в интерференционном изображении; a – амплитуда напряженности электрического поля (считая, что она одинакова для интерферирующих фронтов).

Переходя к относительной интенсивности в интерференционной картине, получим [1]:

$$I'' = \cos^2 \left(\frac{\pi W}{\lambda} \right). \quad (41)$$

Разность хода в волновой мере обозначим как:

$$\omega = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (42)$$

Если одна волновая поверхность повернута относительно второй на угол θ , то пространственная частота интерференционных полос, вызванных наклоном, составит:

$$\nu = \frac{\sin \theta}{\lambda}. \quad (43)$$

При малых углах принимают

$$\sin \theta = \theta.$$

Тогда

$$\nu = \frac{\theta}{\lambda} \quad (44)$$

и распределение относительной интенсивности в интерференционной картине при введении заклона поверхности можно описать выражением [12]:

$$I'' = \cos^2 \pi(\nu y + \omega), \quad (45)$$

где y – протяженность на оптической поверхности по нормали к ребру клина.

Выражение (45) описывает формирование картины интерференции двух взаимно-заклоненных плоских или сферических волновых фронтов. Интерференционные полосы прямолинейны, параллельны и разделены равными промежутками, с косинусоидальным характером распределения интенсивности в интерференционной картине (в направлении по нормали к интерференционной полосе). Величина ω указывает фазовый сдвиг в периодической картине полос на участке, где имеется дополнительная разность хода, вызванная ошибкой исследуемой оптической поверхности, если образцовая поверхность ошибок не имеет.

Традиционные интерферометры (например, по схеме Физо или Тваймана-Грина, рис. 38 [14] и рис. 39, а) характеризуются тем, что для формирования опорного волнового фронта (рис. 39, б) в их конструкции необходимо применение образцового оптического элемента (обычно – образцовой оптической поверхности, плоской или сферической).

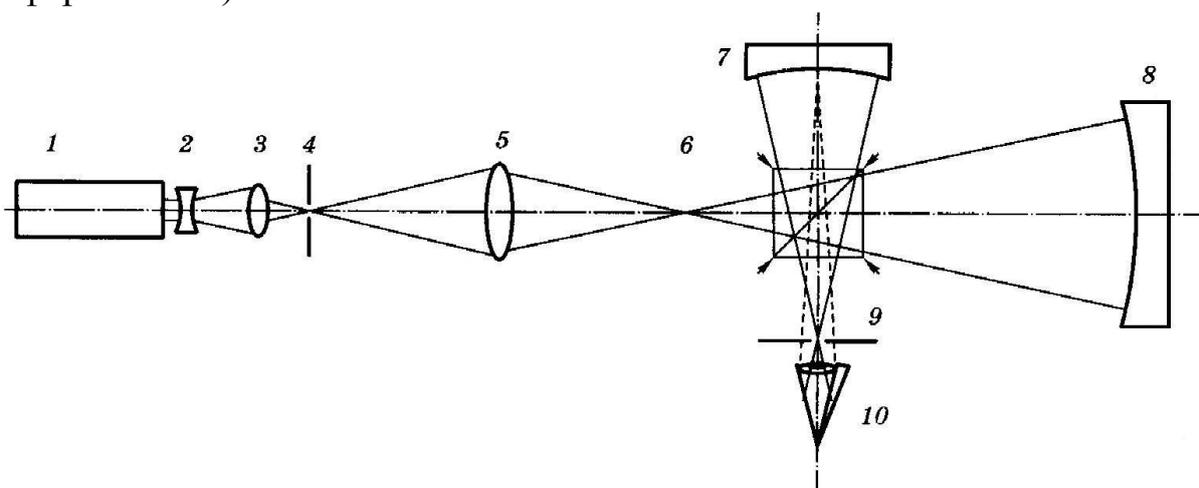


Рис. 38. Лазерный неравноплечий интерферометр со сферической образцовой поверхностью: 1 – лазер; 2, 3 – объектив осветительной системы; 4 – осветительная диафрагма; 5 – микрообъектив осветительной системы; 6 – тест-объект – светящаяся точка; 7 – образцовая сферическая поверхность; 8 – исследуемая сферическая поверхность; 9 – светоделительный кубик; 10 – приемник изображения (например, глаз)

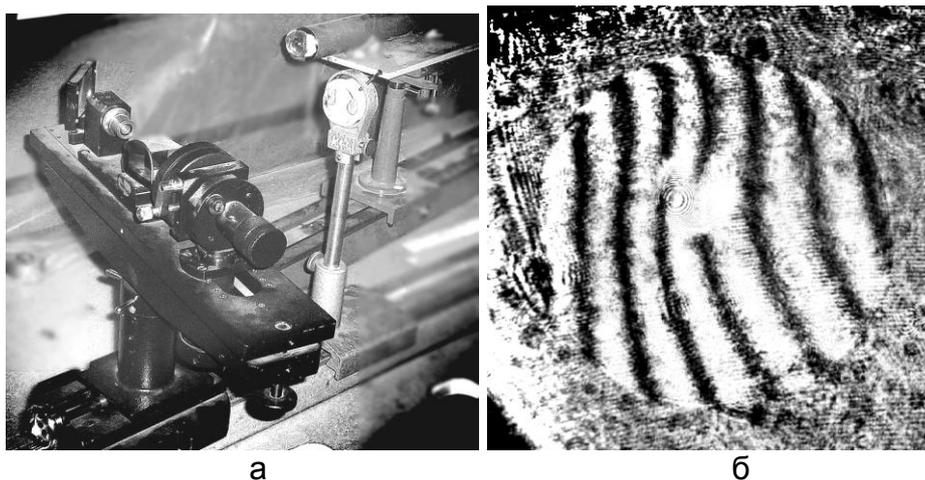


Рис. 39. Лазерный неравноплечий интерферометр (общий вид) (а); интерферограмма оптической поверхности (очковая линза) (б)

Такой элемент создает волновой фронт, который содержит остаточные ошибки (деформации) (рис. 39, б), порождаемые рядом причин.

1. Остаточные ошибки изготовления.

Применяемые традиционно методы обработки и контроля точных оптических поверхностей не позволяют гарантировать, что погрешности формы оптических поверхностей будут меньше, чем $\lambda/20$.

2. Возможность неконтролируемого изменения формы оптической поверхности образцовой детали.

Наличию таких изменений могут способствовать:

- динамические воздействия (например, пережатие в оправках);
- гравитационные воздействия (нарушение разгрузки детали);
- температурные воздействия;
- вибрационные воздействия.

Таким образом, на практике распределение интенсивности в интерференционной картине определяется выражением:

$$I'' = \cos^2 \pi(vy + \omega + \omega_R), \quad (46)$$

где ω_R – ошибка образцового волнового фронта.

Итак, точность интерференционного контроля при соблюдении прочих условий, решающим образом определяется величиной ω_R .

В практике оптических измерений обычным является следующее метрологическое требование: погрешность средства измерения должна быть в 5–10 раз меньше измеряемой ошибки изделия. Отсюда можно определить типовые требования к точности измерений аберраций и ошибок оптических систем разных классов точности (табл. 4), где ω_T – предельно допустимая ошибка образцового

волнового фронта прибора для контроля образцовой поверхности интерферометра).

Таблица 4. Требования к точности ω_T для устройства контроля интерферометрических эталонов

Тип оптической системы	Требования к точности системы	Требования к точности прибора контроля	ω_R	ω_T
Зрительная труба	$0,25\lambda$	$(0,025-0,05)\lambda$	$0,032\lambda$	$0,0032-0,0064\lambda$
Исследовательский микроскоп	$0,05\lambda$	$(0,005-0,01)\lambda$	$0,007\lambda$	$0,0007-0,0014\lambda$
Космический телескоп	$0,03\lambda$	$(0,003-0,006)\lambda$	$0,0045\lambda$	$0,00045-0,0009\lambda$

Можно считать, что значения требуемой точности, в случае интерферометрии, относятся, при соблюдении прочих условий (вакуум, устранение влияния вибраций и прочее), к допустимым остаточным погрешностям образцового волнового фронта. Эти погрешности, в свою очередь, определяются ошибками образцовой оптической поверхности.

В действительности, для постоянного обеспечения и поддержания указанной точности в практике измерений (при исследовании оптических элементов и систем наивысшей точности) оперативный самоконтроль реального состояния опорного волнового фронта в момент каждого сеанса контроля становится необходимым.

8.2. Интерферометры с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом

В ходе исследований методов контроля aberrаций и ошибок систем и деталей предельной точности, имеющих ошибки менее $0,1\lambda$, выполнен ряд разработок интерферометров с дифракционным образцовым волновым фронтом [3, 15]. Исходным пунктом для поисков в этом направлении послужила известная схема интерферометра с совмещенным ходом лучей и дифракцией на точке, предложенная Линником [16] (рис. 40).

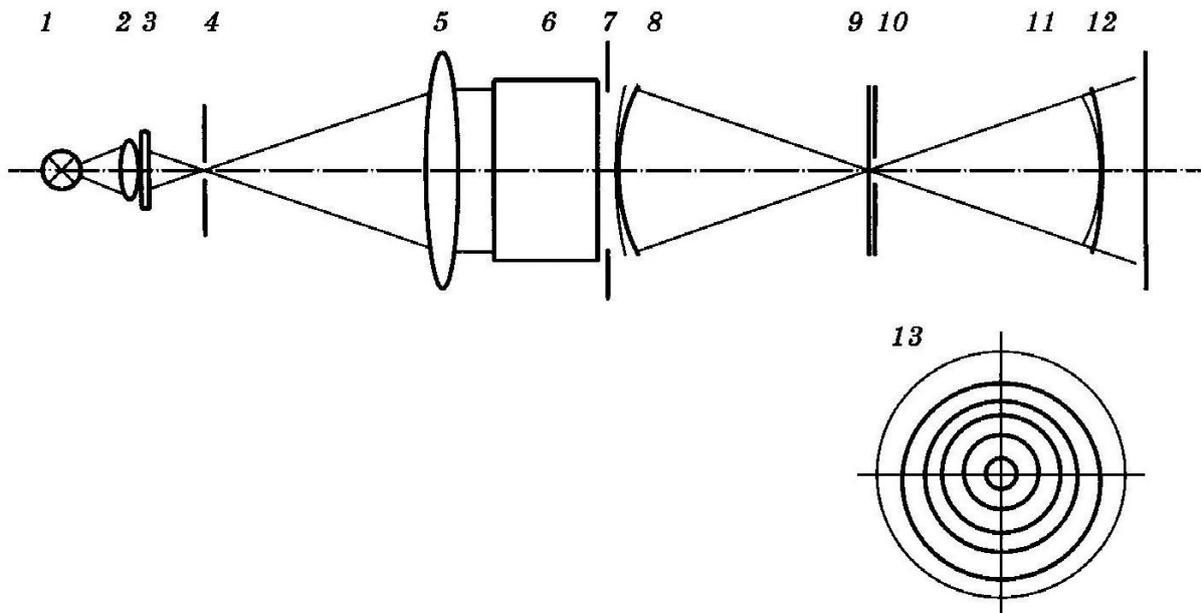


Рис. 40. Схема интерферометра Линника с совмещенным ходом лучей и дифракцией на точке: 1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – светофильтр; 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив; 6 – исследуемая оптическая система; 7 – выходной зрачок; 8 – волновой фронт, сформированный исследуемой системой; 9 – пластинка Линника; 10 – светоделительное покрытие с точечной диафрагмой; 11 – исследуемый искаженный волновой фронт; 12 – дифрагированный сферический опорный фронт; 13 – интерференционное изображение

Тест-объект «светящаяся точка» 4 фокусируется исследуемой системой или деталью 6 в плоскость полупрозрачного покрытия 10 пластины 9, содержащего точечную диафрагму. Часть света, прошедшая полупрозрачное покрытие, распространяется в направлении наблюдательной системы в виде рабочего сферического волнового фронта 12, искаженного аберрациями и ошибками объекта исследования. Часть света, испытавшая дифракцию на точечной диафрагме в покрытии, распространяется в виде неискаженного сферического опорного волнового фронта 11. Результат интерференции рабочего и опорного волновых фронтов дает оптико-измерительное интерференционное изображение 13.

Хороший контраст интерферограммы достигается, когда интенсивность рабочего и опорного пучков близки по величине, что в данной схеме зависит не только от коэффициента пропускания покрытия (для измерения которого пришлось бы выполнять операцию замены пластинки и повторной настройки схемы), но и от положения изображения точечного тест-объекта (пятна рассеяния) относительно точечной диафрагмы. Кроме того, смещение пятна относительно диафрагмы более чем на половину диаметра пятна приводит к

гашению опорного пучка лучей в интерферометре, что влечет за собой исчезновение интерференции.

Итак, достоинство рассмотренной классической схемы состоит в отсутствии образцовой оптической поверхности, а, следовательно, и ошибок ее изготовления. Другим преимуществом схемы является ее простота. Интерферометр, по существу, состоит из точечного тест-объекта и пластины с точечной диафрагмой в полупрозрачном покрытии.

Недостатки схемы Линника, на наш взгляд, следующие.

Поперечная расфокусировка интерферометра для получения прямых интерференционных полос, как рассмотрено, ограничена диаметром пятна рассеяния. Получаемые интерференционные картины имеют невысокое качество и зашумлены, что снижает точность измерений. Кроме того, настройка интерферометра Линника при исследовании каждого оптического элемента требует использования микроподвижек с чувствительностью порядка 1 мкм, что усложняет и удорожает практическую реализацию интерферометра.

Здесь дифрагирующее отверстие в полупрозрачном оптическом покрытии устанавливается в плоскости пятна рассеяния, сформированного испытуемой оптической системой в схеме контроля. Недостатки такого интерферометра с совмещенными ветвями состоят в сложной настройке, отличающейся от традиционной; невысоком качестве интерференционной картины и определенных сложностях ее интерпретации.

9. НЕРАВНОПЛЕЧИЙ ДИФРАКЦИОННЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Высокую эффективность при контроле высокоточных оптических поверхностей и систем показал лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и разнесенными ветвями [5, 15].

Разработаны разновидности схем интерферометра с дифрагированным эталонным волновым фронтом. Этот прибор имеет традиционную методику настойки и интерпретации интерференционной картины, обеспечивает высокое качество интерферограммы, гибкость при исследовании оптических систем и элементов с различными коэффициентами пропускания (отражения) от 98% (зеркальные покрытия) до 0,15% (просветляющие покрытия).

Интерферометр, в общем случае, может работать без применения в его схеме точных и эталонных поверхностей.

Благодаря высокой когерентности лазерного излучения и его способности фокусироваться в пятно малых размеров, в интерферометре в качестве образцового используется сферический волновой фронт, образованный при дифракции сходящихся пучков на отверстии диаметром порядка 1–10 мкм.

Разработанный прибор (рис. 41) может быть использован для оценки погрешностей изготовления оптических поверхностей, качества объективов различного назначения, в том числе – объективов микроскопов.

На одну из поверхностей светоделителя светового пучка, выполненного в виде плоскопараллельной пластины 4, нанесено зеркальное покрытие (вместо светоделительного покрытия, используемого в неравноплечих интерферометрах). В центре зеркального покрытия имеется точечное отверстие 5, диаметр которого соизмерим с длиной волны излучения. Между лазером и светоделителем пучка расположен объектив 2–3, задний фокус которого совмещен с точечным отверстием 5 на светоделителе пучка.

Точечное отверстие служит источником дифракционной волны, которая является опорной. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина – результат сложения идеальной сферической волны, возникающей при дифракции на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности.

Кроме того, за счет такого выполнения светоделителя в интерференционной картине устраняются паразитные изображения, возникающие в обычных светоделительных элементах.

Это обстоятельство позволяет во многих случаях повысить точность и надежность интерференционного контроля. Благодаря тому, что дифракционная волна образуется на точечном отверстии, отпадает необходимость изготовления сферической эталонной поверхности, требования к которой в традиционных интерферометрах ограничивают достижимую точность измерения.

При этом интерферометр с дифракционной волной позволяет контролировать оптические элементы и поверхности, отличающиеся коэффициентом пропускания или отражения в большом диапазоне, от 1 до 90%, без замены элементов интерферометра. Решение подобной задачи в неравноплечем интерферометре требует замены неалюминированной эталонной сферической поверхности на алюминированную, что влечет за собой необходимость повторной настройки прибора.

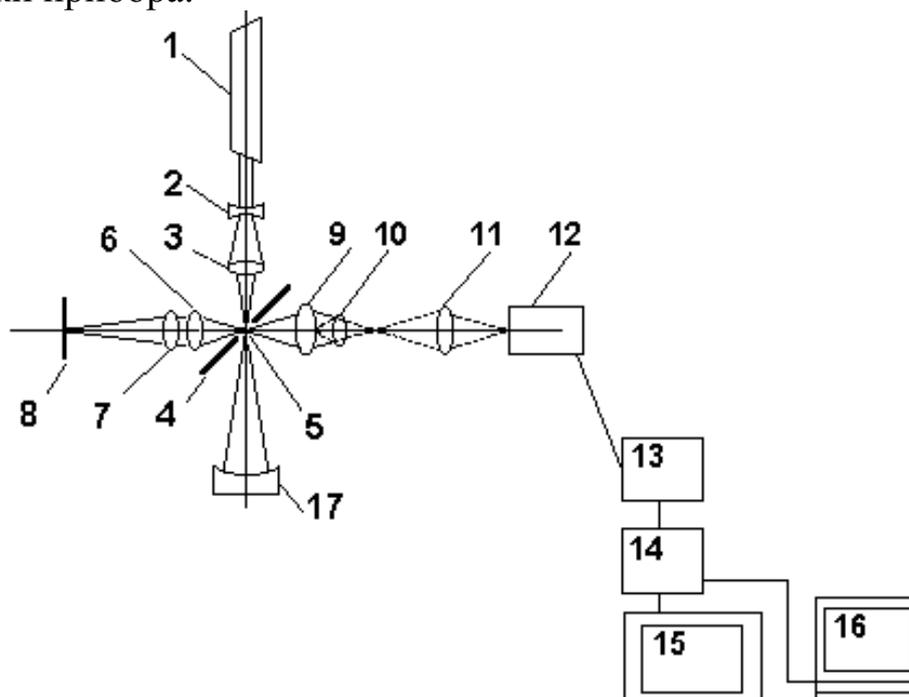


Рис. 41. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом: 1 – лазер; 2, 3 – осветительная система; 4 – наклонное зеркало, точечная диафрагма; 5 – точечное отверстие; 6, 7 – встречные коллиматорные объективы; 8 – плоское автоколлимационное зеркало; 9–11 – наблюдательный микроскоп с линзой Бертрана; 12 – видеокамера; 13 – блок обработки изображения; 14 – блок выделения центров интерференционных полос; 15 – телевизионный монитор; 16 – компьютер; 17 – измеряемая поверхность

Схема реализованного интерферометра с дифракционным опорным волновым фронтом показана на рис. 41. Луч лазера 1, пройдя отрицательный компонент 2, фокусируется объективом 3 в точечное отверстие 5 наклонного плоского зеркала 4. Отверстие 5 совмещено с центром кривизны вогнутой сферической поверхности исследуемой детали 17. В схему входит также автоколлимационная осветительная система, состоящая из элементов 6–8.

В плече наблюдения имеются объектив 9 и окуляр 11 для наблюдения освещенной точечной диафрагмы и автоколлимационного изображения точки в центре кривизны контролируемой поверхности. Для наблюдения интерференции в зрачке дополнительно вводится линза Бертрана 10. Для регистрации интерферограммы за окуляром устанавливается камера 12 с блоком обработки сигнала 13 и устройством отображения 14, для регистрации и обработки результатов установлен компьютер 16.

Работает интерферометр следующим образом. Пучок лучей лазера 1 фокусируется осветительной системой 2, 3 на точечное отверстие в зеркальном покрытии наклонного плоского зеркала 4 в виде пятна рассеяния (обычно – дифракционного кружка) диаметром порядка 10 мкм. Точечное отверстие становится источником дифракционной сферической волны, которая в автоколлимации от исследуемой сферической поверхности фокусируется в виде пятна рассеяния, перекрывающего точечное отверстие, а чаще – смещенного относительно него для получения интерференционной картины прямолинейных полос. Отразившись от зеркала, этот пучок через объектив 9 и окуляр 11 направляется на приемник изображения 12. Часть излучения лазера, не прошедшее через точечное отверстие 5, отражается от зеркала 4 в направлении осветительного сферического зеркала 8 и фокусируется им на отверстию в направлении плеча наблюдения 9–11.

При этом на отверстии формируется вторая дифракционная сферическая волна, фронт которой используется в качестве опорного. В результате сложения этой волны с рабочей, сформированной контролируемой поверхностью, возникает интерференция в совмещенных световых пучках, распространяющихся от точечного отверстия в направлении приемника изображения.

Рассмотренный вариант схемы интерферометра в режиме контроля оптических поверхностей имеет примечательную особенность, состоящую в том, что данный интерферометр является полностью безэталоным, так как в нем не содержится ни одной

образцовой оптической поверхности, а также отсутствуют поверхности, погрешности изготовления которых входят в погрешности измерения.

При наличии в схеме контроля значительных вибраций, а также при необходимости регулярной работы на интерферометре, используется компьютер 16 с видеосистемой 12–15.

Для устранения влияния вибраций телевизионное изображение движущейся интерференционной картины записывают в видеопамять, а затем наблюдают и расшифровывают изображение неподвижной интерферограммы, воспроизводимое с одиночного кадра.

Имеется модификация данного интерферометра, позволяющая просто и эффективно реализовать режим фазового считывания интерферограммы, при котором точность отсчета может достигать $0,001\lambda$.

Применение автоматизированной обработки численных результатов контроля позволяет существенно расширить возможности всесторонней оценки исследуемых оптических систем и их элементов, повысить надежность контроля, что, в конечном итоге, способствует эффективности исследований и производства, повышению качества их результатов (рис. 42).

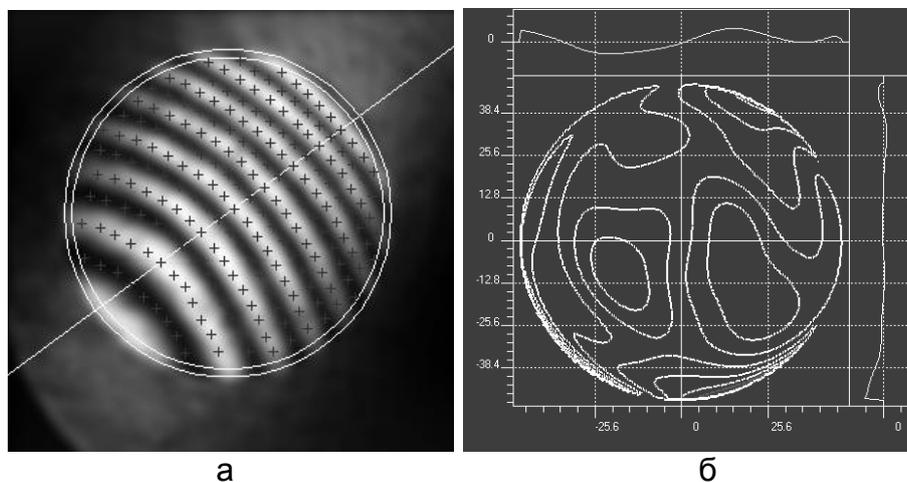


Рис. 42. Обработка интерферограммы (а); карта профиля поверхности (б)

Погрешность волнового фронта, образованного дифракцией на малом отверстии, весьма мала, так как эталонный волновой фронт – это поверхность постоянной фазы излучения, используемого уже в дальней зоне дифракции. Эта поверхность является почти идеально сферической, причем отклонение волнового фронта от сферы в зависимости от расстояния определяется по формуле, полученной с учетом теории Дебая [3] и справедливой на таких расстояниях от

экрана, которые не менее, чем на три порядка превышают размер отверстия:

$$\Delta w = \frac{d^2}{\lambda s}, \quad (47)$$

где d – диаметр диафрагмы; λ – рабочая длина волны; s – расстояние от диафрагмы. При $d = 1$ мкм, $\lambda = 0,633$ мкм, и $s = 12$ мм (фокусное расстояние регистрирующей оптики) погрешность эталонного волнового фронта равна (peak-to-valley) $0,00013\lambda$, а СКО соответственно равна $0,00004\lambda$. Соотношение (47) не содержит угол, под которым наблюдается отверстие, поскольку эта формула, естественно, справедлива в полном угле нулевого порядка дифракции. Для указанного случая этот угол, определяемый формулой:

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d}, \quad (48)$$

равен $\theta = \arcsin 0,633 = 39^\circ$. При дальнейшем распространении ошибка отступления от сферичности становится еще меньше и, следовательно, в пределах угла дифракции по крайней мере $\pm 18^\circ$ имеем высококачественный сферический волновой фронт, числовая апертура которого равна $N_A = 0,31$.

Достоинства.

Прибор отличают: отсутствие образцовых оптических элементов и ошибок их изготовления; конструктивная простота; малогабаритность и легкость в эксплуатации.

Недостатки.

Основной недостаток данного устройства – сложность юстировки в процессе его изготовления. Другой недостаток, свойственный всем двухлучевым интерферометрам, состоит в ограниченной точности измерения координат интерференционных полос, что вызвано их нерезкостью, вследствие синусоидального характера распределения интенсивности в интерференционном изображении.

10. ФУНКЦИИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ В ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Рассмотрение традиционных методов исследования искажений волнового фронта, связанных с ошибками формы поверхности, на примере количественного теневого метода Фуко-Филбера, показывает, что для него действует линейная ФП как зависимость освещенности E_T в теневой картине от поперечной аберрации $\delta l'$ (связанной с деформацией исследуемого волнового фронта) с коэффициентом пропорциональности k :

$$E_T = k\delta l'. \quad (49)$$

С другой стороны, анализ ФП метода интерферометрии деформаций волнового фронта показывает, что относительная интенсивность в интерференционной картине \tilde{I} связана с искажениями волнового фронта ω (в волновой мере) периодической зависимостью:

$$\tilde{I} = \cos^2 \pi\omega. \quad (50)$$

Здесь $\tilde{I} = I_i / I_0$, где I_i – значение интенсивности в данной точке интерференционного изображения, I_0 – интенсивность в той же точке при отсутствии аберрации; $\omega = W/\lambda$, где W – нормальное отклонение волнового фронта, λ – длина волны излучения в интерферометре.

Анализ показывает ряд преимуществ, создаваемых здесь периодической характеристикой чувствительности:

1. наглядное отображение карты ошибок волнового фронта, где интерференционные полосы играют роль изолиний;
2. количественный характер метода, где интерферограмма удобна для прямых геометрических измерений координат положения полос, связанных с исследуемыми ошибками волнового фронта.

При настройке интерферометра на режим «прямолинейных полос» вносится взаимный заклон образцового и рабочего волновых фронтов на угол θ , причем возникает несущая частота ν :

$$\nu = \frac{\sin \theta}{\lambda}. \quad (51)$$

При этом ФП такого поперечно расфокусированного интерферометра принимает вид:

$$\tilde{I} = \cos^2 [\pi(\nu y + \omega)], \quad (52)$$

где y – пространственная координата.

Работу интерферометра в режиме поперечной расфокусировки удобно рассматривать, введя понятие двумерной ФП метода исследования прецизионных поверхностей (рис. 43).

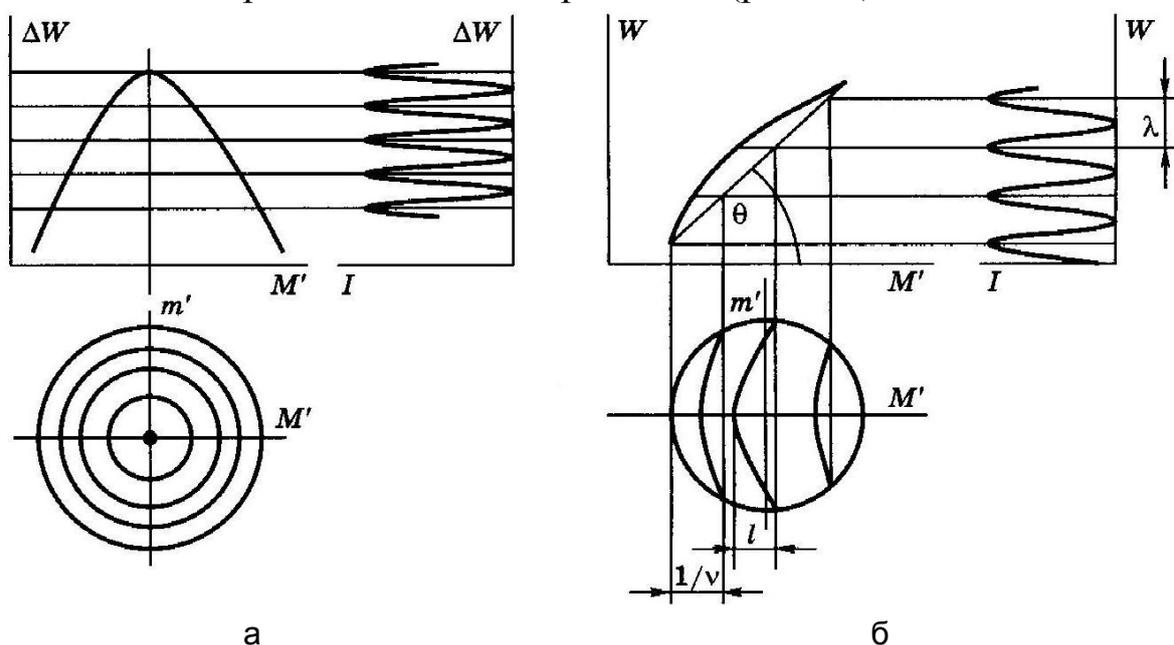


Рис. 43. Схема функционирования периодической ФП: точно сфокусированный интерферометр (а); поперечно расфокусированный интерферометр (б)

Введение в характеристику преобразования дополнительной координаты (заклон на угол θ) позволяет достичь качественного скачка, когда карта деформаций волнового фронта (как система изолиний – «горизонталей» карты деформаций с шагом дискретизации, равным или кратным длине световой волны) преобразуется в систему полос, соответствующих системе профилей поверхности ошибок исследуемого волнового фронта. Такой прием повышает наглядность интерферограммы, облегчает ее расшифровку и особенно важен, когда измеряемые ошибки меньше шага дискретизации, т.е. меньше цены шага интерференционной полосы (т.е. $\lambda/2$ или λ). В работе [17] дан анализ возможностей и ограничений методов и средств исследования прецизионных поверхностей. Недостатки плавных характеристик преобразования:

- ограниченный динамический диапазон, лежащий в рамках линейного участка ФП;
- низкая чувствительность визуальных и измерительных наводок, связанная с нечеткостью элементов оптико-измерительного изображения (теневая картина, пятно рассеяния, пятна гартманогаммы);

– высокая избыточность информации при автоматизированной расшифровке и интерпретации таких оптико-измерительных изображений.

Для устранения выявленных недостатков и получения эффективных методов и средств исследования прецизионных поверхностей, обладающих новыми свойствами и расширенными возможностями дано развитие системы одномерных ФП [17]. Предложен ряд типовых ФП, которым присвоены условные названия, взятые в кавычки, по признаку внешней формы графика функции.

Поскольку рассматриваемые инвариантные зависимости могут связывать между собой в разных конкретных случаях разные величины, для всех ФП приняты единые значения функции и аргумента: $W_{y,z}$ – независимая переменная, соответствующая исследуемому двумерному параметру; $I_{y',z'}$ – зависимая переменная, соответствующая двумерному распределению интенсивности в оптико-измерительном изображении.

В частности, в принятый ряд базовых ФП внесены:

1. ФП типа «клин», соответствующая плавной ФП метода исследования:

$$I = W \operatorname{tg} \alpha, \quad (53)$$

где $\operatorname{tg} \alpha$ – градиент;

2. периодическая ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа «синусоида»:

$$I = 1 + \cos \frac{2\pi W}{\lambda_w}; \quad (54)$$

3. ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа «импульс», которая может быть наглядно представлена выражением с участием δ -функции:

$$I = \delta(W) = \lim N \exp(-N^2 \pi W^2)$$

или

$$\begin{aligned} I(W) &= I_{\max} \text{ при } W = 0, \\ I(W) &= 0 \text{ при } W \neq 0; \end{aligned} \quad (55)$$

4. периодическая ФП метода исследования прецизионных поверхностей типа «гребенка», которая может быть наглядно представлена выражением:

$$I_{y,z} = \operatorname{comb} \frac{W}{\lambda_w} = \sum_{n=1}^N \delta(W - n\lambda_w),$$

где $\lambda_w \leq W \leq n\lambda_w$, или, на практике:

$$I(W) = I_{\max} \quad \text{при} \quad \frac{W}{\lambda_w} = 0, 1, 2, 3, \dots, \quad (56)$$

$$I(W) = 0 \quad \text{при} \quad \frac{W}{\lambda_w} \neq 0, 1, 2, 3, \dots$$

Анализ показал, что разработанная система ФП дает ряд специальных положительных эффектов, таких как сокращение избыточности информации, улучшение наглядности и выявление новых деталей и свойств объекта, повышение чувствительности контроля и точности измерений, повышение оперативности и производительности, упрощение задачи автоматизации контроля и исследований.

Взаимовлияние синтезируемых методов исследования прецизионных поверхностей с достижением новых результатов и свойств иллюстрируется также на примере предложенного (и реализованного в виде серийного прибора) метода изометрии второй производной функции пространственного распределения интенсивности, позволяющего, например, выделять центры (оси) интерференционных полос. Эта разработка дала возможность создать автоматизированный интерферометр нового типа, позволяющий повысить точность расшифровки интерферограмм в 10–40 раз в реальном времени.

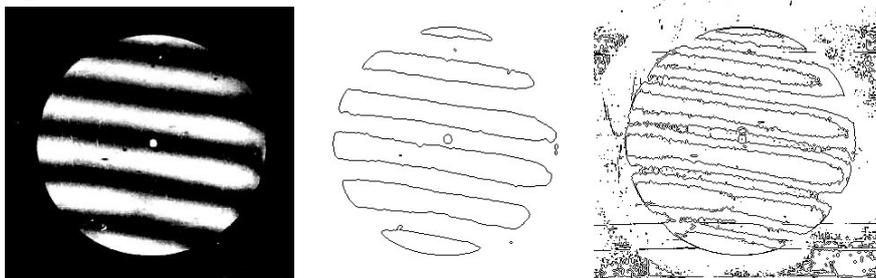


Рис. 44. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности измерения координат полос

Операция электронного выделения и визуализации центров интерференционных полос (рис. 44) с умножением частоты полос осуществлена согласно ФП вида:

$$I_{\text{ок}} = \text{comb} \left[\frac{1}{\lambda} (y \sin \theta + kW) \right], \quad (57)$$

где $I_{\text{ок}}$ – относительная интенсивность в оконтуренной интерферограмме; θ – угол заклона образцового волнового фронта интерферометра относительно рабочего волнового фронта; W –

волновая абберрация; y – координата в интерферограмме, ориентированная по нормали к направлению интерференционной полосы; k – коэффициент умножения полос.

Если $k = 2$, то при этом цена шага интерференционной полосы составляет $\lambda/4$, что создает эффект интерферометрии с использованием излучения, имеющего $\lambda = 300$ нм.

Точность определения координат интерференционных полос возрастает, как показали исследования, в 40 раз по сравнению с точностью измерения необработанной интерферограммы, что соответствует возможности визуального обнаружения деформации волнового фронта на уровне $\lambda/200$ в реальном времени.

Точностные характеристики прибора исследования прецизионных поверхностей зависят от принципа и конструкции измерительного преобразователя и могут быть определены при анализе ФП.

Итак, в данных дифракционных интерферометрах генерация неискаженного сферического эталонного фронта волны основана на использовании хорошо воспроизводимого физического явления дифракции лазерного пучка на точечном отверстии диаметром, соизмеримым с длиной волны. В этих приборах отсутствует образцовая оптическая деталь и присущие ей неизбежные остаточные погрешности, возникающие при изготовлении.

Испытания и аттестация реализованных приборов не выявили погрешностей, которые превышали бы значения $0,02\lambda$. Практика работы дифракционных интерферометров с созданным в данной работе ТАИ-1 показала возможность обнаружения и оценки ошибок волнового фронта на уровне $0,005\lambda$ в реальном времени в интерактивном режиме.

11. ВЫСОКОТОЧНАЯ ОБРАБОТКА И ИНТЕРПРЕТАЦИЯ СЛОЖНЫХ ИНТЕРФЕРОГРАММ

Рассмотрим интерферограммы волновых фронтов, отраженных от оптических поверхностей различного качества. Интерферограммы получены на дифракционном интерферометре [3, 14], где в качестве референтного (эталонного) волнового фронта используется волна, дифрагированная на отверстии с диаметром, сравнимым с размерами максимума первого порядка (диском Эри) дифракционного кружка. Схема подобного интерферометра показана на рис. 41, общий вид разработанного и собранного образца – на рис. 45. С целью восстановления фазы волнового фронта и топографии поверхности используется коммерческая программа обработки интерферограмм **Zebra MathOPTIX** [17], разработанная в НИУ ИТМО на кафедре ПиКО, а также программное обеспечение обработки интерферограмм, созданное на кафедре компьютерных технологий НИУ ИТМО [15].

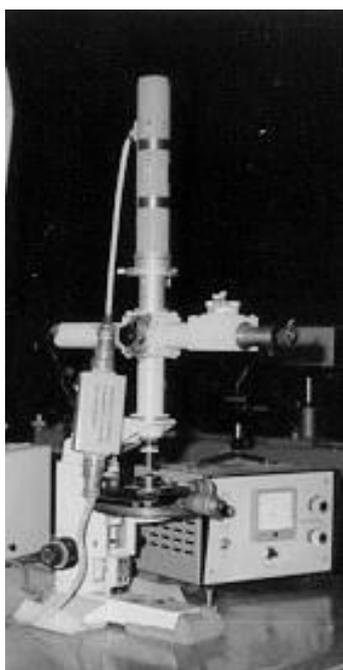


Рис. 45. Дифракционный интерферометр для исследования объективов микроскопов

Программа **Zebra MathOPTIX** обладает целым набором математических и сервисных возможностей, предоставляемых пользователю в соответствии с принятыми в мире стандартами индустриально используемых интерферометров. В этом смысле выходная информация, которая формируется в программе **Zebra MathOPTIX**, аналогична программному обеспечению интерферометров таких ведущих фирм, как Zygo, Veeco и Möller-Wedel. Авторами-разработчиками программы **Zebra MathOPTIX** являются

В.М. Домненко и Д.А. Гаврилин. Общий вид экспериментального PDI-интерферометра, построенного на базе серийных узлов производства фирм Möller-Wedel и ОАО «ЛОМО» представлен на рис. 46.

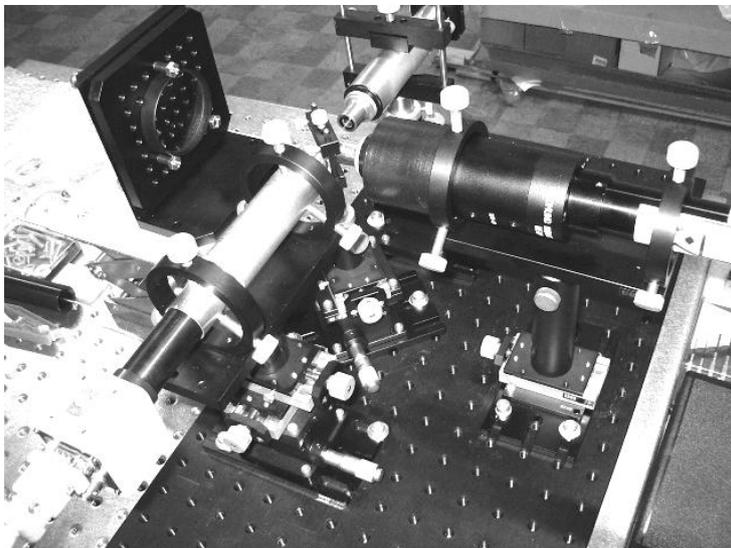


Рис. 46. Общий вид экспериментального PDI-интерферометра, построенного на базе серийных узлов производства фирм Möller-Wedel и ОАО «ЛОМО»

Обработка интерферограмм производится в несколько этапов, что иллюстрируется представленными ниже изображениями. В предварительную обработку входят, наряду со служебными процедурами, этап неглубокой пространственной фильтрации для удаления «мусора» из интерферограммы и этап идентификации полос – расстановка точек вдоль полос с определением возможного порядка базиса аппроксимации контролируемого волнового фронта или поверхности.

Дальнейшая обработка основывается на серии математических методов интерпретации функций, целью которых является получение достоверного разложения отклонения волнового фронта или поверхности по полиномам Цернике. При этом определяются такие важные величины, как размах (peak-to-valley) и СКО в микрометрах или количестве рабочих длин волн.

Использование этой программы для обработки интерферограмм, полученных в интерферометре с дифракционной волной сравнения (PDI-интерферометре), представляет особый интерес, так как, в отличие от всех известных интерферометров, информация об отклонении исследуемых волновых фронтов или поверхностей здесь является абсолютной, а не относительной. Недостатком классических интерферометров при контроле оптики наивысшего класса точности является необходимость присутствия в их схемах образцового оптического элемента, точность изготовления которого ограничена

уровнем порядка $1/20\lambda$, причем нет гарантии от неконтролируемого изменения этой величины в процессе эксплуатации интерферометра.

Итак, основное достоинство предлагаемого лазерного интерферометра с дифрагированным опорным фронтом состоит в принципиальном отсутствии деформаций опорного волнового фронта при одновременном сохранении эксплуатационных возможностей, таких же как и у классических (традиционных) интерферометров, подобных неравноплечему интерферометру по схеме Тваймана-Грина.

Принцип действия рассматриваемого дифракционного интерферометра основан на использовании физического явления дифракции на малом отверстии, который может быть сравнительно просто и безусловно надежно воспроизведен в любых условиях и любом количестве приборов. Таким образом, мы имеем нуль-интерферометр, который не требует образцовых оптических элементов и в то же время служит источником сферической опорной волны при контроле оптических поверхностей и систем наивысшей точности, в том числе – для контроля образцовых элементов традиционных интерферометров. Данный интерферометр позволяет применять приемы работы, известные для традиционных интерферометров, а также различные средства повышения точности измерительных отсчетов. При этом повышение точности отсчетов является и средством повышения точности измерения (в то время как в традиционных интерферометрах это лишь точность отсчитывания суммарных деформаций рабочего волнового фронта, имеющего неустранимую ошибку, связанную с неизвестной ошибкой образцовой детали). В виду простоты и малогабаритности дифракционного интерферометра, он может служить элементом устройств для постоянного самоконтроля реальной точности образцовых элементов в традиционных интерферометрах в процессе их эксплуатации, в том числе – перед каждым сеансом контроля. Такой подход позволяет по-новому взглянуть на возможности и перспективы современной интерферометрии.

При стабильной работе PDI-интерферометра вся информация, извлекаемая из интерферограммы с помощью глубокой математической обработки, является полезной. Следовательно, чем лучше работает программное обеспечение, тем более высокой является точность результатов контроля оптики.

Экспериментальные результаты, показанные на рис. 47, относятся к двум различным уровням качества исследуемых поверхностей линз.

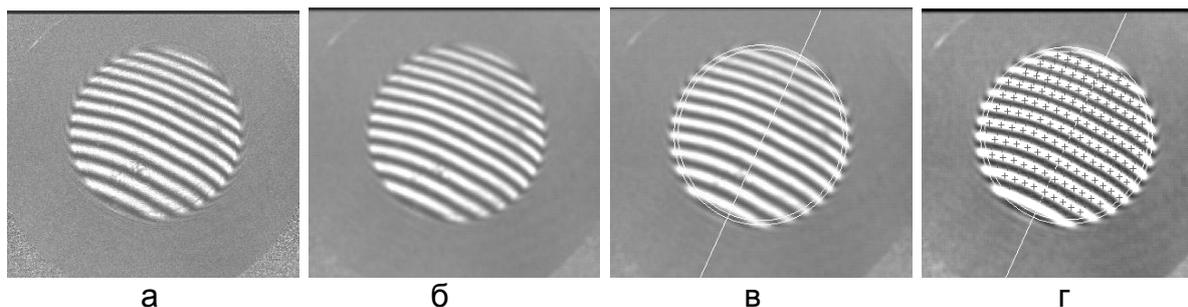


Рис. 47. Экспериментальные результаты распознавания полос на интерферограммах обычной конфигурации: контроль поверхности с малым отклонением от сферичности (а); контроль поверхности с большим отклонением от сферичности (б); расстановка точек на интерференционных полосах (в); обработка интерферограммы (г)

Первый (рис. 47, а) – это случай контроля поверхности с достаточно малым отклонением от сферичности, т.е. поверхности высокого качества. Интерферограмма получена на интерферометре с дифракционной волной сравнения, дополнительное достоинство которого состоит в том, что все пучки лучей фильтруются при прохождении через дифрагирующее точечное отверстие, и поэтому интерференционное изображение отличается высоким качеством, чистотой и отсутствием шумов. Это обстоятельство способствует тому, что работа всех этапов программы Zebra MathOPTIX происходит четко и обеспечивает высокую надежность опознавания и измерения координат интерференционных полос, стабильную повторяемость выходных числовых величин, что является гарантией адекватности и точности конечных результатов контроля.

Второй (рис. 47, б) – в качестве модели выбрана вогнутая поверхность очковой линзы, обладающая достаточно большими отклонениями от сферичности. При этом на интерферограмме не удается получить настолько малое количество полос, чтобы процедура поиска максимумов или минимумов полос могла уверенно идентифицировать все полосы, как это происходит в случае поверхности более высокого качества. Между тем, подобный случай может оказаться весьма важным в практике интерферометрического контроля оптики.

Несмотря на большие отклонения исследуемой поверхности от сферичности, их необходимо определить с не менее высокой точностью, чем в первом случае.

Такая задача возникает, например, при контроле асферики с отступлениями от сферы или другой поверхности второго порядка в несколько десятков длин волн. Для того чтобы использовать в полной мере преимущества PDI-интерферометра, создание нуль-корректоров

для контроля асферики чаще всего неэффективно, так как при этом мы ограничиваем сами себя точностью изготовления этого корректора, которая экспериментально не может быть оценена лучше, чем это дают известные интерферометры типа Физо или Тваймана. В этой связи необходима разработка методов оценки интерференционной картины с большим количеством искривленных полос, которая формируется при использовании анаберрационных схем, где исследуемая поверхность высшего порядка заменяется ближайшей асферикой второго порядка. При этом приходится вести контроль с применением расшифровки интерферограмм, в которых искривления полос могут достигать 20 и более.

В практике таких измерений требуется применение более высокоразрешающей ПЗС-матрицы, например, измерительной матрицы с количеством пикселей более миллиона.

Остаются и другие проблемы, в частности, проблема качества проекционной оптической системы. Кроме того, увеличение числа данных в аппроксимационных задачах, как известно, приводит к обратному эффекту в смысле получения еще более сглаженной картины и увеличения степени неопределенности компонент высшего порядка в полиномиальном разложении (это касается не только степенного базиса, но и полиномов Цернике). Имеется в виду, что интерпретационный путь решения задачи восстановления профиля сложной формы в принципе не подходит для контроля асферик высшего порядка.

12. КОНСТРУКТИВНОЕ РЕШЕНИЕ ИНТЕРФЕРОМЕТРА С ДИФРАГИРОВАННЫМ ОПОРНЫМ ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ

Лазерный безэталонный интерферометр с опорным волновым фронтом, который сформирован путем дифракции лазерного пучка, сфокусированного на микронном отверстии, был предложен и запатентован под руководством и при ведущем участии профессора НИУ ИТМО В.К. Кирилловского (авторское свидетельство № 655188, 1978). Активная работа по исследованию и развитию данного уникального технического решения продолжалась все прошедшие годы с привлечением различных творческих коллективов и изложена в 22 научных работах.

12.1. Унифицированный интерферометр для контроля точной астрооптики

В процессе дальнейшей работы был создан вариант безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом – ПК-881 (рис. 48, 49).

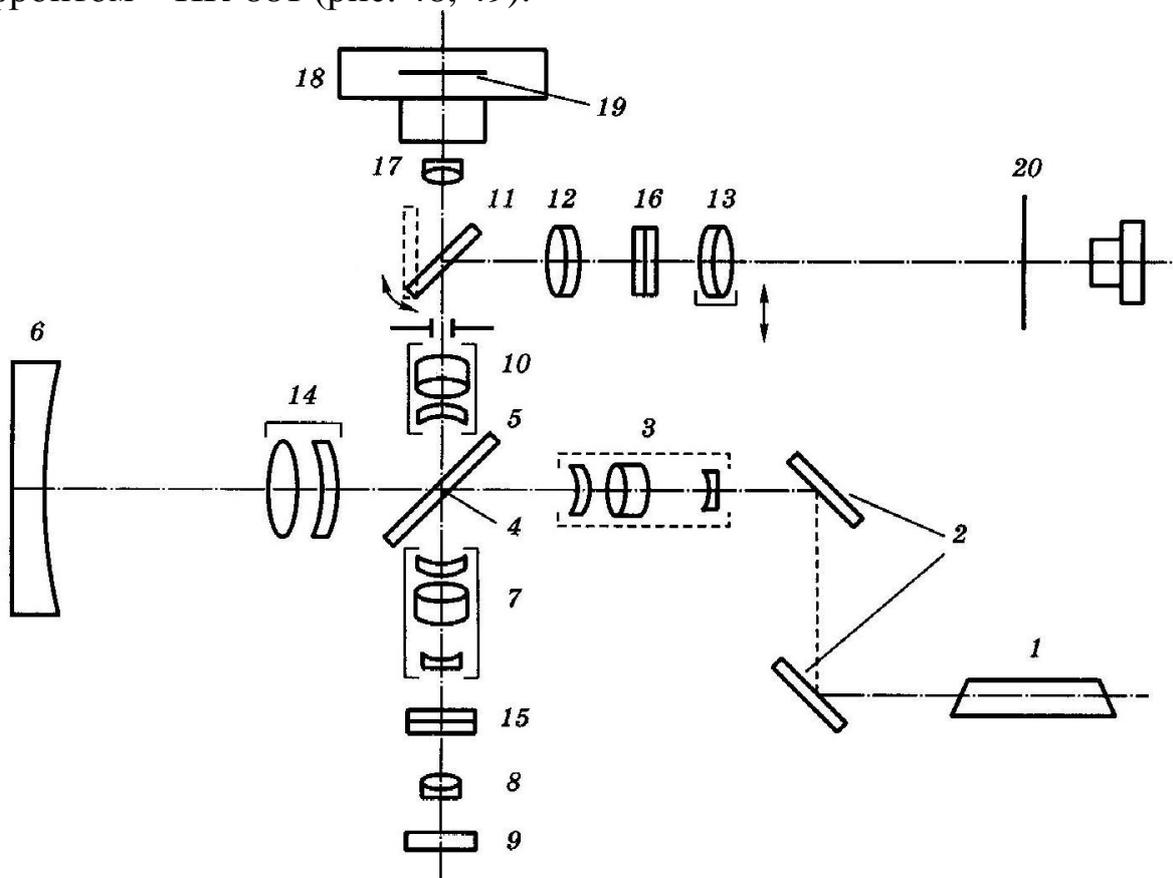


Рис. 48. Схема безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом ПК-881

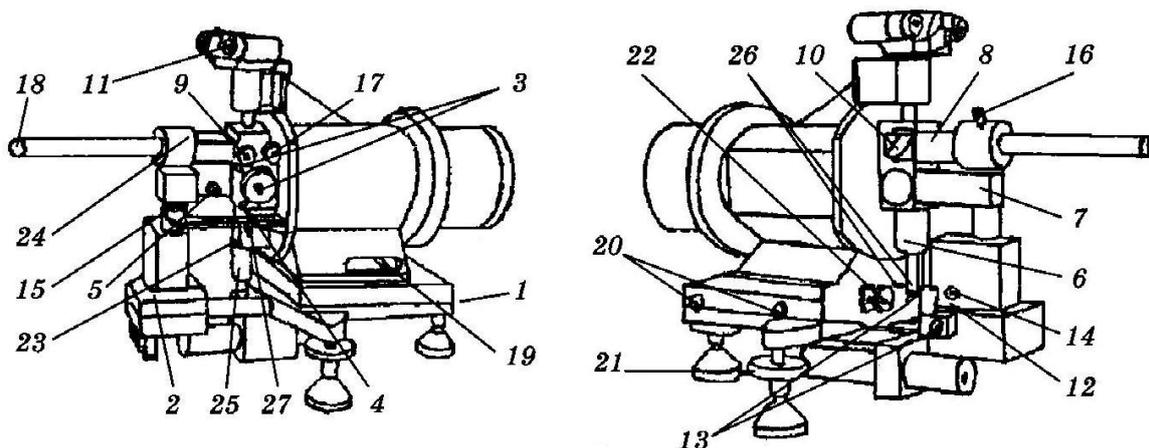


Рис. 49. Конструктивное решение безэталонного интерферометра с дифрагированным эталонным фронтом ПК-881

12.1.1. Методика работы на интерферометре

Установить интерферометр перед исследуемой системой на расстоянии, равном ее радиусу кривизны. Установить в удобном месте лазер ЛГ-52-1 и включить его. (Примечание. Порядок работы с лазером ЛГ-52-1 изложен в его техническом описании). Направить луч в центральную зону зеркала 12 (рис. 49). Предварительно грубыми (вручную) и плавными разворотами этого зеркала с помощью регуляторов 13 направить луч в центр отверстия 14. Перекрыть отверстие 10 кусочком папиросной бумаги, затем, пользуясь регуляторами 13, добиться попадания луча в центр этого отверстия. Убрать бумагу с отверстия. Включить линзу Бертрана рукояткой 16. Включить диагональное зеркало рукояткой 17. Наблюдая в окуляр 18, добиться максимального освещения точечного отверстия в зеркальном препарате. При необходимости сфокусировать изображение точки поворотом рукоятки 16 вокруг своей оси.

С помощью матового стекла или листка бумаги найти автоколлимационное изображение точки, построенное проверяемой системой. (Это удобно сделать, подсвечивая со стороны окуляра вспомогательным источником света: лампочкой или лазером).

Освободить стопор 19. Последовательно, грубыми и точными перемещениями головки интерферометра поперек оптической оси винтами 20 и вращением одного из зубчатых колес 21, привести автоколлимационный блик на зеркало с дифракционной точкой.

Наблюдая в окуляр, добиться минимальных размеров пятна рассеяния перемещением головки интерферометра вдоль оптической оси винтом 22.

Включить линзу Бертрана. При этом в поле зрения окуляра должна наблюдаться интерференционная картина. Вращением ручки 9 сфокусироваться на резкую границу зрачка.

Разворотами поляризаторов 23 и 24 добиться максимального контраста. (Контраст интерференционной картины существенно зависит от используемого лазера и от его модового состава излучения. При плохом контрасте нужно вывести лазер на одномодовый режим или заменить прибор).

Перестройка числа и ориентации полос достигается винтами 20 и колесами 21. При наблюдении интерференционных колец число последних меняют винтом 22.

12.1.2. Методика оконтуривания интерферограмм

1. Негатив интерферограммы контактно отпечатать на куске пленки типа ФГ-СК (на копировальном станке контактной печати ФГ-СК стеклянной пластиной толщиной не менее 8 мм). Выдержка определяется опытным путем.
2. Отпечаток на пленке ФГ-СК: обработать; проявить (проявитель – УИ-2, время проявления – 5 мин, температура – 20°C); ополоснуть; фиксировать – 20 мин; промыть – 20 мин, высушить. После высушивания отпечаток аналогичным способом отпечатать на куске пленки ФГ-СК.
3. Обработать второй отпечаток: первый раз проявить (проявитель – УИ-2, время проявления – 3 мин, температура – 20°C); промыть – 3 мин (проточная вода); засветить при равномерном освещении 7–12 с (30 лк, белый свет); второй раз проявить (проявитель – УИ-2, время проявления – 4 мин, температура – 20°C); фиксировать – 20 мин; промыть – 20 мин (проточная вода); высушить. После обработки получается оконтуренный негатив интерферограммы.
4. Оконтуренный негатив контактно отпечатать на пленке ФГ-СК и обработать в обычном режиме (как первый отпечаток).
5. Оконтуренный отпечаток подвергается расшифровке на соответствующем измерительном приборе.

12.1.3. Методика метрологической аттестации интерферометра ПК-881-00.000

Аттестация прибора включает следующие операции:

- аттестация точечной диафрагмы разделительного зеркала;
- аттестация интерферометра путем регистрации интерферограмм пробного стекла.

1. Аттестация точечной диафрагмы разделительного зеркала.

- Зарегистрировать сечение пучка, дифрагированного на точечном препарате. Для этого в плоскости оправы точечного препарата интерферометра, обращенной к точке, поместить отрезок фотопленки (тип КИ-1) и открыванием предварительно перекрытого лазерного пучка выполнить экспонирование. Длительность экспозиции подбирается опытным путем для получения картины сечения пучка, содержащей дифракционный минимум (темное кольцо).

Допускается прямое измерение диаметра пучка, спроецированного на матовый экран.

- Измерить радиус R темного кольца на фотоснимке. Найти из чертежей на ПК-881 расстояние L , от точки препарата до плоскости установки пленки. Найти апертурный угол (рад) расходящегося пучка за точечной диафрагмой из выражения

$$\operatorname{tg} \nu = \frac{R}{L}.$$

- Найти апертурный угол σ' (рад) объектива 3 осветительной системы (рис. 48) из выражения:

$$u' = \sin \sigma',$$

где u' – расчетная апертура объектива.

- Найти диаметр точечной диафрагмы по формуле:

$$d_T = \frac{1,22 \lambda}{\nu - \delta}. \quad (58)$$

- Точечная диафрагма считается удовлетворительной, если соблюдается условие $d_T \leq 0,5d_{oc}$, где d_{oc} – диаметр пятна рассеяния осветительного объектива.

Допускается определение размера точечной диафрагмы измерением с помощью микроскопа.

2. Аттестация интерферометра путем регистрации интерферограмм пробного стекла.

Осуществляется путем фотографирования ряда интерферограмм вогнутого, имеющего местную ошибку пробного стекла, при его поворотах относительно оптической оси интерферометра через $22,5^\circ$ (5 положений от 0° до 90°) и через 90° (от 90° до 180°).

Поворот «картины ошибок» указывает на их принадлежность пробному стеклу. Если «картина ошибок» остается неподвижной, они принадлежат системам интерферометра.

Расшифровка ошибок производится на оконтуренных отпечатках интерферограмм. Разделение вращающейся и неподвижной составляющих функции деформации волнового фронта осуществляется по специальной программе методом наименьших квадратов; сквозной аппроксимацией всех снимков вращающимся и неподвижным базисом полиномов.

Выделение сферических aberrаций ПК-881 осуществляется контролем того же пробного стекла на неравноплечем интерферометре со сравнением результатов. Сферические aberrации эталонного зеркала считаются малыми.

Ожидаемая погрешность интерферометра не превышает $0,01\lambda$, где $\lambda = 0,6328$ мкм.

После юстировки прибора была проведена его аттестация по приведенной методике. В процессе проведения исследований первого образца рассмотренного интерферометра был выявлен ряд несовершенств конструкции и связанных с ними трудностей, возникающих в процессе работы на нем. Это послужило толчком к разработке более совершенных моделей приборов, работающих по тому же принципу. В ходе продолжения работы предусматривается изготовление и исследование новых макетов, и цеховых приборов, работающих в едином комплексе со средствами телевизионной техники, автоматизации обработки, преобразования и расшифровки изображений с использованием последних достижений в области цифровой и вычислительной техники.

13. ИНТЕРФЕРОМЕТР С ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ РАССЕЙВАЮЩЕЙ ПЛАСТИНКОЙ

Распространение лазеров привело к расширению использования интерференционного метода на ОАО «ЛОМО» и других оптико-механических предприятиях для контроля оптических деталей и систем. Обычно применяемый для контроля качества оптических поверхностей крупногабаритных деталей неравноплечий интерферометр позволяет контролировать вогнутые зеркала с радиусом кривизны до 50 м, но обладает рядом существенных недостатков:

- к качеству оптических деталей интерферометра предъявляются весьма высокие требования, прежде всего к светоделительному кубу и к эталонному зеркалу, точность которого определяет точность измерения;
- требуется высококогерентный источник света;
- контроль деталей и систем с апертурами выше 0,3 невозможен;
- схема весьма чувствительна к вибрациям.

Развитие голографической техники позволяет создавать интерферометры, свободные от указанных недостатков. Одним из таких приборов является интерферометр с рассеивающей пластинкой (рис. 50). Свет от точечного источника I фокусируется объективом 2 на поверхность исследуемого зеркала, предварительно пройдя через светоделительное зеркало 3 и рассеивающую пластинку 4 , которая представляет собой специфический голографический рассеиватель, обладающий круговой симметрией структуры. Техника изготовления такого рассеивателя несложна и рассмотрена в литературе [18]. Принцип работы прибора следующий. Пусть в точку K пришел один из лучей, рассеянных пластинкой. Отраженные в точках O' и K лучи приходят в точку B' на рассеивателе, симметричную точке B первичного рассеивания. Здесь происходит вторичное рассеивание, причем рассеянная составляющая луча из точки O' накладывается на нерассеянную составляющую луча из точки K' . Лучи интерферируют между собой. Интерференционная картина, изображаемая объективом 5 в плоскости приемника 6 , отражает отклонения формы исследуемой поверхности от сферы. Свет, не претерпевший рассеяния после двух прохождений через пластинку, фокусируется в виде яркой точки O'' в центре интерференционной картины, что является недостатком этой схемы, так как блик создает ненужную засветку и мешает наблюдению и регистрации интерференционной картины.

Интерферометр позволяет вести контроль при апертурах до 0,45; чувствительность схемы к вибрациям мала, благодаря совмещению рабочего и эталонного пучка; конструкция интерферометра не требует использования точных эталонных поверхностей.

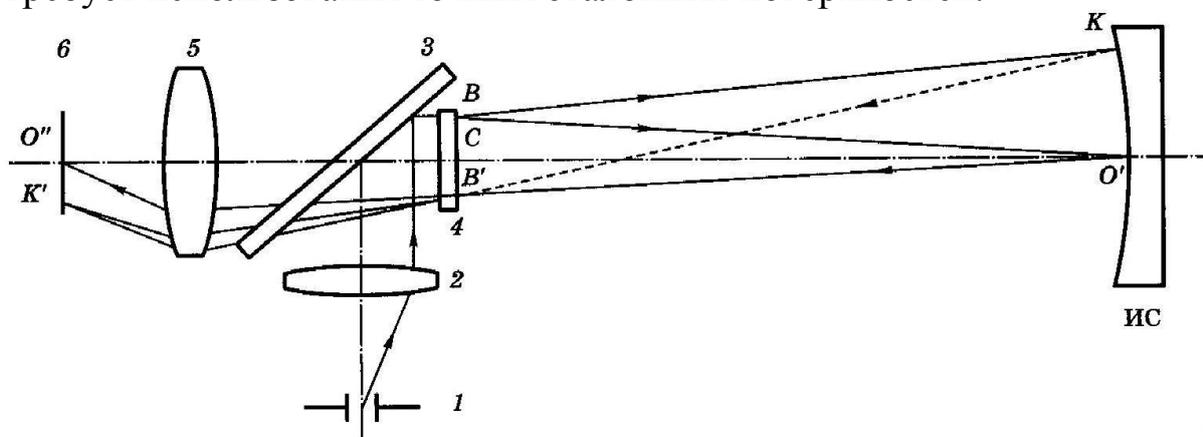


Рис. 50. Интерферометр с рассеивающей пластинкой

Основной частью интерферометров с рассеивающей пластинкой является голографический рассеиватель – стеклянная пластина с высокочастотной структурой на одной из поверхностей. К этой структуре предъявляются жесткие требования в отношении центральной симметрии:

$$\tau(x, y) = \tau(-x, -y).$$

Требуемую структуру получают с помощью голографической техники. Материалом служат голографические фотопластинки. Требования к разрешению определяют, исходя из апертуры контролируемой поверхности:

$$\sin \varphi = \lambda l, \quad (59)$$

где l – разрешение фотопластинки; φ – апертурный угол; λ – длина волны.

Для контроля типичного крупногабаритного астрономического зеркала требуются пластинки с разрешением выше 1000 мм^{-1} .

Методика изготовления рассеивателя состоит в двукратном экспонировании пластины в плоскости сложного интерференционного изображения, возникающего при прохождении расширенного лазерного пучка через матовое стекло. Схема установки, собранной в ОАО «ЛОМО» для изготовления рассеивающих пластин, приведена на рис. 51. Луч газового лазера 1, расширенный объективом 2, в виде расходящегося пучка направляется в зрачок объектива 5 через диафрагму 3 и матовое стекло 4. Объектив сфокусирован в плоскость фотослоя голографической фотопластинки 6.

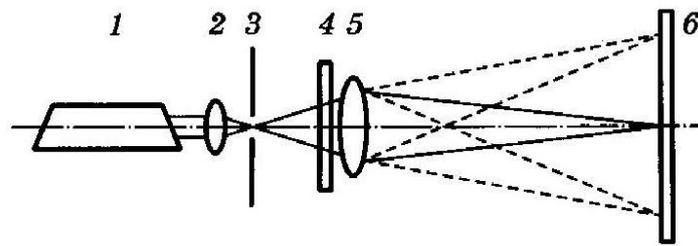


Рис. 51. Установка для изготовления голографической рассеивающей пластинки

Пластинка экспонируется в исходном положении требуемое время, затем экспозиция прерывается, и пластинка должна быть повернута вокруг оптической оси установки на 180° . Точность поворота обуславливает симметрию структуры голографического рассеивателя. В процессе экспонирования требуется исключить влияние вибраций на элементы схемы. В противном случае при перемещении элементов интерференционной картины по поверхности фотослоя в процессе экспонирования происходит полная либо частичная потеря структурных элементов. Это ведет к тому, что либо интерференция с полученным рассеивателем не может быть получена вообще, либо снижается апертура, в пределах которой наблюдается интерференция от контролируемой поверхности.

Ошибка поворота пластинки при экспонировании примерно в $40''$ приводит к искривлению полос по краям наблюдаемой интерференционной картины в виде знака интеграла.

После фотографической обработки на пластинке получается голографическая рассеивающая структура в виде совокупности элементов почернения размерами $1-10$ мкм. Для повышения светопропускания и уменьшения отражения света от поля рассеивателя в направлении приемника изображения выполняется отбеливание голограммы в растворе железосинеродистого калия. Таким образом, рассеиватель из поглощающего (амплитудного) превращается в фазовый, так как поглощающие элементы, состоявшие вначале из дисперсного металлического серебра, переводятся в частицы прозрачной соли, имеющей показатель преломления, отличный от показателя преломления желатинового носителя. Оптическая плотность поля рассеивателя, дающего после отбеливания структуру с оптимальными свойствами, составляет $0,2-0,3$. Максимальная апертура контролируемой поверхности, достигнутая с применением полученных описанным способом рассеивателей, составила $0,15$.

На ОАО «ЛОМО» усовершенствована первоначальная схема интерферометра. В модифицированной схеме (рис. 52) луч лазера 1 фокусируется объективом 2 в точку O в отверстии зеркального

коллектива 5. Точка O изображается объективом 3 через отражательную рассеивающую пластинку 4 на поверхность исследуемого зеркала, центр кривизны которого совмещен с осью симметрии рассеивателя. Интерференционная картина строится на поверхности коллектива 5 и через зеркало 6 с объективом 7 изображается в плоскость приемника 8. При этом нерассеянные лучи уходят в отверстие коллектива и в построении интерференционной картины не участвуют. Таким образом устраняется мешающий блик на интерференционной картине. Устранение из схемы светоделительного элемента дает 4-кратный выигрыш в светосиле прибора.

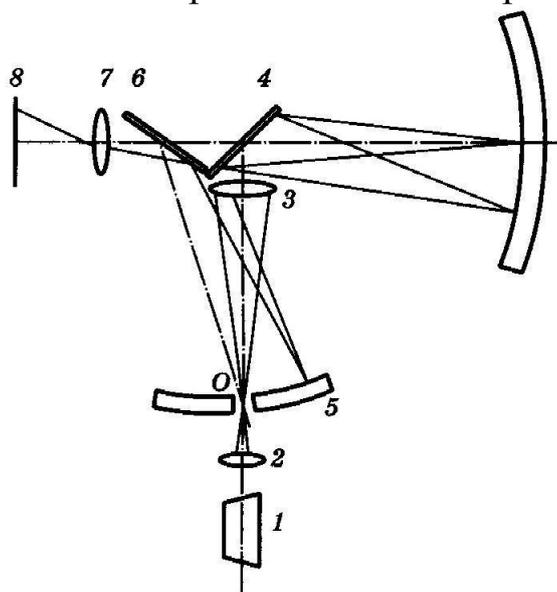


Рис. 52. Модифицированная схема интерферометра с рассеивающей пластинкой

Интерферометр нашел применение при исследовании главного зеркала телескопа ЗТА диаметром 2,6 м и ряда других изделий, выпускаемых объединением ОАО «ЛОМО». Погрешность измерения отклонений формы поверхностей не превышает $\lambda/5 - \lambda/10$.

Принцип изготовления голографических рассеивающих пластин состоит в двукратном экспонировании голографического фотослоя в пучке лазерного излучения через матовое стекло. После первого экспонирования фотопластина поворачивается вокруг оптической оси пучка на угол 180° с погрешностью порядка $0,5''$. Таким образом, на фотослое регистрируется центрально-симметричная структура. Для схемы интерферометра, работающей в проходящем свете, предпочтительно применение фазовой рассеивающей пластинки типа отбеленной голограммы. При работе на отражение голографическая структура пластинки выполняется рельефной (на хромированном желатине, фоторезисте и т.п.), после чего наносят отражающий алюминиевый слой путем вакуумного напыления.

14. СНИЖЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ РАСШИФРОВКИ ГАРТМАНОГРАММ

Развитие методов испытания оптических поверхностей в направлении разработки способов аттестации формы волнового фронта в плоскости зрачка привело к созданию Гартманом своего метода, пригодного для оценки ошибок волновой поверхности по данным, полученным по ряду локальных точек на зрачке. Гартман исходил из геометрической постановки вопроса. Согласно его методу лучи, исходящие из исследуемой системы, изолируются диафрагмами, а далее по экстрафокальным фотографическим снимкам определяются точки, в которых эти лучи пересекают ось. Прерывный пучок лучей, пересекающийся с осью, получают в установке Гартмана, экранируя зрачок исследуемой системы непрозрачным экраном с отверстиями, симметричными относительно центра. Таким образом, получают прерывный пучок лучей, пересекающийся с осью.

Точность гартмановского исследования зависит от точности измерения координат точек – следов отверстий экрана, зарегистрированных на фотопластинке. Точки являются дифракционными изображениями, которые тем сильнее размыты и имеют тем больший диаметр, чем меньше отверстия экрана. Кроме того, структура изображения точек на гартманограмме определяется степенью расфокусировки и турбулентностью воздушного тракта, включенного в схему контроля. Последний фактор особенно существенно искажает структуру распределения освещенности, поскольку при гартмановских исследованиях, с целью исключения влияния атмосферы на координаты точек, время экспозиции при съемках выбирается достаточно большим, чтобы смещения точек из-за атмосферных дрожаний могли осредниться. При этом размывание точки гартманограммы становится весьма значительным. Распределение оптической плотности в пятне при этих условиях аналогично показанному на рис. 53, а. Как видно из графика, пограничные участки кривой пологие, градиент распределения плотности невелик. Исследованиями было показано, что погрешность наведения на точку гартманограммы тем значительнее, чем ниже градиент плотности. Погрешность наведения для гартманограммы, полученной от звезды, при средних атмосферных условиях лежит в интервале 26–40 мкм при допустимой величине не более 12 мкм для схемы контроля крупного астрономического зеркала.

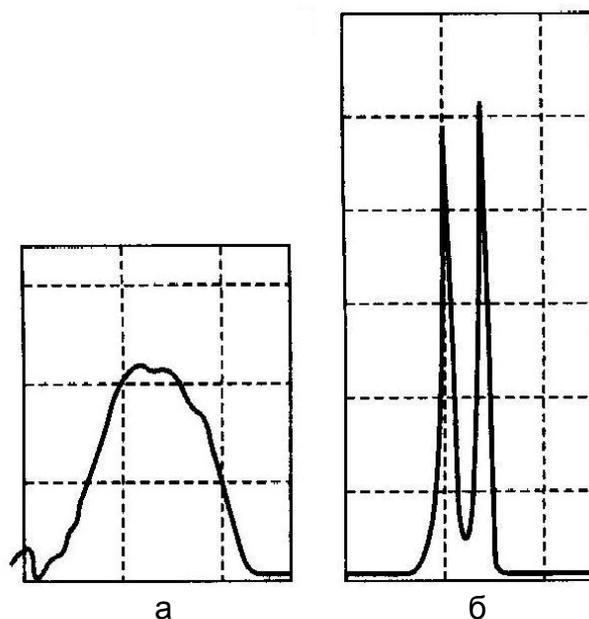


Рис. 53. Распределение плотности в интерферометре: без дополнительной обработки (а); после оконтуривания (б)

Предлагаемый способ повышения точности измерения при исследовании оптической системы по методу Гартмана состоит в повышении чувствительности наводок путем придания изображению точки гартманогаммы кольцеобразной формы. Здесь мы имеем случай, близкий к широко применяемой на практике биссекториальной наводке, чувствительность которой не менее чем в 5 раз превышает ту, которая может быть достигнута для распределения освещенности колоколообразного типа, рассмотренного выше. Преобразование структуры точки из колоколообразной (рис. 53, а) в кольцеобразную (рис. 53, б) достигается применением способа оконтуривания с использованием фотографического эффекта Сабатье. Оценка погрешностей измерения координат точек, производившаяся путем определения СКО серии последовательных наводок, показала, что применение метода оконтуривания для направленной трансформации структуры изображений точек гартманогаммы позволяет снизить погрешность измерений по методу Гартмана от звезды в 4–20 раз. Аналогичный эффект может быть получен и при цеховых исследованиях систем методом Гартмана в условиях значительных воздушных потоков и вибраций в схеме контроля.

15. РАСШИРЕНИЕ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ГАРТМАНА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЛАЗЕРА

Исследования крупногабаритных оптических систем, например, астрономических, в процессе их изготовления и аттестации в цехе обычно проходят в условиях трудноустраняемых вибраций в схеме контроля. При исследованиях методом Гартмана вибрации приводят к быстрым синхронным перемещениям пятен гартмановской картины. За время экспозиции гартманограммы, которое при использовании обычного теневого прибора с накальной или ртутной лампой доходит до нескольких минут, световые пятна многократно перемещаются по поверхности эмульсионного слоя по случайному закону, что приводит к сильному увеличению диаметра изображения пятна и размыванию его очертаний. В результате при наличии вибраций в цеховых условиях часто не удается получить гартмановский снимок, пригодный к расшифровке, т.е. содержащий уверенно различимые пятна.

Разработанная установка для получения гартманограмм с использованием лазера позволяет на 5 порядков сократить длительность экспозиции при съемке гартманограмм и создать условия для получения в условиях вибрации таких гартманограмм, четкость пятен на которых определяется только дифракцией на отверстиях экрана (диафрагмы Гартмана). Схема установки показана на рис. 54.

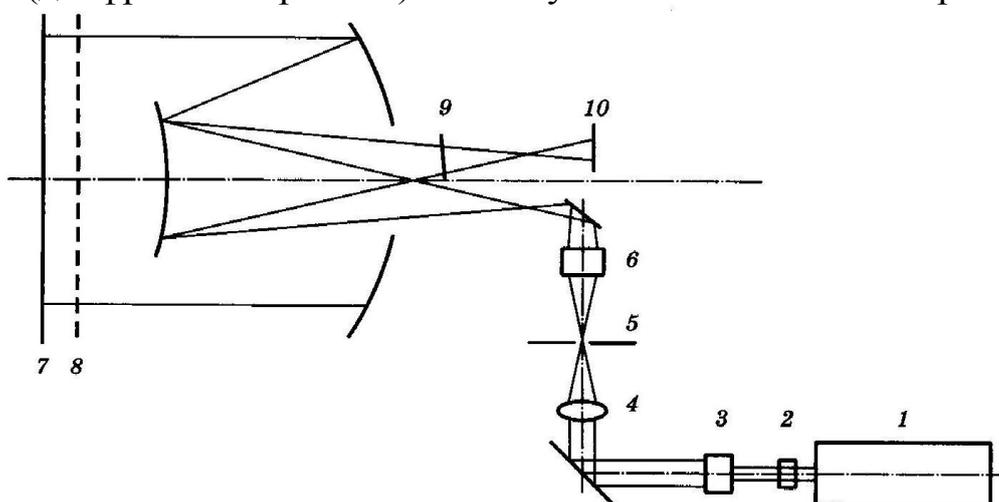


Рис. 54. Схема контроля оптического телескопа методом Гартмана с лазером

Луч гелий-неонового лазера 1 (например, типа ОКГ-11), пройдя расширительную линзу 2 (около 5 диоптрий) и затвор 3, фокусируется объективом 4 в плоскость круглой точечной диафрагмы 5, которая микрообъективом 6 проектируется в фокальную плоскость исследуемой системы. При работе в автоколлимации от контрольного

плоского зеркала 7 на зрачок системы, совпадающий с главным зеркалом системы (исследуется система астрономического телескопа), приходят параллельные световые пучки, вырезанные в волновом фронте отверстиями диафрагмы Гартмана 8. Кассета с фотопластинкой устанавливается последовательно во внефокальных положениях 9 и 10, где на поверхности фотоэмульсии формируются изображения световых пятен, определяемые, как указано выше, расположением отверстий в диафрагме и удвоенными ошибками системы, если пренебрежимо малы ошибки контрольного зеркала и юстировки.

Использование в данной схеме лазерного источника дает возможность сформировать весьма яркий точечный источник, что, в свою очередь, позволяет получить на фотоматериале освещенности, при которых для съемки гартманограмм достаточны экспозиции, по длительности не превышающие 10^{-3} с. При столь коротких выдержках «смазывание» изображений пятен гартманограммы исключается и пятна изображаются в виде дифракционных кружков с четко очерченными центральными максимумом и кольцом.

На рис. 55, а, показана микрофотометрическая структура пятна гартманограммы при длительной экспозиции, на рис. 55, б, – при использовании установки по предложенной схеме. Исследовалась оптическая система телескопа АЗТ-11 с главным зеркалом диаметром 1,25 м, изготовленного на ОАО «ЛОМО» для Абастуманской астрофизической обсерватории.

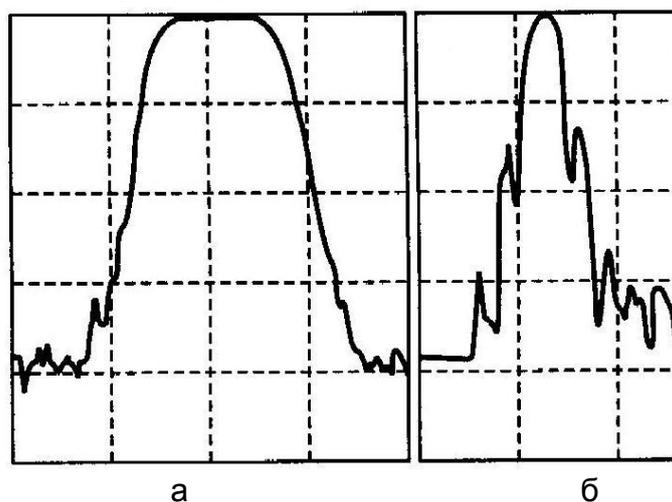


Рис. 55. Микрофотометрическая структура пятна гартманограммы: при длительной экспозиции (а); в схеме с лазером (б)

При получении гартманограмм использовались фотопластинки «Изопанхром мягкие 130 ед. ГОСТ». Время экспозиции, в первом

случае, составило 1,8 мин, во втором, при использовании предложенной схемы с лазером – 1/1000 с.

Из результатов микрофотометрирования видно, что пятно гартманогаммы, полученной предложенным способом, значительно компактнее и характеризуется более высоким краевым градиентом освещенности, из чего, как было рассмотрено выше, однозначно вытекает более высокая точность расшифровки результатов измерений. Кроме того, существенно снижается трудоемкость регистрации и измерений, облегчается юстировка измерительной схемы, улучшаются условия труда и надежность контроля.

Как показала практика, предложенный способ дает единственный путь проведения измерений по Гартману для оценки сложных астрономических систем в реальных условиях при наличии значительных вибраций в схеме контроля.

В заключение можно сделать вывод о данной совокупности работ, которая позволяет наметить некоторые основные направления повышения качества контроля оптических систем в условиях производства.

1. Внедрение новых принципов построения методов и средств контроля, открывающих возможности получения измерительных данных, недостижимых традиционными средствами и методами. Примерами могут служить метод изофотометрической фоторегистрации и интерферометр с рассеивающей пластинкой.
2. Применение современных средств приема и регистрации изображения, позволяющих фиксировать и подвергать всестороннему анализу большие объемы измерительной информации, на много превышающие возможности непосредственного человеческого восприятия. Особую, все возрастающую роль играют взаимодополняющие друг друга средства специальной фоторегистрации и прикладного телевидения.
3. Использование современных достижений в области обработки изображений и ввода графической информации в ПК для количественного анализа. Как видно из опыта повышения точности метода Гартмана и интерференционного метода, здесь имеются большие резервы снижения погрешностей измерений при одновременном уплотнении измерительной информации, значительной экономии машинного времени ПК.
4. Широкое применение ПК при обработке измерительных данных создает условия для наиболее полного их использования при технологическом контроле и аттестации оптических систем. При

этом резко возрастает производительность на операциях контроля, которые с повышением точности выпускаемой оптики требуют все большего времени и трудозатрат.

5. Широкое использование средств лазерной техники и голографии, открывающих пути развития новых методов и оптико-измерительных систем, усовершенствования традиционных систем и методов.

Что касается перспектив развития средств оптического контроля, то представляется, что будущее принадлежит информационным оптико-измерительным комплексам, которые станут мощным связующим звеном между технологическим оборудованием и управляющими ПК в автоматических системах управления технологическими процессами производства оптических систем.

16. ИНТЕРФЕРОМЕТР С РЕШЕТКОЙ РОНКИ

1. Принцип метода. Принцип действия интерферометра состоит в наложении и интерференции двух взаимно когерентных сферических волновых фронтов в режиме интерференции сдвига (рис. 56).

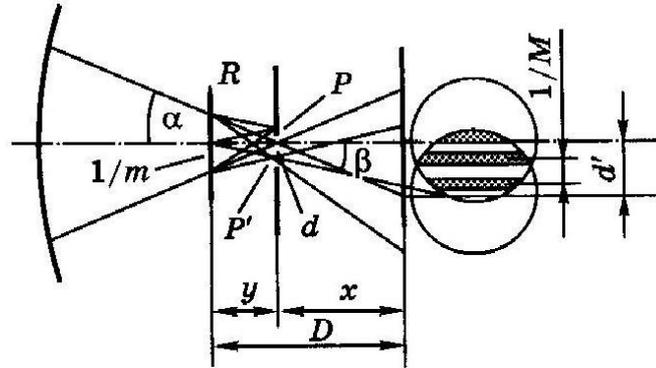


Рис. 56. Физическая модель метода Ронки: P, P' – дифрагированные волновые фронты; R – решетка Ронки; m – пространственная частота; β – угол дифракции; d – расстояние смещения соседних фронтов

Сферическая волна, сформированная исследуемой оптической системой, имеющая центр кривизны в точке P , падает на линейную решетку R , установленную нормально к оптической оси вблизи плоскости фокусировки тест-объекта. Решетка имеет пространственную частоту m и отстоит от центра кривизны сферической волны на расстояние y .

Это расстояние считается положительным, если отсчет производится в направлении, обратном направлению распространения света. При этом по обеим сторонам от точки P образуются дифракционные спектры различных порядков, имеющие для монохроматического света вид точек. Расстояние между спектрами для малых углов дифракции равно

$$d = y\beta, \quad (60)$$

где β – угол дифракции.

$$\beta = m\lambda. \quad (61)$$

Отсюда

$$d = ym\lambda. \quad (62)$$

Итак, решетка порождает ряд дифрагированных волн. Диафрагмой выделим из всей совокупности дифрагированных фронтов только два соседних фронта, повернутых на угол β и смещенных на расстояние d один относительно другого (рис. 56).

После концентрации в точках P и P' сферические фронты расходятся, образуя в области пространства, где они перекрываются с наклоном на угол β' , интерференционные полосы (рис. 57, а). (Под углом β' наблюдаются дифракционные спектры P и P' из центра зрачка Z исследуемой оптической системы, рис. 57, б).

$$\beta' = \frac{d}{x}. \quad (63)$$

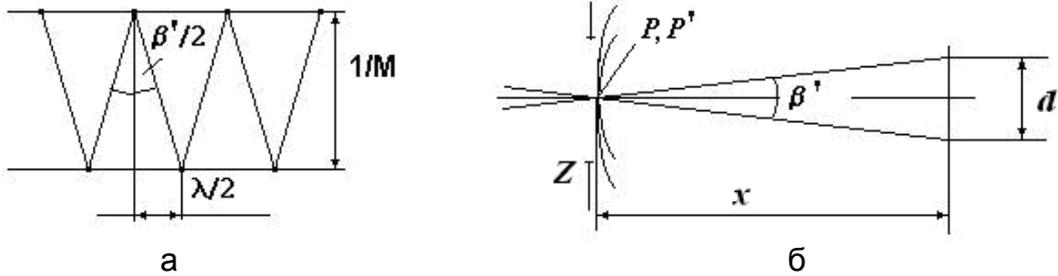


Рис. 57. Принцип действия интерферометра с решеткой Ронки

Расстояние между интерференционными полосами (шаг интерференционных полос) составляет

$$\frac{1}{M} = \frac{\lambda}{\beta'}, \quad (64)$$

$$\frac{1}{M} = \frac{\lambda x}{d}. \quad (65)$$

Имея в виду, что

$$d = ym\lambda,$$

находим, что

$$\frac{1}{M} = \frac{\lambda x}{ym\lambda},$$

$$\frac{1}{M} = \frac{x}{ym}.$$

Отсюда получаем соотношение:

$$\frac{M}{y} = \frac{m}{x}. \quad (66)$$

Физический смысл сокращения величины λ очень интересен. Он состоит в том, что работа данного интерферометра сочетает явления как интерференции, так и дифракции. При дифракции (62) увеличение длины волны λ влечет за собой увеличение расстояния d между спектрами. Это соответствует увеличению угла взаимного заклона дифрагированных фронтов под углом β' и должно было бы сопровождаться увеличением частоты интерференционных полос (64).

2. Характеристики установки для исследования объектива микроскопа.

- Источник света – лампа накаливания с набором монохроматических светофильтров ($\lambda_1=546,07$ нм, $\lambda_2=656,27$ нм).
- Образцовая поверхность – отсутствует.
- Установка собрана на базе биологического микроскопа «Биолам».
- Частота линейной решетки 12,5 лин/мм.
- Задний рабочий отрезок микрообъектива $x=140$ мм.

3. Схема установки.

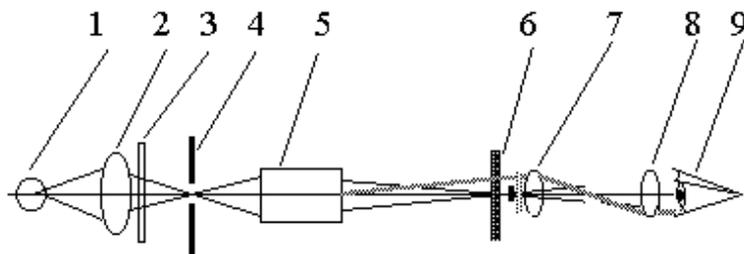


Рис. 59. Схема установки для исследования объектива микроскопа: 1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – светофильтр; 4 – точечная или щелевая диафрагма; 5 – исследуемый микрообъектив; 6 – дифракционная решетка; 7 – объектив наблюдательной системы; 8 – окуляр наблюдательной системы; 9 – глаз наблюдателя

4. Проведение исследований. Получение интерферограмм от 2-х объективов.

- Используя в микроскопе окуляр, сначала фокусируются на тест-объект (точечный препарат), помещенный на предметный столик микроскопа; находят вертикально расположенный светлый штрих, который материализует тест-объект «светящаяся линия»; подвижками столика приводят тест-объект в центр поля (рис. 60).

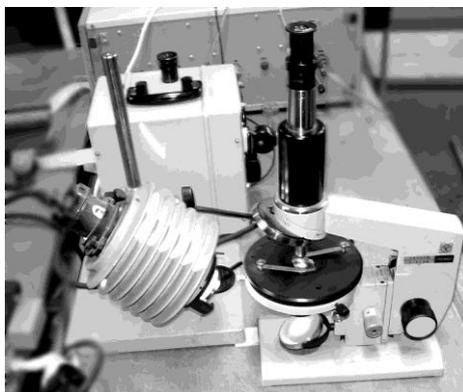


Рис. 60. Интерферометр Ронки для исследования ахроматических и хроматических aberrаций микрообъективов

- Заменяют окуляр на вспомогательный микроскоп (МИР-4) и фокусируются на выходной зрачок исследуемого микрообъектива. Фокусировкой МИР-4 находят положение, при котором в зрачке наблюдается система параллельных темных полос на светлом фоне. При недостаточном контрасте полос необходимо повернуть МИР-4 в тубусе микроскопа так, чтобы направление штрихов решетки также стало вертикальным и совпало с направлением тест-объекта «светящаяся линия» (рис. 61).

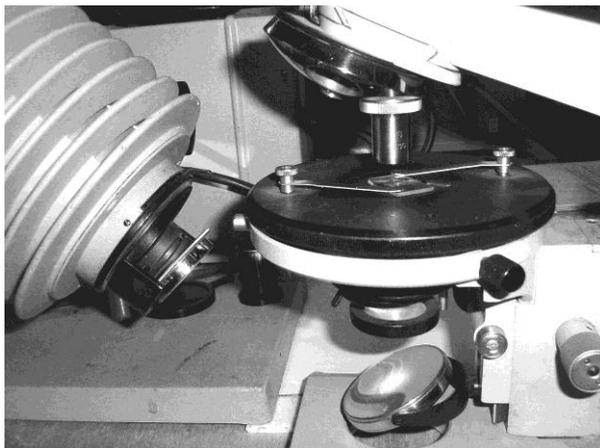


Рис. 61. Точечный препарат на предметном столике интерферометра по схеме Ронки содержит субмикронную щель, применяемую для формирования тест-объекта «светящаяся линия»

Число интерференционных полос можно менять с помощью продольных подвижек тубуса микроскопа.

- По виду интерференционной картины оценить характер aberrаций исследуемого микрообъектива (рис. 62).

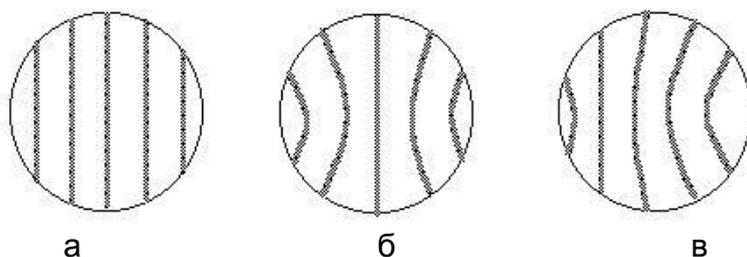


Рис. 62. Форма интерференционной картины Ронки в зависимости от характера aberrаций: отсутствие aberrаций (а); сферическая aberrация (б); кома (в)

- Сопоставить характер и количественную оценку aberrаций данного микрообъектива, наблюдаемых на интерферометре Ронки, с характером и величиной aberrаций микрообъектива, определяемых параллельно на лазерном интерферометре с дифрагированной опорной волной.

- Измерить частоту интерференционных полос по среднему сечению картины Ронки в двух длинах волн и рассчитать хроматическую разность для исследуемого микрообъектива.

Имея в виду, что из (66)

$$\frac{M}{y} = \frac{m}{x},$$

значение y составит

$$y = \frac{Mx}{m}, \quad (68)$$

где M – частота интерференционных полос в зрачке исследуемого микрообъектива (для диаметрального сечения).

Для двух исследуемых длин волн имеем

$$y_{\lambda_1} = \frac{M_{\lambda_1} x}{m}, \quad y_{\lambda_2} = \frac{M_{\lambda_2} x}{m}.$$

Хроматическая разность в интерферометре Ронки определяется как

$$\Delta y_{\lambda} = y_{\lambda_1} - y_{\lambda_2}. \quad (69)$$

5. Методика проведения измерения.

- Измерить величину $d_{\text{изм}}$ – диаметр зрачка исследуемого микрообъектива.
- Наблюдая интерферограмму (рис. 63), сосчитать число полос $n_{\text{ип}}$ (с долями), по диаметру изображения зрачка (до раздвоения справа).

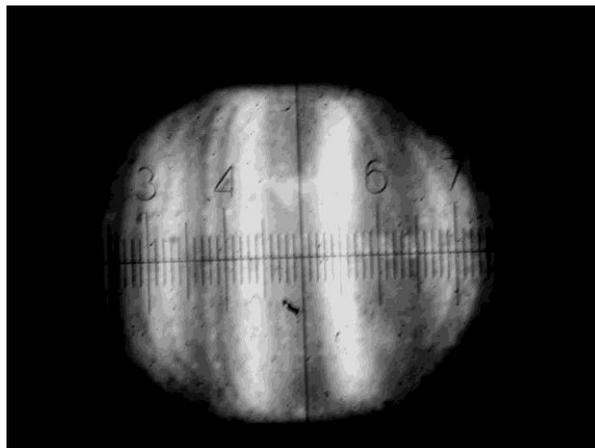


Рис. 63. Интерферограмма Ронки

- Определить частоту M полос интерферограммы как

$$M = \frac{n_{\text{ип}}}{d_{\text{изм}}}. \quad (70)$$

При определении хроматизма:

измеряется – $n_{\text{ип}\lambda_1}$, $n_{\text{ип}\lambda_2}$; определяется – M_{λ_1} , M_{λ_2} .

- Если оптимальная по контрасту интерферограмма содержит малое количество полос (3–4 полосы), то величина M надежнее определяется по следующей методике:

$$M = \frac{1}{T_p} \left(\frac{1}{\text{мм}} \right),$$

где T_p – период полос в параксиальной зоне интерферограммы;

$$T_p = (p_1 - p_2) V_c \text{ (мм)},$$

где p_1 и p_2 – координаты двух центральных полос в числе делений окулярной шкалы МИР-4; V_c – цена деления окулярной сетки, отнесенная к зрачку исследуемого микрообъектива;

$$V_c = \frac{d_{\text{изм}}}{n_{\text{ш}}} \text{ (мм)},$$

где $n_{\text{ш}}$ – число делений окулярной сетки, соответствующее диаметру изображения зрачка на сетке;

$$n_{\text{ш}} = p_{31} - p_{32},$$

где p_{31} и p_{32} – соответственно координаты правого и левого края изображения зрачка на окулярной сетке.

- Хроматическая разность определяется как

$$\Delta y_{\lambda} = \left(\frac{x}{m} \right) (M_{\lambda_1} - M_{\lambda_2}). \quad (71)$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Еськова Л.М. Обработка результатов измерений. Краткие методические указания по получению результата измерений при выполнении лабораторных работ по курсу «Оптические измерения». – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. – 15 с.
2. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 294 с.
3. Афанасьев В.А. Оптические измерения / Под ред. проф. Д.Т. Пуряева. – М.: Высшая школа, 1981. – 229 с.
4. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 2. Учебное пособие. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ). – 2003. – 60 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л. Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
6. Кирилловский В.К., Ле Зуи Туан Оптические измерения. Часть 6. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2008. – 131 с.
7. Кирилловский В.К. Применение телевидения при контроле и аттестации оптических систем. – Л.: ЛИТМО, 1983. – 56 с.
8. Бакаев М.И., Вознесенский Н.Б., Гаврилов Е.В., Жевлаков А.П., Кирилловский В.К., Орлов П.В. Анализ изображения объектива для формирования наноструктур методом компьютерной изофотометрии // Оптика и спектроскопия. – 2010. – Т. 109. – № 3. – С. 504–511.
9. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. – СПб: СПб ГИТМО (ТУ), 2000. – 167 с.
10. Вычислительная оптика. Справочник / Под ред. Русинова М.М., Грамматина А.П. и др. – Л.: Машиностроение, 1984. – 423 с.
11. Еськова Л.М., Гаврилин Д.В. Компьютерные методы контроля оптики. Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – 89 с.
12. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
13. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 4. Учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 67 с.
14. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. – М.: Машгиз, 1978. – 224 с.
15. Максutow Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
16. Духопел И.И., Федина Л.Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических

- поверхностей // ОМП. – 1973. – № 8. – С. 50–55.
17. Линник В.П. Простой интерферометр для исследования оптических систем // Труды ГОИ. – Т. X. – Вып. 95. – Л. – 1934.
 18. Порохова Т.Г. Конспект лекций по курсу «Оптические измерения», ч. 1–3. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1976 (ч. 1, 126 с.; ч. 2, 85 с.; ч. 3, 44 с.).

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	3
1.1. Этапы оптического измерения	5
1.2. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований	6
2. Оптические измерительные изображения первого и второго рода	8
2.1. Изображения первого рода. Типовые тест-объекты и функции, описывающие их изображения	8
2.1.1. Тест-объект «светящаяся точка»	10
2.1.2. Тест-объект «светящаяся линия»	11
2.1.3. Тест-объект «полуплоскость»	12
2.1.4. Тест-объект «линейная решетка».....	13
2.2. Оптические измерительные изображения второго рода	14
2.2.1. Теневая картина (тенеграмма).....	14
2.3. Гартманограмма.....	17
2.3.1. Интерферограмма	20
2.4. Прямые и косвенные способы оценки качества изображения	23
2.4.1. Анализ ФРТ	23
2.5. Анализ погрешностей метода интерферометрии.....	24
3. Методы обработки и интерпретации интерферограмм	29
3.1. Компьютерные методы	29
3.2. Основные возможности программы.....	30
3.3. Дифракционная интерферометрия.....	31
3.4. Основные правила работы с программой Zebra Master.....	33
3.4. Программа Zebra Imager	36
4. Оценка качества изображения, сформированного исследуемой системой, методами прямых исследований и измерений	37
4.1. Понятие качества изображения оптической системы	37
4.1.1. Передача изображения через оптическую систему	39
4.1.2. Критерии оценки качества оптического изображения	44
4.1.3. Задача исследования структуры пятна рассеяния.....	47
5. Исследование качества оптического изображения	49
5.1. Экспериментальное исследование структуры пятна рассеяния.....	49
5.2. Методы измерения структуры изображения светящейся точки..	50
5.3. Фотографическая фотометрия.....	51
5.4. Методика фотографической фотометрии пятна рассеяния	54

5.5. Фотоэлектрический метод измерения распределения освещенности в пятне рассеяния	57
5.6. Метод изофотометрической фоторегистрации (метод изофот)....	59
5.7. Телевизионная изофотометрия	62
5.7.1. Телевизионная изофотометрия с накоплением	63
5.8. Телевизионный изофотометр с модулированным световым потоком.....	65
5.9. Контроль оптических систем по ФРЛ.....	68
6. Об истории методов исследования аберраций оптических систем и ошибок оптических поверхностей	71
6.1. Теневой метод Фуко	71
6.2. Метод Гартмана	71
6.3. Интерферометрия	72
7. Интерферометр Физо	73
7.1. Контроль плоской поверхности	73
7.2. Контроль сферической поверхности	74
8. Оптический измерительный комплекс на базе лазерного дифракционного интерферометра	76
8.1. Требования к точности образцовых элементов для классических и традиционных интерферометров.....	76
8.2. Интерферометры с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом.....	79
9. Неравноплечий дифракционный интерферометр.....	82
10. Функции преобразования в интерферометрии	87
11. Высокоточная обработка и интерпретация сложных интерферограмм	92
12. Конструктивное решение интерферометра с дифрагированным опорным волновым фронтом	97
12.1. Унифицированный интерферометр для контроля точной астрооптики	97
12.1.1. Методика работы на интерферометре	98
12.1.2. Методика оконтуривания интерферограмм.....	99
12.1.3. Методика метрологической аттестации интерферометра ПК-881-00.000	99
13. Интерферометр с голографической рассеивающей пластинкой... 102	102
14. Снижение погрешностей расшифровки гартманограмм	106
15. Расширение возможностей метода Гартмана при использовании лазера	108
16. Интерферометр с решеткой Ронки	112
Литература.....	119



НИУ ИТМО стал победителем конкурса инновационных образовательных программ вузов России на 2007–2008 годы и успешно реализовал инновационную образовательную программу «Инновационная система подготовки специалистов нового поколения в области информационных и оптических технологий», что позволило выйти на качественно новый уровень подготовки выпускников и удовлетворять возрастающий спрос на специалистов в информационной, оптической и других высокотехнологичных отраслях науки. Реализация этой программы создала основу формирования программы дальнейшего развития вуза до 2015 года, включая внедрение современной модели образования.

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

Кафедра прикладной и компьютерной оптики была образована в 1996 году путем объединения двух старейших кафедр оптического факультета: кафедры теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики, в результате чего кафедра стала крупнейшей и ведущей в России в области прикладной оптики, оптических приборов и компьютерной оптики.

Кафедра имеет восемь учебно-исследовательских лабораторий: оптических измерений, контрольно-измерительных оптических приборов, микроскопов и медицинских оптических приборов, геодезических приборов, кинофотоприборов, компьютерных средств контроля оптики, исследования качества оптического изображения, а также лабораторию компьютерной оптики. На кафедре работают два сетевых компьютерных класса.

В учебном процессе используются научный потенциал и лабораторная база крупнейшего в России научного центра в области оптики – ВНЦ ГОИ им. С.И. Вавилова, ведущего оптического предприятия – ОАО «ЛОМО».

Достижения кафедры отмечены двумя Ленинскими премиями, пятью Государственными премиями, премией Совета Министров, премией французской Академии Наук. Кроме того, работы, выполненные на кафедре, отмечались многочисленными медалями и дипломами международных и российских выставок, медалями С.П. Королева, Ю.А. Гагарина, премиями Минвуза.

В настоящее время кафедра ведет подготовку специалистов и научную работу в следующих взаимосвязанных направлениях:

- теория и проектирование оптических систем, традиционно называемые вычислительной оптикой;
- оптические измерения и контроль оптических элементов и систем;

- оптические приборы, включая общую теорию, микроскопы и контрольно-измерительные приборы, геодезические приборы, офтальмологическую оптику;

- математические методы, алгоритмы, программы и компьютерные системы решения оптических задач, что можно коротко назвать компьютерной оптикой.

С 1965 года на кафедре оптико-механических приборов благодаря новаторским идеям и методам С.А. Родионова получает развитие новое направление в прикладной оптике – разработка математических методов, алгоритмов и программного обеспечения для решения оптических задач. Результаты фундаментальных исследований С.А. Родионова в области формирования изображения, теории дифракции и математического моделирования были положены в основу разработки пакета программ для автоматизированного проектирования оптических систем ОПАЛ, широко известного в оптической промышленности.

В настоящее время объектами исследований в области компьютерной оптики, проводимых на кафедре являются:

- методы и программы проектирования оптических систем (методы синтеза, анализа aberrаций и качества изображения, методы оптимизации, расчет допусков);

- обработка данных контроля оптических элементов и систем (интерферограммы, гартманогаммы и т.п.);

- компьютерное моделирование изображения с учетом различных факторов (частичная когерентность, поляризация, нелинейности и неизопланатизм и т.д.);

- теория и методы оптимальной компьютерной юстировки;

- моделирование процессов ближнепольной оптики.

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

- фундаментальных и широких знаниях в области предмета разработки и исследования (прикладной оптики, оптотехники, оптических приборов и систем);

- глубоких знаниях прикладной математики, включая математическое моделирование, численные методы, методы оптимизации и т.п.;

- владении современными компьютерными технологиями, особенно применяемыми в инженерной и научной деятельности.

В настоящее время кафедра прикладной и компьютерной оптики факультета оптико-информационных систем и технологий является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сервере: **aco.ifmo.ru**

**Владимир Константинович Кирилловский
Татьяна Вячеславовна Точилина**

**Методы исследования и контроля качества
оптических систем**
Учебное пособие

В авторской редакции

Дизайн

Верстка

Т.В. Точилина

Редакционно-издательский отдел Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета информационных технологий,
механики и оптики

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.09

Подписано к печати 08.10.2012

Заказ № 2544

Тираж 100 экз.

Отпечатано на ризографе