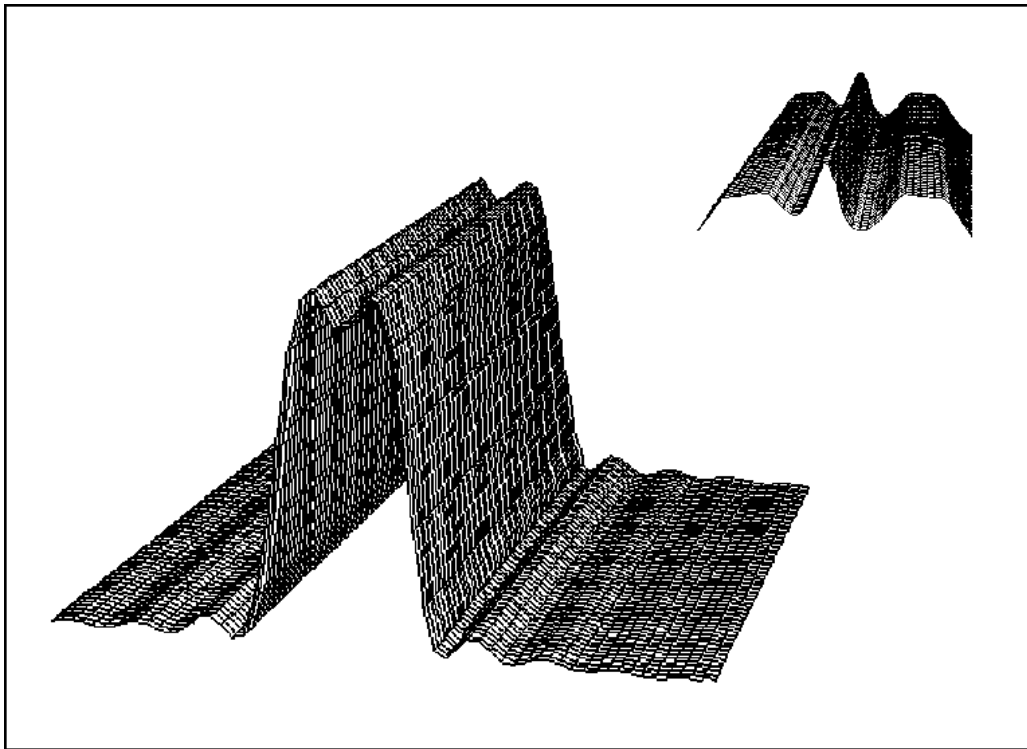


**В.К. Кирилловский  
Т.В. Точилина**

# **ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**Часть 2. Теория чувствительности  
оптических измерительных наводок.  
Роль оптического изображения**



**Санкт-Петербург  
2017**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**Университет ИТМО**

**В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина**

## **ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**Часть 2. Теория чувствительности оптических  
измерительных наводок.**

**Роль оптического изображения**

**Учебное пособие**

 **УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

**Санкт-Петербург**

**2017**

**Кирилловский В.К., Точилина Т.В. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 65 с.**

Цель пособия – ознакомить студентов с теоретическими основами и методами оптических измерений. Изучаются классические и современные методы измерения параметров и характеристик оптических систем и их элементов, их aberrаций и качества даваемого ими изображения. Пособие состоит из серии выпусков.

В части 2 рассматриваются общие вопросы, роль структуры оптического изображения. Излагаются основы теории чувствительности оптических измерительных наводок.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки для бакалавров 12.03.02 – Опотехника и для магистрантов 12.04.02 – Опотехника, а также может быть полезным для инженерно-технических работников, занимающихся проектированием оптических систем, конструированием оптических приборов и для технологов оптического производства.

Рекомендовано к печати Ученым советом факультета лазерной и световой инженерии протокол № 10 от 11 октября 2016 г. и кафедрой Прикладной и компьютерной оптики протокол № 3 от 11 октября 2016 г.



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

© Университет ИТМО, 2017  
© В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина, 2017

# 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 [1].

Из всех известных методов измерений оптические 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 [2]. Современные технологии, в том числе электронные и компьютерные, как и другие научно-технические достижения, дают возможность повышения точности и чувствительности еще в десятки раз [3]. 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.

## 2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

### 2.1. ЭТАПЫ СОЗДАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Сложный процесс создания современной оптической системы может быть разделен на два этапа:

1. проектирование;
2. изготовление.

На первом этапе производится расчет параметров системы. Качество изображения, которое она может обеспечить, оценивается также путем расчета.

На втором этапе, при изготовлении, стремятся получить реальную систему с параметрами, насколько возможно близкими к расчетным. Полученные параметры и качество изображения, даваемого изготовленной системой, оцениваются в процессе измерительного эксперимента средствами оптических измерений.

Пусть предметом изготовления является фотографический объектив (рис. 1). Рассмотрим его элементы, параметры, требующие измерения и контроля, и примеры необходимых средств измерений (табл. 1).

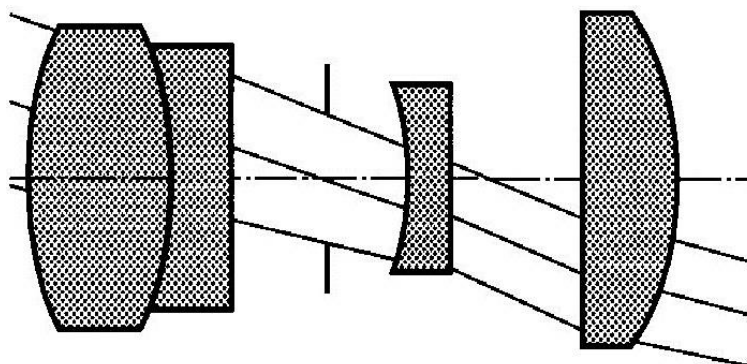


Рис. 1. Схема фотообъектива

Таблица 1. Примеры, элементы и параметры средств измерений

Оптический элемент	Измеряемый параметр	Измерительный прибор
Оптическое стекло	Показатель преломления и дисперсия	Рефрактометр
Оптическое стекло	Неоднородность	Установка для измерения неоднородности
Оптическое стекло	Свильность	Установка для измерения свильности

Оптический элемент	Измеряемый параметр	Измерительный прибор
Линза	Радиусы кривизны оптических поверхностей	Кольцевой сферометр, автоколлимационный микроскоп или установка по методу колец Ньютона
Линза	Толщина	Толщиномер, контактный длинномер или оптический длинномер
Объектив	Воздушные промежутки	Установка для измерения воздушных промежутков
Объектив	Центрировка	Центрировочный прибор
Объектив	Фокусное расстояние	Оптическая скамья
Объектив	Размеры зрачков	Оптическая скамья
Объектив	Рабочий отрезок	Оптическая скамья
Объектив	Виньетирование	Оптическая скамья
Объектив	Равномерность освещенности поля изображения	Установка измерения равномерности освещенности поля
Объектив	Аберрации	Оптическая скамья или интерферометр
Объектив	Качество изображения	Оптическая скамья

## 2.2. ЭТАПЫ ОПТИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ

В процессе оптического измерения обобщенно можно указать следующие основные этапы (рис. 2):

1. создание *оптического изображения*, связанного с измеряемыми параметрами *объекта* (назовем такое изображение «*оптическим 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 [4];

4. анализ *погрешностей* измерений с целью определения точности полученных результатов [5].

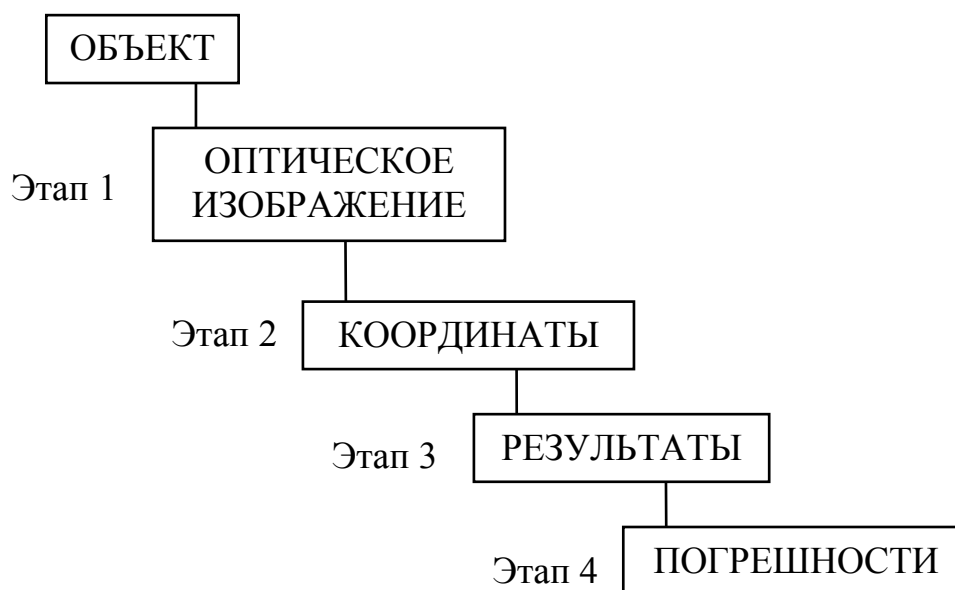


Рис. 2. Схема этапов оптического измерения

В качестве примера рассмотрим одну из простейших оптических измерительных схем. Длина элемента малого объекта измеряется при помощи визирного измерительного микроскопа (рис. 3). Визирный измерительный микроскоп служит для совмещения визирной сетки, расположенной в фокальной плоскости его окуляра, с заданными точками изображения измеряемого объекта.

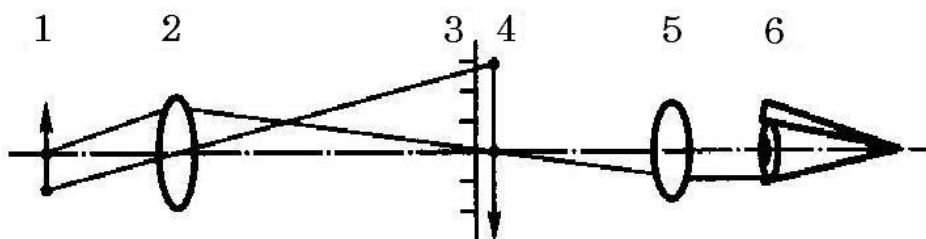


Рис. 3. Визирный измерительный микроскоп: 1 – объект; 2 – объектив микроскопа; 3 – измерительная шкала, совмещенная с плоскостью изображения объекта; 4 – изображение объекта; 5 – окуляр; 6 – глаз оператора измерений

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

В схеме на рис. 3 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.

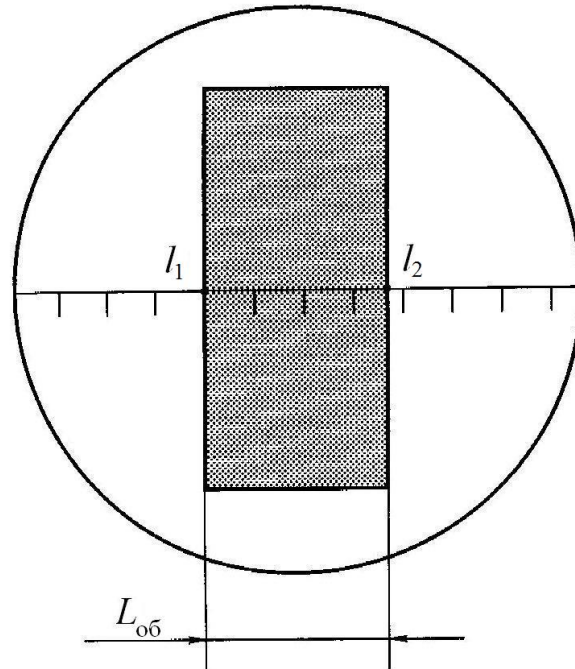


Рис. 4. Изображение в поле зрения измерительного микроскопа

Итак, пользуясь измерительной шкалой (окуляр-микрометром), совмещенной с изображением объекта, считывается протяженность  $L$  между интересующими точками объекта (например,  $l_1$  и  $l_2$ , рис. 4). Паспортной характеристикой микроскопа служит поперечное увеличение  $V$  в получаемом изображении объекта.

В данном примере можно проследить все указанные в обобщенной схеме этапы оптического измерения:

этап 1: объектив микроскопа 2 строит увеличенное *изображение* 4 объекта 1;

этап 2: *координаты* точек изображения, связанные с требуемыми точками объекта, измеряются при помощи окулярной шкалы 3;

этап 3: *результаты* измерения получают обработкой измерительных отсчетов для определения протяженности объекта  $L_{об}$  с учетом паспортной характеристики (увеличения  $V$ ) объектива микроскопа:

$$L_{об} = (l_2 - l_1) / V;$$

этап 4: *погрешности* определяют обработкой серии измерительных отсчетов (данных) с применением аппарата математической статистики.



### 2.3. 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 оптическим измерительным изображением), например, в виде интерференционных полос, теневой картины, совокупности пятен, составляющих диаграмму Гартмана, дифракционных изображений светящейся точки или линии и т.д.

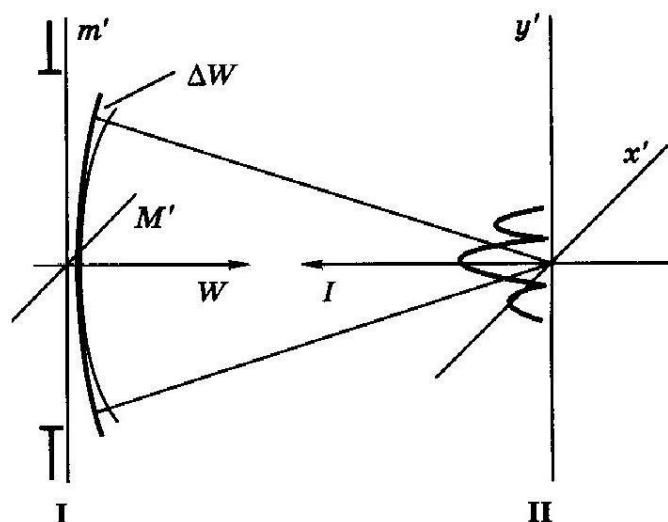


Рис. 5. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований:  $M'$  и  $m'$  – координаты на выходном исследуемом зрачке оптического элемента в схеме;  $x'$  и  $y'$  – координаты в плоскости изображения тест-объекта;  $W$  – координата формы исследуемого волнового фронта;  $I$  – относительная освещенность в изображении тест-объекта;  $\Delta W$  – координата деформаций волнового фронта

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 (рис. 5). При изменении формы сферического волнового фронта изображение может удаляться, приближаться, поперечно перемещаться. Аберрации и ошибки

изготовления оптической системы вносят искажения  $\Delta W$  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.

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  $\Delta W$  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*.

Прямые способы оценки качества изображения состоят в наблюдении изображения тест-объекта, сформированного при помощи исследуемой системы в зоне II (зоне изображения), и измерении фотометрической структуры этого изображения, т.е. определении функции рассеяния (например, функции рассеяния точки (ФРТ) или функции рассеяния линии (ФРЛ)). Функции рассеяния и связанные с ними оптическая передаточная функция, функция передачи модуляции (ФПМ) и функция концентрации энергии (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), 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 модуляционная передаточная функция (МПФ), 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 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.

### 3. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА

#### 3.1. 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 (рис. 6) представлены наиболее часто применяемые тест-объекты, изображения тест-объектов и двумерные функции, описывающие распределение интенсивности как в тест-объекте, так и в его изображении.

Изображение, построенное оптическим прибором, может быть дифракционным, т.е. иметь отчетливо различимые элементы в виде дифракционных осцилляций (например, рис. 6 – ФРТ), или быть недифракционным, когда дифракционные осцилляции не наблюдаются (например, рис. 6 – ФРЛ).

*Дифракционной структурой* характеризуется изображение, построенное высококачественной оптической системой, имеющей малые aberrации.

*Недифракционной структурой* характеризуется изображение оптической системой, 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 ограничены (обусловлены) 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.

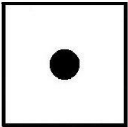



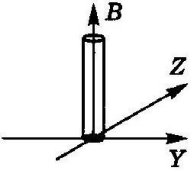
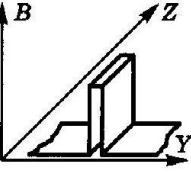
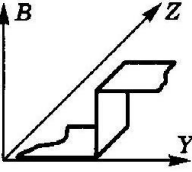
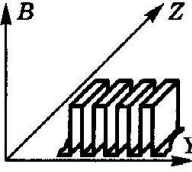
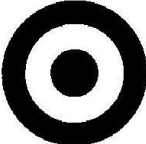


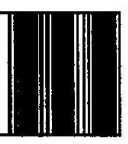
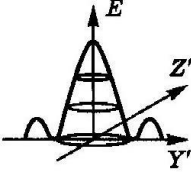
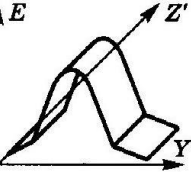
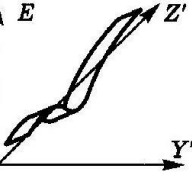
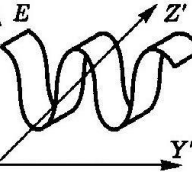
	Светящаяся точка	Светящаяся линия	Полуплоскость	Линейная решетка
Тест-объект				
Функция распределения яркости в объекте				
Изображение тест-объекта				
Функция распределения интенсивности в изображении				
	Функция рассеяния точки (ФРТ)	Функция рассеяния линии (ФРЛ)	Пограничная функция	Распределение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

Рис. 6. Типовые тест-объекты и характеристики качества изображения

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 [6].

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 абберационно-ограниченным качеством изображения.* К этому классу относят оптические системы, структура и качество изображения для которых ограничены (обусловлены) в основном влиянием аббераций; эти абберации либо не были устранены на этапе расчета оптической системы («расчетные» абберации), либо они обусловлены ошибками изготовления оптической системы и ее элементов.

Сюда относятся, например, оптические системы фото-, кино- и видеообъективов. Волновые абберации 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.

### **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» есть *пятно рассеяния* или *дифракционный кружок* (рис. 7).

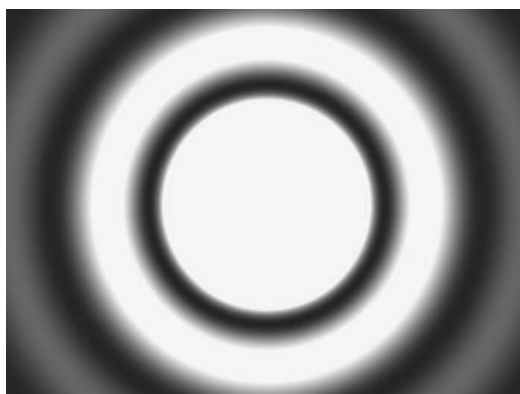


Рис. 7. Дифракционный кружок

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

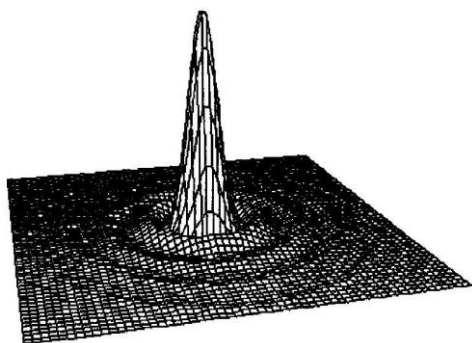


Рис. 8. Функция рассеяния точки

Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «светящаяся точка», есть *двумерная функция*, носящая название *функция рассеяния точки* или *ФРТ* (рис. 8). 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, 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 флуктуации 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, концентрация энергии 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.

### **Тест-объект «светящаяся линия»**

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

Изображение тест-объекта «светящаяся линия» есть *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», есть двумерная (квазиодномерная) функция, носящая название *функция рассеяния линии* или *ФРЛ*.

*Квазиодномерной* называют двумерную функцию, которая сохраняет свою форму при перемещении графика функции по одной из координат. Это свойство позволяет в большинстве случаев изображать квазиодномерную функцию в виде одномерной, как функцию только одной переменной. В дальнейших выпусках данного пособия, посвященных методам измерения характеристик качества изображения, мы рассмотрим методы, использующие фактическую двумерность ФРЛ.

Общий вид графика функции рассеяния линии показан на рис. 9. Видно, что данная функция квазиодномерна.

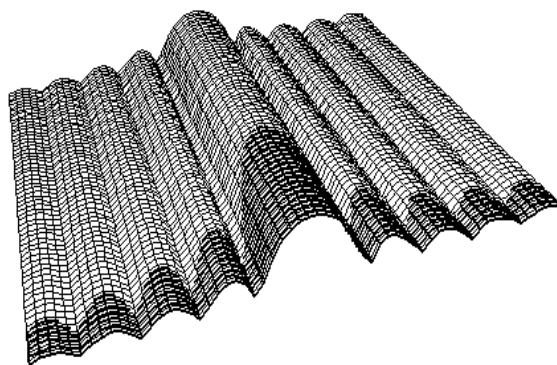


Рис. 9. Функция рассеяния линии

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

### **Тест-объект «полуплоскость»**

Этот тест-объект материализуется в виде прямолинейного края непрозрачной заслонки (лезвия) на освещенном фоне. При необходимости 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. 10), есть квазиодномерная *функция скачка*.

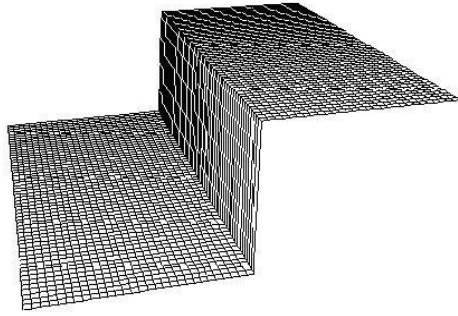


Рис. 10. Распределение яркости в тест-объекте типа «полуплоскость»

Изображение тест-объекта «полуплоскость» есть пятно рассеяния в форме более или менее размытого изображения края. Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «полуплоскость» есть двумерная (квазиодномерная) *функция края* или «краевая (переходная) функция» (рис. 11); ее график называется «*пограничная кривая*».

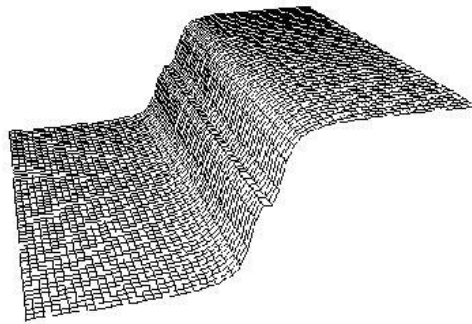


Рис. 11. Функция края

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.

### **Тест-объект «линейная решетка»**

*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», есть *квазиодномерная функция* (рис. 12). 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.

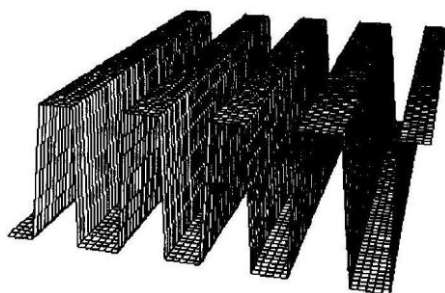


Рис. 12. Распределение интенсивности в тест-объекте «линейная решетка»

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

Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «линейная решетка», есть *двумерная* (квазиодномерная) *функция* (рис. 13). Ее интересная особенность состоит в том, что на средних и высоких пространственных частотах структура изображения такой решетки характеризуется распределением интенсивности, близким к синусоидальному.

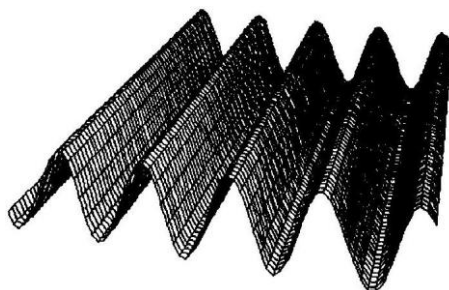


Рис. 13. Распределение интенсивности в изображении тест-объекта «линейной решетки»

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, построенном системой (рис. 13).

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 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.

### **3.2. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ВТОРОГО РОДА**

#### **Теневая картина (тенеграмма)**

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

*Метод «ножа Фуко»* и вообще все *теневые методы* доказали свою исключительную полезность для контроля оптических поверхностей. Аберрации, дифракция света и ошибки изготовления оптических поверхностей вызывают отклонение лучей от теоретических траекторий и искажения 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.

Итак, для получения теневой картины деформаций исследуемого волнового фронта, соответствующих аберрациям 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. 14, а). Теневая картина может наблюдаться в плоскости экрана, расположенной за пятном рассеяния (рис. 14, 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. 14, б) 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 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».

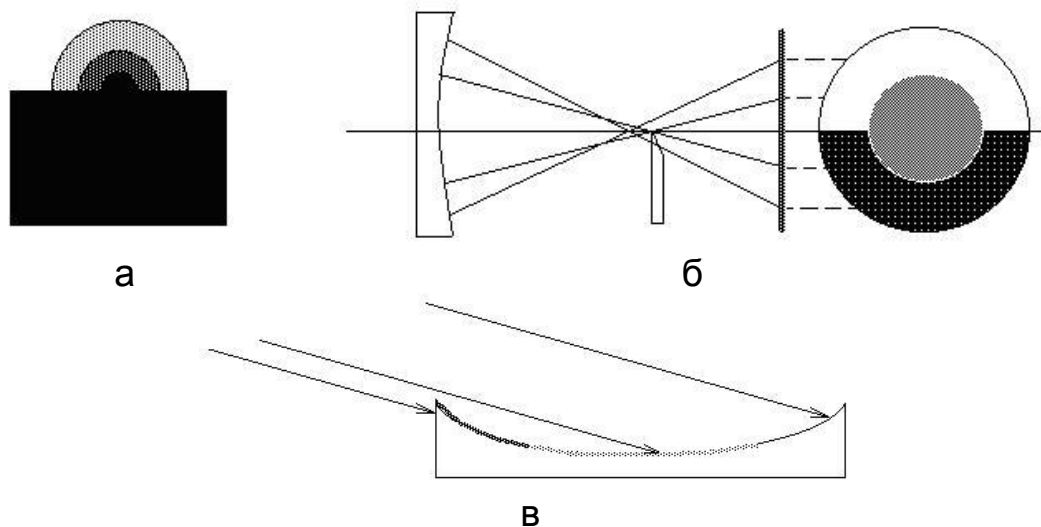


Рис. 14. Принципиальная схема теневого метода Фуко

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. 14, в). При таком допущении качественная интерпретация теневой картины становится несложной.

Теневой метод применяется для контроля деформаций волнового фронта, вызванных ошибками и аберрациями 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 аберраций системы. В процессе контроля непрозрачным экраном, помещенным в плоскость теоретического схождения лучей, пересекают часть отраженного или дифрагированного света, 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.

К недостаткам можно отнести непреодоленные 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 аберраций 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.

## 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, определяя, в какой плоскости вдоль оптической оси пересекаются пучки лучей от некоторой области волнового фронта и каково различие в положении этой плоскости и 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 в принципе может иметь любую форму, так как интерес представляют лишь отклонения от него.

В 1904 году Иоганнес Франц Гартман (1865–1936 г.г.) опубликовал предложенный им метод, пригодный для точного количественного измерения различных аберраций, 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 аберраций 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. 15, то крайние пятна на 1-й фотопластинке сгруппируются на краю, а на 2-й они сдвинутся к центру. Если измерить расстояние между пятнами, и если известно расстояние до пластин, из подобия треугольников можно определить точки схождения лучей и пересечения ими оптической оси.

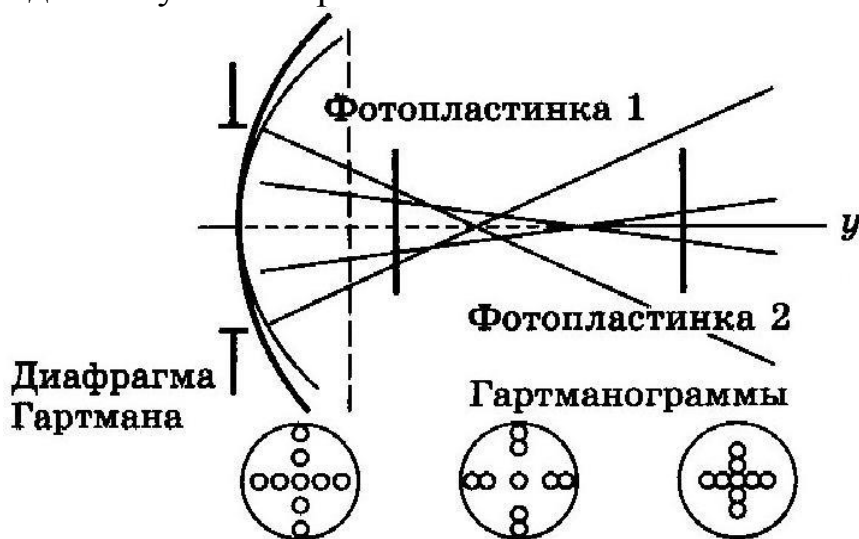


Рис. 15. Метод Гартмана

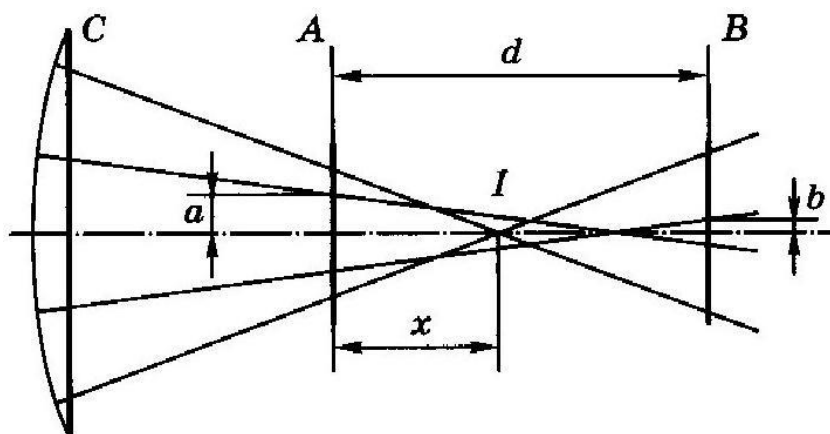


Рис. 16. Схема метода Гартмана:  $d$  – расстояние между предфокальным и зафокальным положениями фотопластинок;  $a$  – расстояние между следом оптической оси и следом данного луча (пятном) на предфокальной фотопластинке А;  $b$  – соответствующее расстояние на зафокальной фотопластинке



Итак, диафрагма Гартмана (рис. 16) 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 расстояние от  $A$  до точки  $I$  пересечения данного луча с осью может быть найдено из выражения:

$$x = \frac{a}{a+b} d.$$

Достоинства метода:

1. возможность количественного определения (измерения) аберраций 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 гартманограммы с точностью порядка 1 мкм; для этого применяется дорогостоящая двумерная измерительная машина (например, «Ascorecord»);
3. 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;
4. вибросочувствительность: если элементы схемы вибрируют, то будет вибрировать и пятно рассеяния, а следовательно и все пучки лучей синхронно, что приводит к дополнительной нерезкости пятен гартманограммы и снижает точность измерений. Если имеются флуктуации воздушного тракта, а значит, и волнового фронта, то пятна будут вибрировать случайным образом, что также снижается точность измерений.

## 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  $\lambda/n$ , где  $\lambda$  – длина световой волны источника, а  $n$  – число проходов лучей через систему.

Начало XX в. ознаменовалось развитием методов бесконтактной интерферометрии. В 1918 году Фрэнк Твайман (1876–1959 г.г.) [7] 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, возникает система полос, форма каждой из которых соответствует профилю ошибок волнового фронта в данном сечении зрачка.

Таким образом, интерферометрия соединяет достоинство наглядности теневого метода и возможности количественных оценок и измерения деформаций волнового фронта, присущие методу Гартмана.

Твайман предложил на основании сведений о форме волнового фронта рассчитывать интенсивность светового поля, заложив таким образом основу косвенного метода экспериментального исследования качества оптической системы. Схема интерферометра Тваймана показана на рис. 17.

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.

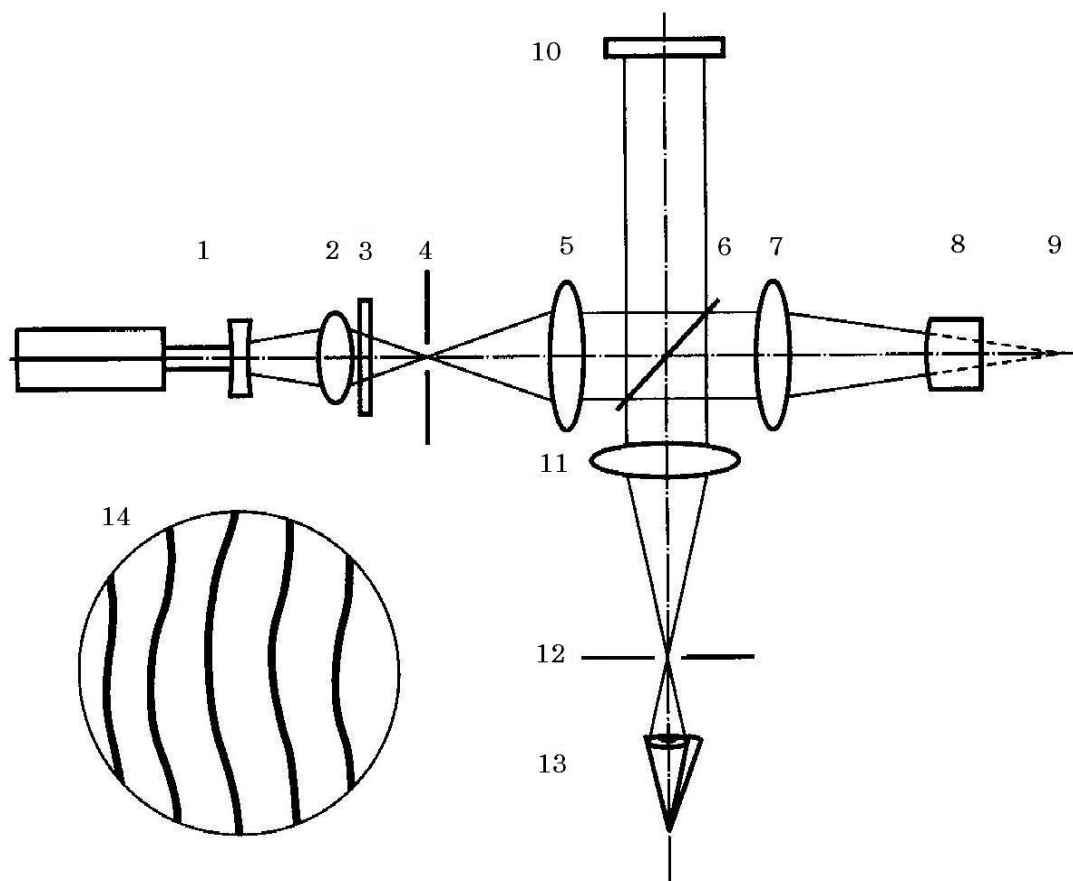


Рис. 17. Интерферометр Тваймана для исследования объектива:  
 1 – лазер; 2 – осветительная система; 3 – светофильтр;  
 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив;  
 6 – светоделитель; 7 – исследуемый объектив;  
 8 – автоколлимационное сферическое зеркало; 9 – центр кривизны автоколлимационного сферического зеркала; 10 – образцовое плоское зеркало; 11 – объектив наблюдательной системы;  
 12 – наблюдательная диафрагма; 13 – приемник изображения (например, глаз); 14 – вид интерференционной картины

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 [8].

Практика показала, что такой прием позволяет устранить вредное влияние вибрации и существенно повысить точность интерферометрии.

## 4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ

### 4.1. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ НАВОДКИ

*Основное свойство оптического прибора* – построение оптического изображения.

В процессе измерительных наводок при помощи измерительных зрительных труб, микроскопов, интерферометров (или других оптических измерительных приборов) для выполнения измерений используются оптические измерительные изображения.

Например, в геодезических измерениях изображение шкалы нивелирной рейки совмещается в фокальной плоскости объектива нивелира со штрихом окулярной сетки.

Мы видим, что происходит совмещение оптического измерительного изображения, *которым* наводятся (изображения измерительной марки) с оптическим изображением объекта, *на которое* выполняется измерительная наводка. Итак, измерительное наведение (наводка) есть процесс совмещения элементов двух оптических измерительных изображений – изображения значащего элемента объекта с отсчетной точкой (или линией) в изображении измерительной марки. Физически такое совмещение осуществляется на чувствительной площадке приемника изображения (при визуальных измерительных наводках – на сетчатке глаза).

В качестве отсчетной марки обычно выступает перекрестие, штрих или биссектор сетки окуляр-микрометра.

*Поперечная наводка* – совмещение двух оптических измерительных изображений при их взаимном перемещении поперек оптической оси.

*Продольная наводка* – совмещение двух оптических измерительных изображений вдоль оптической оси.

Измерения всегда дают лишь приближенные значения измеряемой величины. Степень приближения результата измерения к истинному значению, т.е. точность измерения, характеризуется найденными значениями погрешности измерения при заданной вероятности.

Рассмотрим идеализированный случай. Если бы процесс измерительной наводки был выполнен без погрешности, мы имели бы

нулевые смещения оптического измерительного изображения объекта относительно оптического измерительного изображения марки.

Однако в силу действия дифракционных явлений в процессе формирования любого оптического изображения существует явление фундаментальной нерезкости оптического изображения (даже при использовании оптической системы, в которой практически отсутствуют аберрации).

В результате действия этой фундаментальной нерезкости процесс оптической измерительной наводки всегда сопровождается погрешностью наведения при определении пространственной координаты изображения.

Как показали исследования, такая погрешность связана с градиентом перепада интенсивности и другими структурными особенностями оптического измерительного изображения.

#### **4.2. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ И ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОПЕРЕЧНЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ НАВОДОК ОТСЧЕТНЫХ ТРУБ И МИКРОСКОПОВ**

В приборах, использующих оптическое измерительное изображение первого рода, одним из основных узлов обычно является зрительная труба или микроскоп. В процессе измерения перекрестие прибора совмещается с изображением объекта (или тест-объекта) в поперечном направлении путем поперечных смещений или поворотов (поперечные измерительные наводки).

В другом случае требуется установить перекрестие прибора и изображение объекта в одной плоскости, т.е. сфокусировать оба изображения на одновременную резкость. Так выполняется продольная измерительная наводка. Присутствие при продольных наводках перекрестия (сетки) в фокальной плоскости окуляра в измерительных приборах необходимо также для фиксации плоскости аккомодации глаза, чтобы аккомодация не вносила неопределенности в отсчеты.

*Оптическая измерительная наводка* – это процесс взаимного позиционирования, т.е. совмещения элементов двух изображений:

1. того, на которое наводятся (изображение измеряемого объекта);
2. того, которым наводятся (изображение измерительной марки).

*Оптическое измерительное изображение объекта* строится объективом оптического измерительного прибора (зрительной трубы или микроскопа).

*Оптическое измерительное изображение марки* строится окуляром оптического измерительного прибора.

Например, при измерительной наводке визирным микроскопом на край изображения предмета мы имеем:

1. изображение края;
2. изображение перекрестия окулярной сетки, наблюдаемое в окуляр.

Физически оптическое измерительное изображение объекта совмещается в процессе измерительной наводки с элементами марки, что и отображается на чувствительной площадке приемника изображения (например, на сетчатке глаза измерителя) через оптические системы окуляра и приемника изображения.

Часто в оптических измерительных наводках участвует изображение шкалы. Напомним, что физическая величина выражается с использованием шкалы соотношений, которая имеет ряд отметок (делений, количественно определяющих свойства или состояния измеряемых объектов), а также нулевую отметку.

Большинство оптических измерений сводятся к геометрическим измерениям, т.е. к определению длин и углов. Даже в оптико-электрических измерениях многие отсчетные устройства построены на принципе определения длин и углов по приборным шкалам.

*Структура оптического изображения* определяет качество оптического измерения и его важнейшие метрологические характеристики – чувствительность и точность.

Структура того оптического изображения, на которое выполняются оптические измерительные наводки (обычно это изображение измеряемого объекта), в значительной степени зависит от вида объекта, дифракционных явлений в процессе образования оптического изображения и aberrаций оптической системы.

С другой стороны, оптическое изображение марки отображается в условиях, которые способствуют высокому качеству этого изображения. К таким условиям можно отнести умеренное увеличение оптической системы окуляра и его небольшой полевой угол, откуда и умеренные требования к оптической конструкции окуляра.

Поэтому изображение марки для приемника (в том числе и для глаза) обычно является совершенно резким, т.е. характеризуется

максимальным градиентом перепада освещенности на краю штриха. При этом пространственная протяженность пограничной зоны ниже порога разрешения приемника изображения, что и можно считать состоянием резкости.

Заметим, что с развитием современных технологий создаются возможности преобразования первичного, т.е. созданного прибором оптического изображения в заданном направлении с применением приемников – анализаторов изображения, в том числе и компьютерных. В последующих частях данного пособия будет показано применение средств такого рода для повышения точности, диапазона измерений и чувствительности оптического контроля сразу в десятки раз.

Оптические системы, применяемые в оптических измерительных приборах, имеют качество изображения, обусловленное в основном дифракцией. Поэтому классическая теория чувствительности и точности оптических измерительных наводок основана на анализе дифракционного распределения световой энергии в зоне изображения тест-объекта оптической системой, aberrациями которой можно пренебречь и которую в этом случае считают идеальной оптической системой.

*Чувствительность измерительного прибора*, оснащенного идеальной (безабберационной) оптической системой, в принципе обусловлена (ограничивается) геометрическими параметрами дифракционного изображения объекта. Зная, от чего зависит размер такого изображения, можно сконструировать или правильно выбрать для выполнения измерений прибор, обладающий заданной точностью [9].

Распределение интенсивности оптического излучения, обусловленное влиянием дифракции, характеризуется плавными функциональными зависимостями (например, рис. 8 – ФРТ, рис. 9 – ФРЛ, или рис. 12 – структура изображения линейной решетки). Поскольку названные функции являются элементарными при описании тонкой структуры изображения (на пределе разрешения элементов структуры), то становится ясно, что при таком рассмотрении каждое оптическое изображение, построенное прибором, является фундаментально нерезким.

В этом смысле *задача оптической измерительной наводки* есть задача определения координат элементов нерезкого изображения, т.е. такого изображения, структура которого описывается плавными функциями распределения интенсивности.

В результате чувствительность оптического измерительного прибора зависит от следующих факторов:

- свойств оптического излучения, распространяющегося в приборе;
- параметров прибора;
- способа регистрации световых явлений (и оптических изображений), формируемых оптическим измерительным прибором.

Источники ограничения порога чувствительности реального оптического измерительного прибора будут в основном следующими:

- дифракция на зрачке;
- аберрации;
- ошибки изготовления оптической системы.

Итак, величины погрешностей оптических измерительных наводок (поперечных и продольных) зависят на практике от ряда факторов, участвующих в процессе оптического измерения, в числе которых:

- структура и характеристики оптических измерительных изображений – изображения объекта и изображения анализатора (сетки, шкалы);
- порог контрастной чувствительности приемника оптического измерительного изображения (в классических оптических измерениях это обычно глаз);
- способы измерительных наводок.

Для определения реальных значений чувствительности и погрешностей оптических измерительных наводок требуются исследования для каждого конкретного случая оптических измерений, включая исследования прибора, метода и условий проведения измерений.

Однако современная теория оптических измерений дает математический аппарат, позволяющий определить (предсказать) предельно малые значения погрешностей – пороги чувствительности оптических измерительных наводок, теоретически достижимые для оптических измерительных приборов, оснащенных идеальными (безабберационными) оптическими системами. Поскольку аберрации оптических систем измерительных оптических приборов малы, то теория чувствительности оптических измерительных наводок строится на базе рассмотрения дифракционной структуры изображения, построенного такой идеальной (безабберационной) оптической системой.



Рассмотрим дифракционное распределение энергии в зоне пространства вблизи геометрического фокуса, где создается изображение точки (рис. 18).

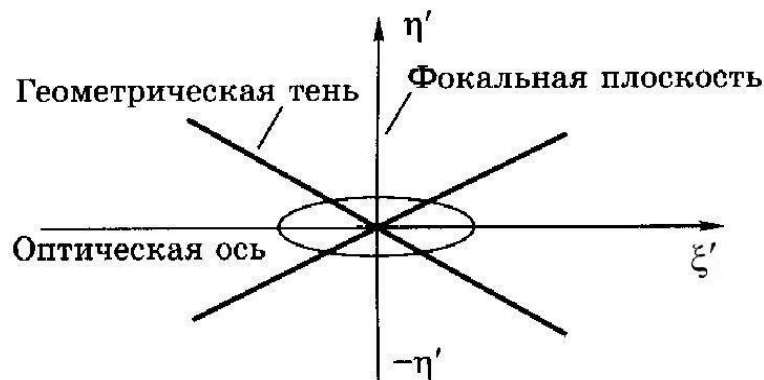


Рис. 18. Дифракционное распределение энергии в зоне пространства вблизи геометрического фокуса, где создается изображение точки

### 4.3. СВЕТЯЩАЯСЯ ТОЧКА

Распределение интенсивности в изображении светящейся точки, найденное исходя из дифракции Фраунгофера на круглом зрачке, показывает, что энергия излучения испытывает дифракционное рассеяние по всему пространству изображений, в том числе и на всей фокальной плоскости. Однако большая часть энергии (около 80%) концентрируется вблизи геометрического изображения точки.

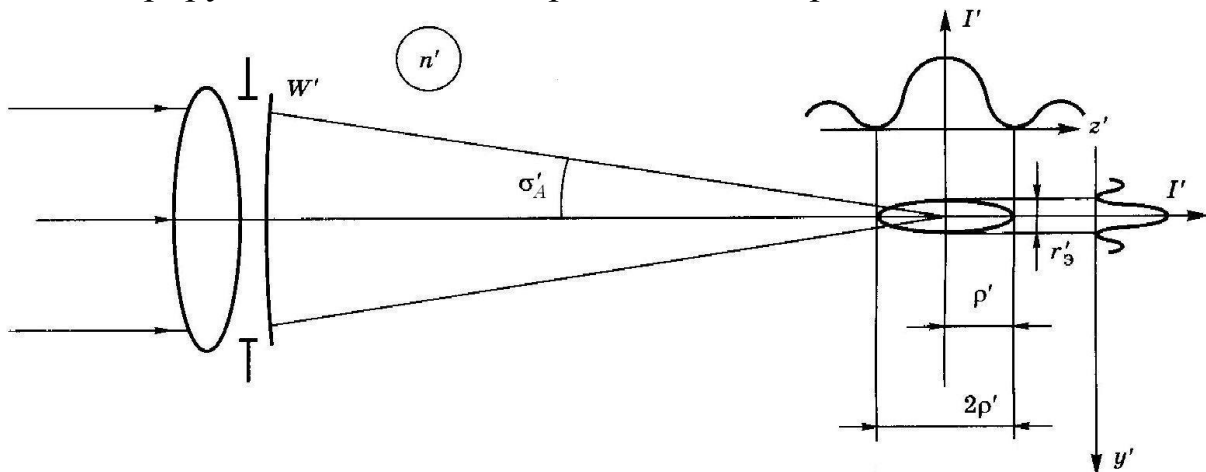


Рис. 19. Размеры дифракционного тела

Эту энергию мысленно можно заключить в объеме дифракционного тела (по форме подобного эллипсоиду вращения, рис. 19, 20), размеры  $r'_z$  и  $\rho'$  (рис. 19) которого зависят от длины световой волны  $\lambda$  и апертуры оптической системы, определяемой как

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

где  $\sigma'_A$  – задний апертурный угол объектива, строящего изображение.

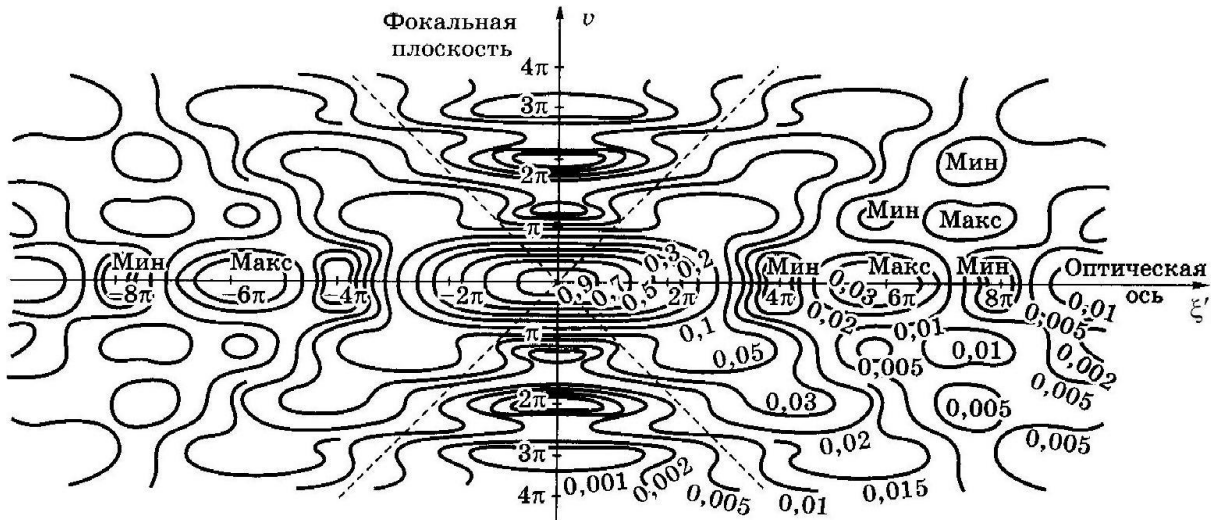


Рис. 20. Структура распределения интенсивности вблизи геометрического центра кривизны сходящейся сферической волновой поверхности

На рис. 20 структура распределения интенсивности вблизи геометрического центра кривизны сходящейся сферической волновой поверхности показана как система изофот. Границы геометрической тени сфокусированного пучка лучей показаны штриховыми линиями.

Построение на рис. 20 выполнено в системе нормированных (канонических) координат  $\eta'$  и  $\xi'$ . Эти координаты представляют собой переменные  $y'$  и  $z'$ , приведенные к безразмерной форме через соотношения

$$\eta' = \frac{A'y'}{\lambda}, \quad (1)$$

$$\xi' = \frac{A'^2 z'}{\lambda n'}, \quad (2)$$

где  $n'$  – показатель преломления среды в пространстве изображений;  $\lambda$  – длина волны излучения;  $z'$  – величина продольного отрезка в пространстве изображений.

В формулах (1) и (2)  $\sin A'$  заменен на  $A'$ , так как оптические системы измерительных приборов, как правило, имеют небольшую выходную апертуру, а для углов менее  $30^\circ$  величина угла  $A'$  отличается от  $\sin A'$  не более чем на 5%.

Применение канонических координат упрощает расчеты, так как при переходе через оптические поверхности изображающих систем значения  $\eta'$  и  $\xi'$  не изменяются, т.е.  $\eta' = \eta$  и  $\xi' = \xi$  [10].

На рис. 20 показано, что интенсивность дифракционного изображения распределена симметрично относительно плоскости  $\xi' = 0$ , а также относительно оптической оси.

Кроме центрального максимума, дифракционное изображение точки содержит еще дифракционные минимумы и максимумы последующих порядков, однако интенсивность в них менее 2% от максимальной.

На рис. 20 приведено меридиональное сечение такого изображения. Так как качество изображения в идеальной системе определяется в основном концентрацией энергии в пределах центрального максимума дифракционного распределения, то здесь будут рассматриваться только размеры центрального максимума.

Диаметром центрального максимума дифракционного кружка (кружка Эри) принято считать диаметр первого дифракционного минимума (первого темного кольца в зоне, где интенсивность равняется нулю) в изображении точки, построенном идеальной оптической системой.

Распределение интенсивности в плоскости изображения, расположенной по нормали к оптической оси (при  $\xi' = 0$ , рис. 21) определяется ФРТ:

$$h(\eta') = \left[ \frac{2J_1(2\pi\eta')}{2\pi\eta'} \right]^2 = \text{Bes sin c}^2[2\pi\eta'], \quad (3)$$

где  $h(\eta')$  – нормированная ФРТ;  $J_1$  – функция Бесселя первого рода, первого порядка;  $\text{Bes sin c}^2[2\pi\eta']$  – мнемоническое обозначение функции.

Нормировка означает, что полные световые потоки геометрического изображения и реального (с учетом дифракции) равны:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \delta(\eta_x, \eta_y) d\eta_x d\eta_y = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(\eta'_x, \eta'_y) d\eta'_x d\eta'_y = 1,$$

где  $\eta_x$  и  $\eta_y$  – приведенные координаты предмета на поверхности изображения.

Используя выражение (3), можно найти радиус  $r_3$  диска Эри. Из (1) находим

$$y' = \frac{\eta' \lambda}{A'}.$$

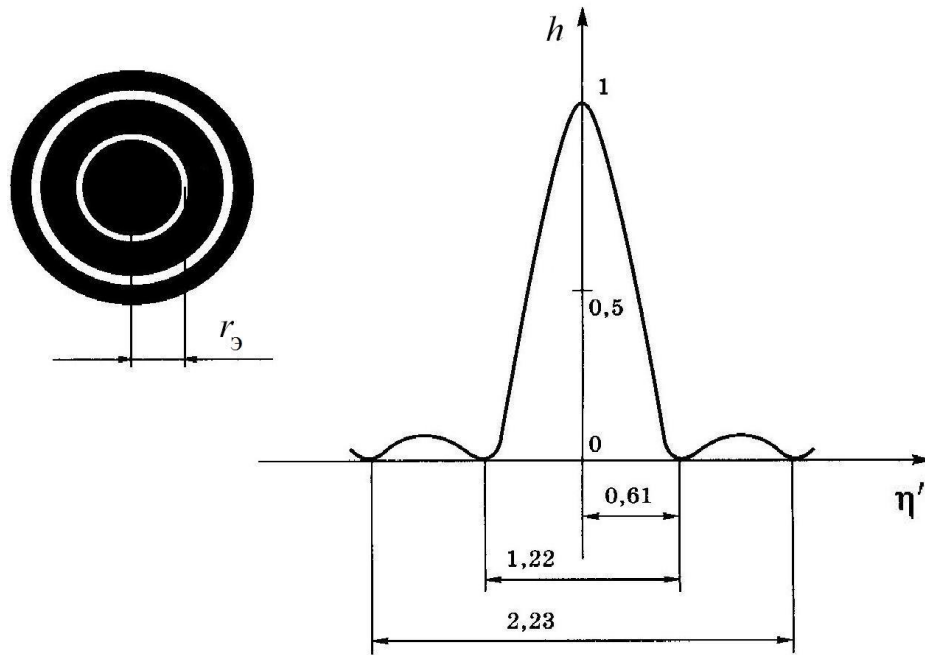


Рис. 21. Дифракционное изображение точки, его структура

Далее по таблицам бесселевых функций определяют значение переменной  $\eta'$ , соответствующее первому дифракционному минимуму (первому темному кольцу); оно составляет  $\eta' = 0,61$ .

Тогда, полагая  $r'_Э = y'$ , получим

$$r'_Э = \frac{0,61\lambda}{A'}, \text{ мм.} \quad (4)$$

Угловой размер радиуса Эри составляет

$$\Psi'_Э = \frac{1,22\lambda}{n'D'}, \text{ рад,} \quad (5)$$

где  $D'$  – диаметр выходного зрачка.

Для средней длины волны (при  $\lambda = 0,555$  мкм) имеем

$$r'_Э = \frac{0,34}{A'}, \text{ мкм,}$$

$$\Psi'_Э = \left[ \frac{140}{n'D'_{\text{мм}}} \right]''.$$

Таким образом, угловой размер центрального максимума зависит от диаметра выходного зрачка  $D'$  изображающей оптической системы и показателя преломления  $n'$  среды в пространстве изображений.

Последние формулы (3)–(5) справедливы для случая, когда одна из сопряженных точек находится в бесконечности.

Таким образом, линейный размер дифракционного максимума зависит от угловой апертуры действующего пучка в пространстве изображений: чем больше апертура  $A'$  пучка лучей, тем меньше дифракционное изображение точки. Размер центрального максимума вдоль оси очень быстро растет с уменьшением  $A'$ , этот размер всегда гораздо больше, чем в поперечном направлении.

Дифракционное изображение, как и изображение любого другого предмета, передается оптической системой из одного пространства в другое по законам геометрической оптики. Поэтому для пространства предметов можно определить размер дифракционного изображения, если заменить в формулах  $A'$  на  $A$ :

$$r = \frac{0,61\lambda}{A}, \text{ мм,}$$

$$\rho = \frac{2\lambda}{A^2}, \text{ мм.}$$

Для средней длины волны:

$$r = \frac{0,34}{A}, \text{ мкм,}$$

$$\rho = \frac{1,11}{A^2}, \text{ мкм.}$$

Эти выражения используются при расчете оптических систем измерительных приборов.

Распределение интенсивности *вдоль оптической оси* характеризуется другой нормированной функцией (рис. 22). Она показывает изменение интенсивности в центре дифракционного изображения при расфокусировке и записывается в виде

$$h(\xi') = \left[ \frac{\sin(\pi\xi'/2)}{\pi\xi'/2} \right]^2. \quad (6)$$

Функция  $h(\xi')$  – нормированная расфокусировочная кривая, показывающая интенсивность элементарной площадки изображения на оптической оси. Мнемоническое обозначение функции такого вида:

$$\sin^2(\pi\xi'/2).$$

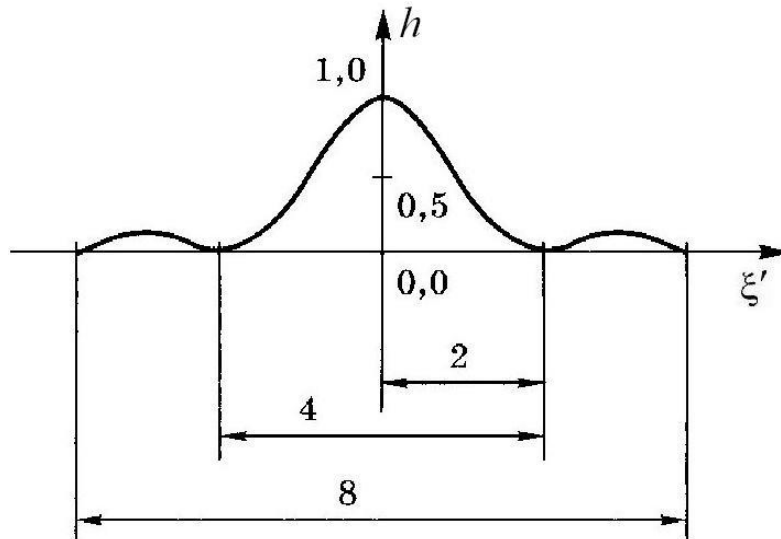


Рис. 22. Расфокусировочная кривая идеальной оптической системы

Первый минимум интенсивности функции (6) возникает при  $\xi' = 2$  на расстоянии  $\rho'$  от центра изображения. Тогда продольный размер центральной фигуры дифракционного изображения точки

$$\rho' = \frac{2\lambda n'}{A'^2}.$$

При  $\lambda = 0,555$  мкм и  $n' = 1$  получаем

$$\rho' = \frac{1,1}{A'^2}, \text{ мкм.}$$

Следует иметь в виду, что изменение интенсивности дифракционного изображения при смещении в поперечном направлении и расфокусировке является одним из основных факторов, определяющих чувствительность и точность изображающих приборов.

Размер центрального максимума вдоль оси быстро растет с уменьшением  $A'$ , этот размер обычно гораздо больше, чем в поперечном направлении.

Эти выражения используются при расчете оптических систем измерительных приборов.

Приведенные формулы относятся к идеальной оптической системе. В системах со значительными aberrациями распределение энергии сильно отличается от идеального случая, и размеры изображения точки будут соответственно больше.

#### 4.4. СТРУКТУРА ИЗОБРАЖЕНИЯ СВЕТЯЩЕЙСЯ ЛИНИИ, ЕЕ ПОПЕРЕЧНЫЙ РАЗМЕР

В случае линейчатых объектов (темные штрихи) разрешающая способность безабберрационных оптических приборов несколько выше. Каждая линия может рассматриваться как совокупность точек, причем дифракционные изображения точек будут накладываться друг на друга, как и в предыдущем случае, но на этот раз короткие серые перемишки сливаются в одну серую длинную линию, более заметную для глаза.

Бесконечно тонкую светящуюся линию можно представить в виде совокупности светящихся точек. На рис. 23 показаны отдельные светящиеся точки в изображении линии, расположенной вдоль оси  $y'$ . Там же показано суммарное распределение интенсивности.

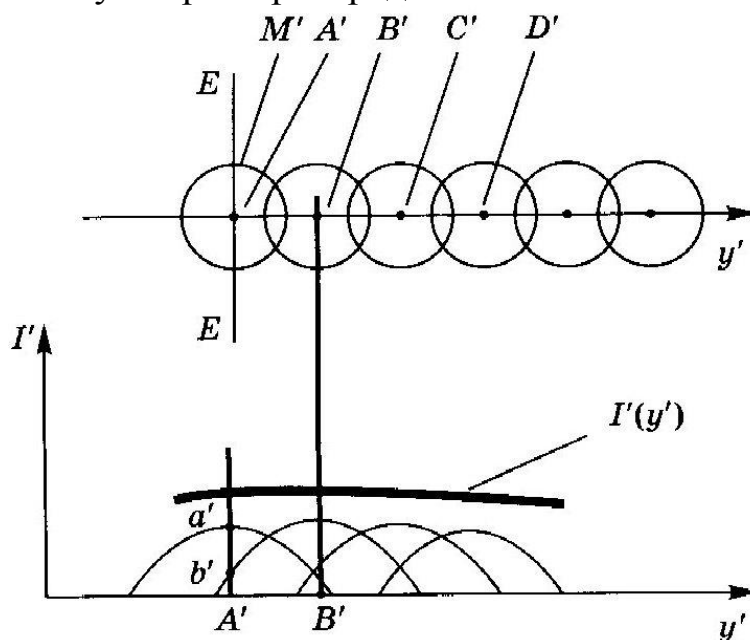


Рис. 23. Функция распределения интенсивности в любом сечении, перпендикулярном линии, полученная сложением ординат ФРТ

Так как световые колебания во всех точках линии некогерентны, то функцию распределения интенсивности в любом сечении, перпендикулярном линии, можно получить сложением ординат всех ФРТ, расположенных справа или слева от сечения. Вследствие этого интенсивность в точке  $A'$  сечения  $EE$  возрастет. Она будет равна сумме ординат  $A'a'$ ,  $A'b'$  и др.

Интенсивность в точке  $M'$  сечения, расположенной в первом минимуме ФРТ, тоже увеличится.

Распределение интенсивности в плоскости  $\xi' = 0$ , перпендикулярной оси, при изображении бесконечно тонкой светящейся линии представлено на рис. 24. Оно определяется нормированной ФРЛ:

$$S(\eta'_x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\eta'_x \eta'_y) d\eta'_y = H_1 \frac{4\pi\eta'_x}{(2\pi\eta'_x)^2},$$

где  $H_1$  – функция Струве первого порядка.

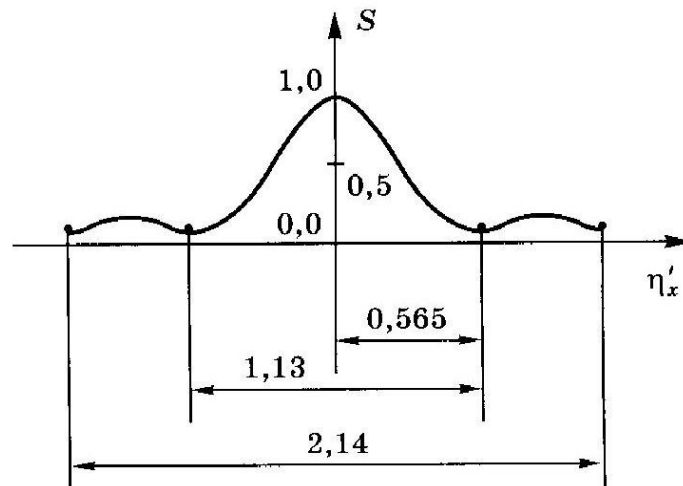


Рис. 24. Распределение интенсивности в изображении бесконечно тонкой светящейся линии

ФРЛ описывает распределение интенсивности вдоль оптической оси. Условие нормировки ФРЛ:

$$\int_{-\infty}^{\infty} h(\eta_x) d\eta_x = \int_{-\infty}^{\infty} h(\eta'_x \eta'_y) d\eta'_x = 1,$$

где  $\eta_x$  – приведенная координата предмета в плоскости изображения.

Из сравнения графиков ФРТ и ФРЛ видно, что ширина центрального максимума дифракционного изображения линии меньше диаметра дифракционного кружка изображения точки. Однако дифракционные минимумы ФРЛ не равны нулю, и поэтому контраст изображения линии несколько понижен.

Ширина первого минимума ФРЛ составляет

$$r'_л = \frac{0,565\lambda}{A'}, \text{ мм,}$$

$$\psi'_л = \frac{1,13\lambda}{n'D'}, \text{ рад.}$$

При  $\lambda = 0,555$  мкм, имеем



$$r'_л = \frac{0,32}{A'}, \text{ мкм,}$$

$$\Psi'_л = \left[ \frac{138}{n'D'_{\text{ММ}}} \right]''.$$

#### 4.5. СТРУКТУРА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПОЛУПЛОСКОСТИ

Полуплоскость (рис. 6, рис. 10) представляет собой объект 1, имеющий прямолинейную границу раздела светлого и темного полей. Изменения его интенсивности характеризуется функцией скачка 2. В светлой части поля интенсивность объекта одинакова и равна единице, в темной – равна нулю.

Чтобы найти функцию распределения интенсивности в плоскости изображения, представим светлое поле объекта в виде бесконечного числа абсолютно тонких светящихся линий, а изображение – в виде соответствующей совокупности светящихся ФРЛ. На рис. 25 эти линии обозначены  $A, B, C, \dots$ , а их изображения  $S_{A'}, S_{B'}, S_{C'}, \dots$ . Интенсивность в точке  $A'$  изображения находится путем сложения ординат  $A'a', A'b', A'c', \dots$

Если все ФРЛ одинаковы, то при определении интенсивности в точке  $A'$  можно складывать не ординаты  $A'a', A'b'$  и т.д., а равные им ординаты кривой  $S_{A'}$ , расположенные левее точки  $A'$ . Интенсивность в точке  $B'$  равна сумме всех ординат кривой  $S_{B'}$ , расположенных левее точки  $B'$ .

Итак, функцию распределения интенсивности в изображении полуплоскости находят интегрированием ФРЛ, т.е. интенсивность в точке изображения полуплоскости находят как

$$I'(\eta'_x) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\eta'_x) d\eta'_x, \quad (7)$$

где  $\eta'_x$  – координата, пропорциональная расстоянию от изображения края полуплоскости до элемента, в котором определяется освещенность.

Нижним пределом интегрирования практически может быть величина  $\eta'_{M'}$  (рис. 25), которой соответствует пренебрежимо малая интенсивность  $I'_{M'}$ .

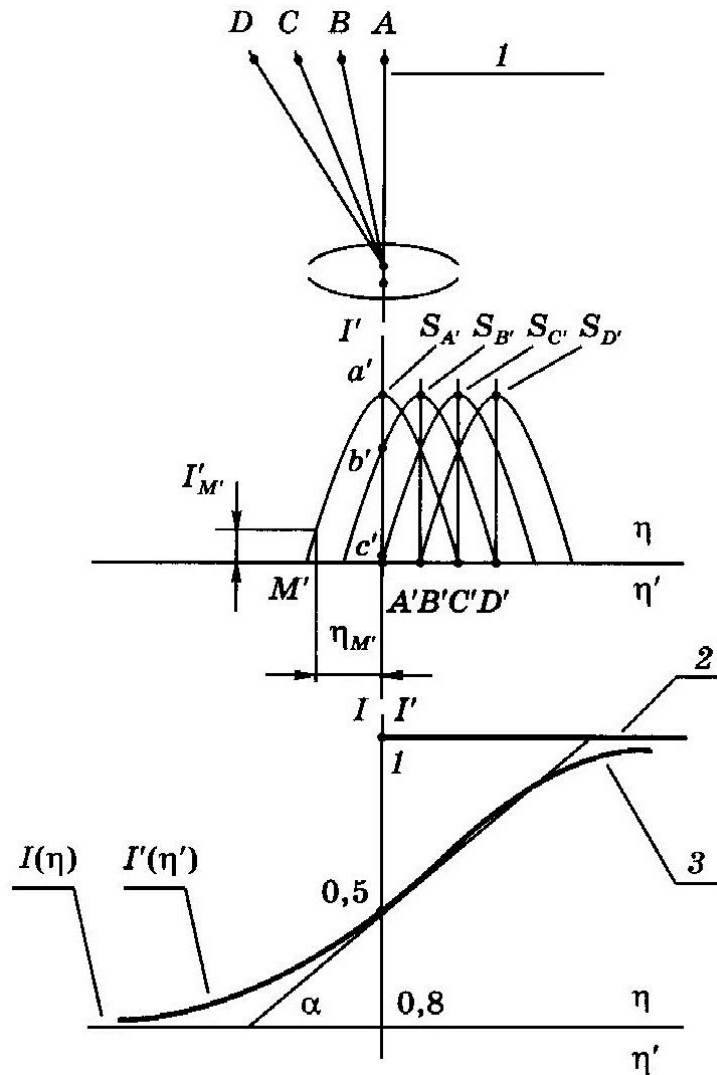


Рис. 25. Связь ФРЛ и изображения полуплоскости

В нижней части рис. 25 показано распределение интенсивности на границе полуплоскости в виде ступенчатой линии 2 и пограничной кривой 3. Первая характеризует интенсивность изображения, полученную по правилам геометрической оптики, а вторая – нормированную функцию края светлого поля или пограничную кривую, вычисленную по формуле (7). Интенсивность дифракционного изображения на границе раздела полей равна половине интенсивности светлого поля. Пограничная кривая центрально симметрична относительно точки с координатами (0; 0,5).

## 4.6. РАЗРЕШАЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ

*Разрешающая способность* – свойство прибора изображать близкие предметы (точки или линии) раздельно. Разрешающая способность характеризуется наименьшим расстоянием между двумя предметами, которые наблюдаются через прибор как раздельные.

Согласно *критерию Рэля* – расстояние, при разрешении пары светящихся точек, равно радиусу дифракционного изображения точки (рис. 26), т.е. на пределе разрешения центральный максимум дифракционного изображения одной точки должен накладываться на первый минимум дифракционного изображения соседней точки. При этом суммарная дифракционная картина будет такой, что в середине получается перемычка (рис. 27), освещенность которой на 24% меньше освещенности в максимуме. Такая перемычка будет еще заметна для наблюдателя, но при дальнейшем сближении точек их изображения сольются (рис. 28).

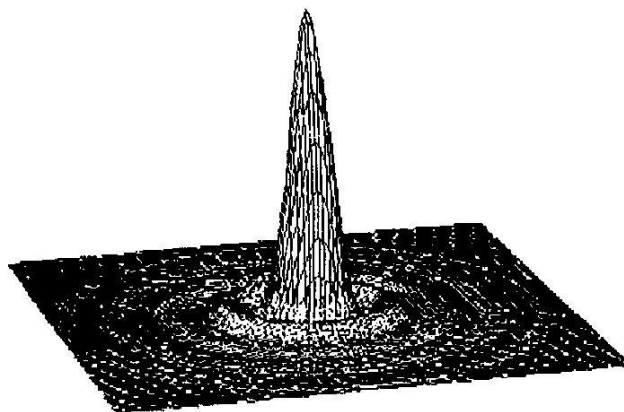


Рис. 26. Структура изображения светящейся точки

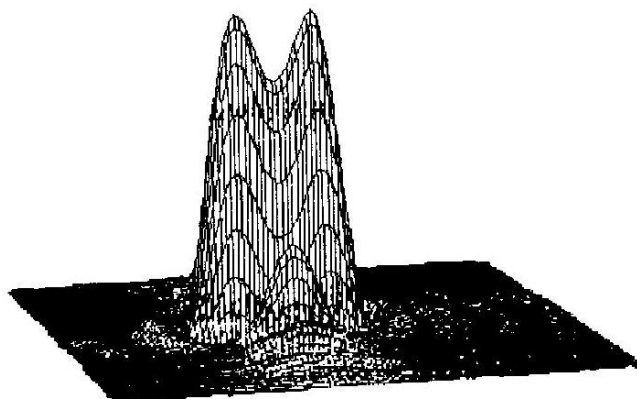


Рис. 27. Структура изображения пары светящихся точек, расположенных на расстоянии порога разрешения

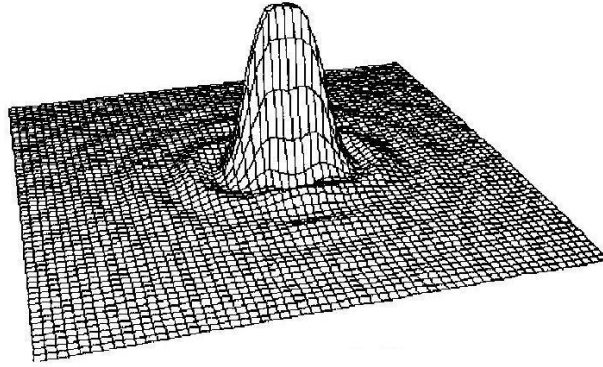


Рис. 28. Структура изображения пары светящихся точек, расположенных ближе порога разрешения

Следовательно, пороговое разрешение по Рэлею для пары светящихся точек (точечных объектов в пространстве предметов для средней длины волны) составит

$$\varepsilon = r = \frac{0,32\lambda}{A}, \text{ мкм,}$$

или в угловой мере

$$\varphi = \left[ \frac{138}{D} \right]'' \quad (8)$$

Формула (8) используется для определения предельного разрешения телескопических систем.

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.

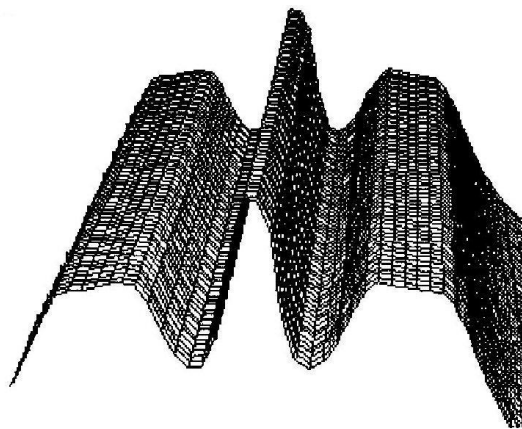


Рис. 29. Распределение освещенности в изображении темного штриха, совмещенного с биссектором (точная наводка)

В случае линейчатых объектов (темные штрихи) разрешающая способность безабберационных оптических приборов несколько выше. Каждая линия может рассматриваться как совокупность точек (рис. 29), причем дифракционные изображения точек будут накладываться друг на друга, как и в предыдущем случае, но на этот раз короткие серые перемычки сливаются в одну серую длинную линию, более заметную для глаза. Поэтому оптические изображения двух близко расположенных параллельных линий не будут сливаться и при меньшем расстоянии (рис. 30, 31). Экспериментально установлено, что для пары светящихся линий справедливы формулы линейного (9) и, соответственно, углового (10) разрешения:

$$\varepsilon_p = \frac{0,29}{A}, \text{ мкм}, \quad (9)$$

$$\varphi = \left[ \frac{120}{D_p} \right]'' \quad (10)$$

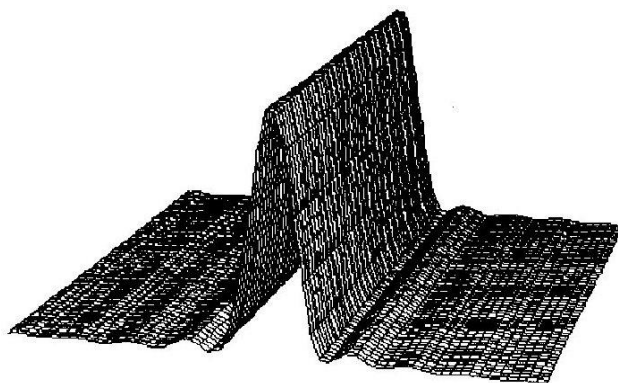


Рис. 30. ФРЛ идеальной оптической системы (квазиодномерная функция  $[\sin(x)/x]^2$ )

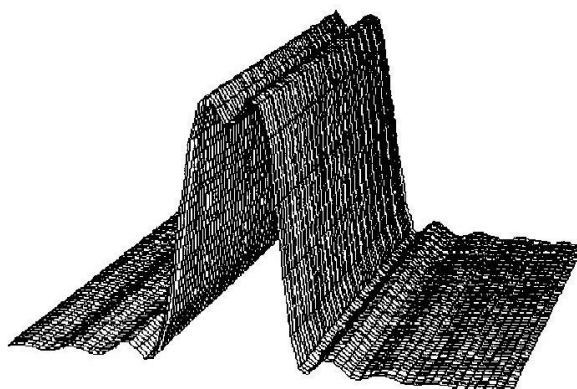


Рис. 31. Структура изображения двух близко расположенных линий, иллюстрирующая порог разрешения пары линий

Вопросы выбора параметров оптической системы оптического измерительного прибора исходя из уровня чувствительности продольных и поперечных наводок рассмотрены также в [11].

#### 4.7. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ НАВОДОК

Чувствительностью продольной или поперечной наводки называется наименьшее расстояние между изображением объекта измерения и измерительной маркой (центром перекрестия, краем темного и светлого полей, серединой отсчетного штриха), при котором наблюдатель уверенно устанавливает факт их несовмещения. Чувствительность продольной наводки обычно выражается в линейной мере, а поперечной – как в угловой, так и в линейной мерах.

Чувствительность наводок при отсутствии aberrаций измерительного прибора зависит главным образом от дифракционных явлений, неизбежных в оптических приборах, и от физиологических свойств глаза.

Порог чувствительности изображающих приборов можно оценить по распределению интенсивности в пространстве изображений и порогу реагирования приемника на изменение этой интенсивности. Так как порог чувствительности определяется смещением предмета (и, соответственно, изображения), его удобно выразить в функции от инвариантной величины, т.е. отклонения волновой поверхности на краю зрачка.

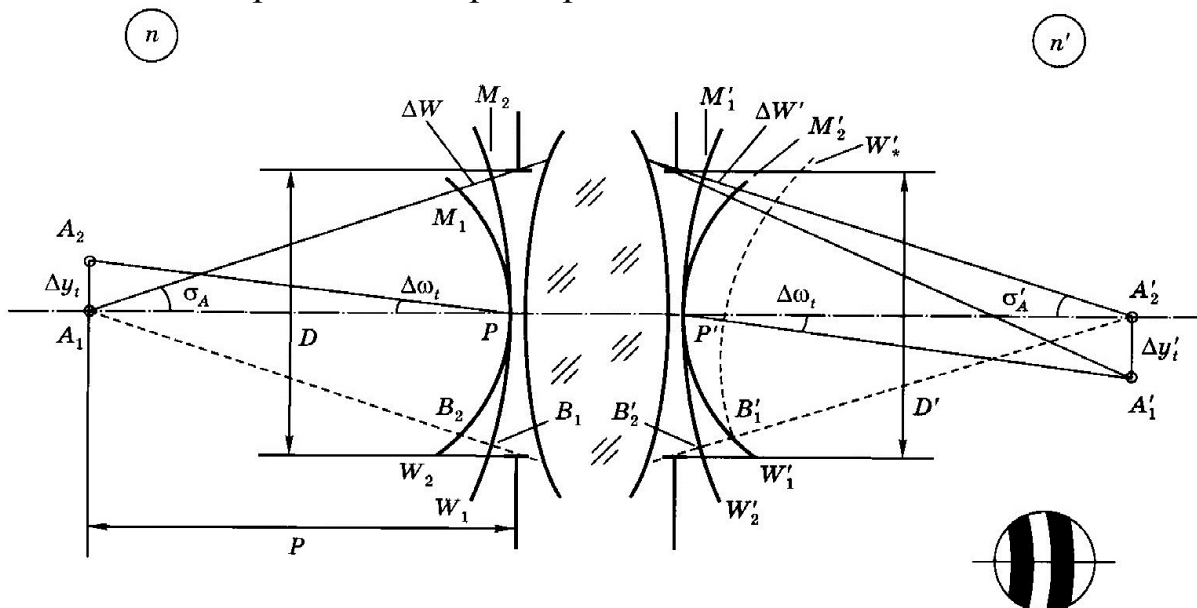


Рис. 32. Чувствительность поперечной наводки в линейном и волновом выражении

На рис. 32 показана осевая точка  $A_1$  и ее изображение  $A'_1$ , создаваемое оптической системой. Центры  $P$  и  $P'$  входного и выходного зрачков этой оптической системы совмещены с оптической осью, а точки  $A_1$  и  $A'_1$  расположены соответственно в средах с показателями преломления  $n$  и  $n'$ .

Если оптическая система идеальна, то она создает точечное изображение.

В этом случае сферическая волновая поверхность  $W_1$  во входном зрачке, образованная точечным излучателем  $A_1$ , преобразуется в сферическую поверхность  $W'_1$ . Пути вдоль любого из лучей между точкой  $A_1$  и ее изображением являются таутохронными (одинаковыми во времени). Оптическая длина этих путей постоянная. Она не зависит от апертурного угла  $\sigma_A$  ( $\sigma'_A$ ). Постоянными будут и оптические пути, проходимые светом между двумя фиксированными волновыми поверхностями вдоль любого луча.

При смещении точки  $A_1$  в поперечном направлении в положение  $A_2$ , ее изображением будет точка  $A'_2$ . Обозначим смещения  $\Delta u_t$  и  $\Delta u'_t$  и примем, что они обусловлены ограниченной чувствительностью наводок и являются величинами первого порядка малости по сравнению с соответствующими расстояниями  $A_1P$  и  $A'_1P'$ . Угловая величина смещений равна  $\Delta \omega_t$  и  $\Delta \omega'_t$ . Точки  $A_2$  и  $A'_2$  есть центры новых волновых поверхностей  $W_2$  и  $W'_2$ , отклоненных от начальных волновых сфер.

#### **4.8. СПОСОБЫ ВЫРАЖЕНИЯ СМЕЩЕНИЙ ПРИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ НАВОДКАХ**

##### **Поперечные наводки**

Поперечное смещение (при поперечных наводках) для различных целей выражают различными способами.

Способ 1. В координатах на предмете или на плоскости оптического изображения, нормальной к оптической оси.

При этом, естественно, величина смещения  $\Delta u'$  связана с величиной соответствующего смещения  $\Delta u$  (ошибки позиционирования) на измеряемом объекте через увеличение  $V$  оптической системы измерительного прибора:

$$\Delta u' = V \Delta u.$$

Способ 2. В канонических координатах:

$$\Delta\eta = \Delta y \frac{A}{\lambda} = \Delta y' \frac{A'}{\lambda}.$$

Как видим, смещения в канонических координатах равны для пространства предметов и изображений.

Способ 3. В величине смещения (для поперечного смещения – заклон) волнового фронта. Этот заклон характеризуют величиной смещения (нормального отклонения) волнового фронта на краю зрачка оптической системы измерительного прибора:

$$\Delta W' = \Delta y' A',$$

где  $\Delta y'$  – поперечное смещение в плоскости изображения;  $A'$  – апертура оптической системы измерительного прибора.

Показано, что величина  $\Delta W'$  для пространства изображений равна соответствующей величине  $\Delta W$  в пространстве предметов и зависит от типа изображающей системы, т.е. интерпретируется подобно волновой аберрации. Величину смещения волнового фронта, выраженную в числе длин волн, называют *волновым смещением*. Для поперечных наводок величина волнового смещения равна величине поперечного смещения, выраженного в канонических координатах:

$$\Delta W = \Delta y \frac{A}{\lambda} = \Delta y' \frac{A'}{\lambda}.$$

Например, порогу рэлеевского разрешения соответствует смещение в канонических координатах  $\Delta\eta_r = 0,61$  и заклон волнового фронта  $\Delta W = 0,61$  (длин волн).

### **Продольные наводки**

Продольное смещение выражается аналогично изложенному также тремя способами.

Способ 1. В координатах в пространстве изображений (или предметов) вдоль оптической оси:

$$z' = V^2 \Delta z.$$

Способ 2. В канонических продольных координатах:

$$\Delta\xi = \Delta z' \frac{A'^2}{\lambda} = \Delta z \frac{A^2}{\lambda}.$$

Способ 3. В величине деформации волнового фронта в зрачке изображающей оптической системы при изменении ее радиуса кривизны, соответствующем продольному смещению изображения объекта. Для края зрачка имеем



$$\Delta W_{\text{пр}} = \Delta z' \frac{A'^2}{2\lambda} = \Delta z \frac{A^2}{2\lambda}.$$

Показано также, что в канонических единицах продольное смещение равно удвоенному волновому смещению:

$$\Delta \xi = \Delta z' \frac{A'^2}{\lambda} = \Delta z \frac{A^2}{\lambda} = 2\Delta W_{\text{пр}}.$$

На практике малое поперечное смещение между изображением объекта и изображением анализатора, возникающее как погрешность наводки из-за ее ограниченной чувствительности, выражается в долях линейного  $e$  или углового  $\varepsilon$  разрешения по Рэлею. Мерой, характеризующей чувствительность, является коэффициент  $k$ , который соответствует волновому смещению  $\Delta W$  для данных условий выполнения наводок.

Величина  $k$  на практике изменяется в зависимости от вида объекта и реакции приемника на изменение интенсивности анализируемого элемента изображения при смещении объекта.

#### 4.9. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОПЕРЕЧНЫХ НАВОДОК

Процесс измерительного отсчета геометрического параметра связан с операцией оптической измерительной наводки (или наведения). *Измерительная наводка* состоит в совмещении на чувствительной площадке приемника изображения двух изображений:

1. изображения базы анализатора (роль которого могут играть перекрестие окулярной сетки или штрих окулярной шкалы);
2. изображения требуемого элемента объекта.

Чувствительность поперечных оптических измерительных наводок определяется не только размером дифракционного изображения в поперечном направлении, но и формой штрихов сетки прибора и объекта, которые должны совмещаться.

*Поперечная наводка* предусматривает выполнение следующих операций:

- смещения изображения анализатора (например, сетки) относительно изображения элемента объекта;
- фиксации положения совмещения этих двух изображений;

– выполнения измерительного отсчета, т.е. получение численного значения, связанного с координатами положения базы анализатора в момент совмещения.

*Момент совмещения* характеризуется слиянием на чувствительной площадке приемника изображения (например, на сетчатке глаза) двух изображений, анализатора и объекта, в некоторое третье характеристическое изображение, по виду и параметрам которого определяется момент совмещения.

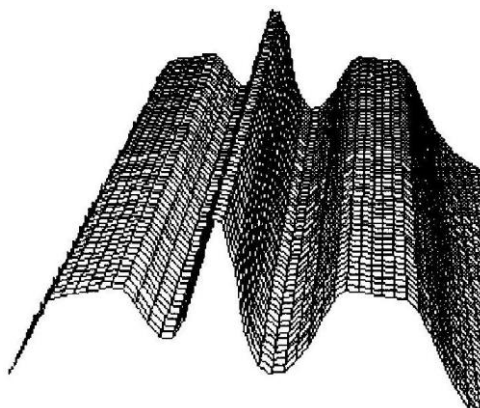


Рис. 33. Распределение освещенности в изображении темного штриха, совмещенного с биссектором (неточная наводка)

Например: совмещение штриха с биссектором характеризуется формированием суммарного изображения, структура которого показана на рис. 29 и рис. 33. Здесь момент точного совмещения характеризуется равенством интенсивности дифракционных минимумов. *Ошибка совмещения* (измерительной наводки) характеризуется неравенством этих интенсивностей. Это неравенство на практике зависит от порога контрастной чувствительности приемника изображения (например, глаза) для изображения данного типа. Поскольку этот порог неодинаков для характеристических изображений различных типов, то соответствующие им разные методы оптических измерительных наводок характеризуются различными порогами чувствительности (табл. 2).

Так как визуальные приборы работают совместно с глазом, то, прежде всего, рассмотрим чувствительность невооруженного глаза для различных случаев. Экспериментальные данные приведены в табл. 2. Сравним приведенные данные с угловым разрешением глаза, которое при диаметре зрачка, равном 2 мм, составляет

$$\varphi_{\text{гл}} = \left[ \frac{120}{2} \right]'' = 60''.$$

Таблица 2. Практическая чувствительность поперечных наводок

Форма совмещаемых объектов	Точность совмещения, с
Наложение штрихов друг на друга; совмещение перекрестия с краем изображения предметов или границей между полями разной освещенности; отсчет по шкале с наложенным индексом	30–60
Нониальная чувствительность, совмещение соприкасающихся штрихов, щелей	10
Совмещение штриха и биссектора или штриха с изображением освещенной щели	6–8

В оптических измерительных приборах хорошая освещенность изображения, поэтому диаметр зрачка глаза при работе с ними принимается равным 2 мм.

Сравнение показывает, что чувствительность поперечных наводок глаза существенно лучше его предельного разрешения:

$$\tau_{\text{гл}} = (0,5 - 0,1)\varphi_{\text{гл}}.$$

Такое повышение чувствительности при поперечных совмещениях объясняется специфическим распределением энергии в суммарной картине. При близком расположении таких объектов, как соприкасающиеся штрихи (нониус), биссектор и штрих (рис. 30 и рис. 33), наблюдатель при поперечной наводке добивается не только определенного взаимного расположения этих объектов, но и одинакового распределения освещенности в промежутках между штрихами.

Пороговая чувствительность глаза к разности освещенности  $\Delta E \varepsilon_{\Pi}$  двух смежно расположенных полей очень высока:

$$\Delta E \varepsilon_{\Pi} = (0,02 - 0,03).$$

То же соотношение остается при работе глаза с оптическим прибором, имеющим выходной зрачок  $D' \geq 2$  мм. Поэтому чувствительность поперечных наводок прибора в угловой мере

$$\tau = (0,5 - 0,1)\varphi,$$

где  $\varphi$  – угловой предел разрешения прибора.

Или в линейной мере для плоскости объекта

$$T = (0,5 - 0,1)\varepsilon_p,$$

где  $\varepsilon_p$  – линейный предел разрешения прибора для плоскости предмета.

В среднем, если коэффициент принять равным  $\frac{1}{6}$ , получим

$$T = \frac{1}{6} \varepsilon_p = \frac{0,29}{6A},$$

т.е.

$$T = \frac{0,05}{A}, \text{ мкм.}$$

Для зрительных труб

$$\tau = \left[ \frac{120}{6D_p} \right]''$$

или

$$\tau = \left[ \frac{20}{D_p} \right]''.$$

Эти формулы подтверждены опытом и дают хорошее совпадение с практическими данными при рациональном выборе размеров сетки и объекта.

Так, например, при использовании биссектора максимальная чувствительность достигается, когда в симметричном положении расстояние между штрихами равно  $0,1r$ .

Формулы разрешающей способности и чувствительности поперечных наводок справедливы на практике, если изображения сеток и объектов имеют достаточный контраст и если увеличение прибора достаточно для того, чтобы и глаз разрешал все необходимые детали изображения. Для измерительных приборов рекомендуется иметь такие увеличения, при которых размер выходного зрачка не выходит за пределы

$$2 \text{ мм} \geq D_p \geq \frac{1}{2} \text{ мм.}$$

Наличие остаточных aberrаций у оптической системы прибора снижает чувствительность наводок. Опыт показывает [12], что если наличие у зрительной трубы волновой сферической aberrации и вторичного спектра до  $1\lambda$  практически не снижает чувствительность поперечных наводок, то уже при aberrациях в  $2\lambda$  она уменьшается в 1,5 раза.

## 4.10. ПРОДОЛЬНЫЕ НАВОДКИ

На рис. 34 показаны две точки  $A_1$  и  $A_2$  и их изображение  $A'_1$  и  $A'_2$ , создаваемое идеальной оптической системой. Расстояние  $A_1A_2$ , равное  $\Delta z_t$ , представляет собой смещение предмета, обусловленное ограниченной чувствительностью наводки.

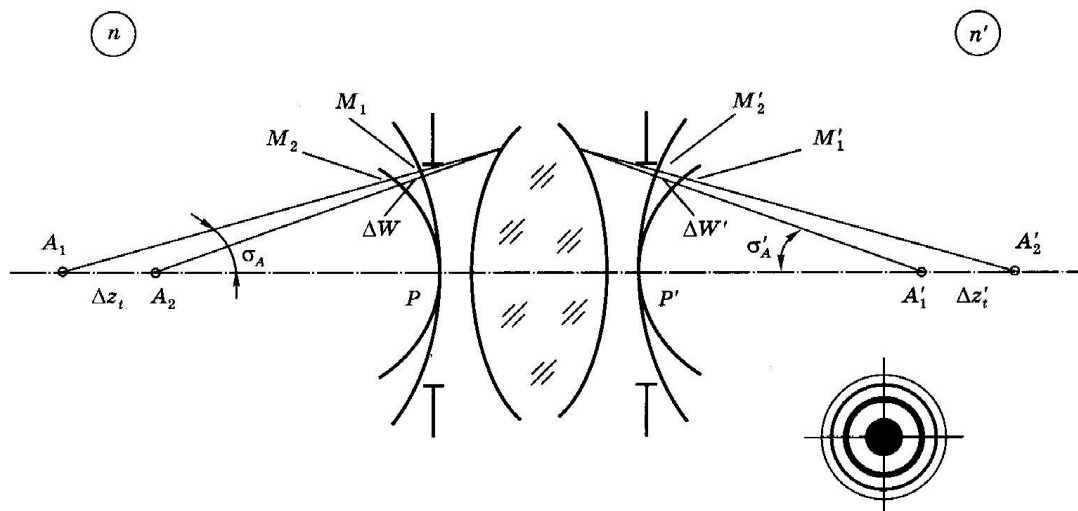


Рис. 34. Чувствительность продольной наводки в линейном и волновом выражении

Показано [10], что, если обозначить приращение разности хода и отклонение волновой поверхности на краю зрачка в числе длин волн в пустоте, будут действовать соотношения

$$\Delta = \Delta' = k\lambda, \quad (11)$$

$$\Delta z'_t = k\rho',$$

$$\Delta z_t = k\rho. \quad (12)$$

Для вычисления порога чувствительности наводок используются формулы (10), (11) или (12) в зависимости от того, в какой форме представляются размеры предмета – угловыми или линейными. Эти формулы являются приближенными. Однако поскольку величины смещений при наводках малы, ошибка вычислений тоже мала, и она уменьшается с уменьшением апертуры.

Следовательно, порог чувствительности продольных наводок пропорционален продольному размеру  $\rho'$  дифракционного изображения. Коэффициент пропорциональности  $k$  является мерой чувствительности наводки. Он зависит от функции распределения интенсивности изображения и реакции приемника на изменение интенсивности анализируемого элемента изображения в процессе наводки. Коэффициент  $k$  также может быть, как показано ранее,

выражен отклонением положения волнового фронта. Зависимость порога чувствительности при расфокусировке от порога контрастной чувствительности приемника и характеристик оптической системы отображается формулой [10]

$$\Delta z'_t = \frac{3,6\sqrt{k_{in}\lambda n'}}{A'^2}.$$

Данное выражение представляет собой зависимость чувствительности наводки от порога контрастной чувствительности приемника  $k_{in}$ , показателя преломления  $n'$ , апертуры оптической системы  $A'$  и длины волны света.

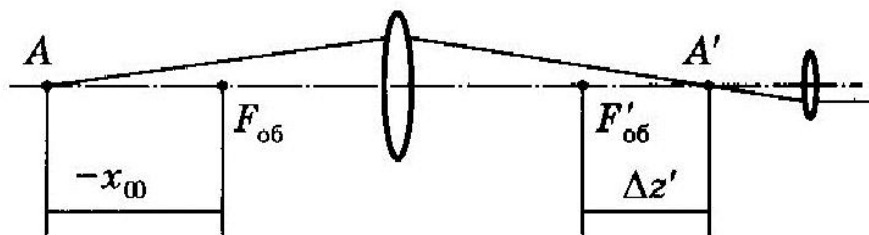


Рис. 35. К понятию практической бесконечности

Рассмотрим чувствительность продольных наводок на бесконечно удаленный объект. На рис. 35 видно, что по мере удаления объекта апертурный угол оптической системы в пространстве предметов будет уменьшаться и станет равным нулю, когда предмет окажется на бесконечности.

Имеем в виду, что

$$z\Delta z'_t = ff', \quad (13)$$

где  $f' = -\frac{fn}{n'}$ . Подставляя в (13) значения  $z\Delta z'_t$ ,  $f'$ , а также учитывая,

что апертура  $A' = \frac{n'D'}{z'_p}$ , а увеличение в зрачках  $\frac{D'}{D} = -\frac{z'_p}{f}$ , получим

$$z = a_\infty = \frac{nD^2}{8k\lambda}.$$

Символом  $a_\infty$  обозначено начало бесконечности (практическая бесконечность), т.е. конечное расстояние до объекта, начиная с которого приемник перестает реагировать на приращение интенсивности и контраста изображения этого объекта в фокальной плоскости оптической системы с увеличением расстояния. Объекты, находящиеся на расстоянии, равном или большем  $a_\infty$ , изображаются в фокальной плоскости оптической системы столь же резко, как и

бесконечно удаленные. Передняя сходимость, соответствующая началу бесконечности, находится из выражения

$$U_{\infty} = \frac{n}{a_{\infty}} = \frac{8k\lambda}{D^2}.$$

При визуальных наводках в видимом свете, когда  $\lambda_{\text{cp}}=0,6 \cdot 10^{-3}$  мм,  $n=1$  (воздух) и порог чувствительности  $k=1/6$ , получим

$$a_{\infty} = 1,25D^2, \text{ мм},$$

$$U_{\infty} = 0,8D^2, \text{ дптр}.$$

По приведенным формулам нетрудно вычислить начало бесконечности и соответствующую переднюю сходимость для глаза. Принимая диаметр входного зрачка  $D_p=2$  мм, получим  $a_{\infty} = 5$  м и  $U_{\infty} = 0,2$  дптр.

Чувствительность продольных наводок, или фокусировок, определяется размером изображения в продольном направлении (вдоль оптической оси). Однако наблюдатель замечает расфокусировку раньше, чем она достигнет размера  $\rho'$ , так как при расфокусировке меняется распределение освещенности в изображении. Экспериментально установлено, что чувствительность продольных наводок:

$$\Delta z' = \frac{1}{6} \rho' = \frac{0,2}{A'^2}, \text{ мкм},$$

что соответствует в пространстве предметов величине

$$\Delta z' = \frac{0,2}{A^2}, \text{ мкм}.$$

В случае телескопических систем, чувствительность продольных наводок характеризуется другой величиной – практической бесконечностью ( $x_{\infty}$ ). Это расстояние до предмета (рис. 20), изображение которого располагается на расстоянии  $\pm \Delta z'$  от заднего фокуса объектива телескопической системы. Для вывода формулы используем формулу отрезков Ньютона

$$xx' = -f'^2.$$

Полагая  $x' = \pm \Delta z'$ , а  $x = x_{\infty}$  (рис. 14), получим

$$x_{\infty} = \frac{f'^2}{\Delta z'}; \Delta z' = \frac{1}{6} \rho' = \frac{0,2}{A'^2}, \text{ мкм}; A'^2 = \frac{D_p^2}{4f'^2}.$$

Тогда

$$\Delta z' = \frac{0,2 \cdot 4f'^2}{D_p^2} = \frac{0,8f'^2}{D_p^2}; x_{\infty} = \frac{f'^2 D_p^2}{0,8f'^2}; x_{\infty} = 1,25D_p^2, \text{ мкм}.$$

Чувствительность продольных наводок гораздо ниже, чем поперечных, так как размер дифракционного изображения в продольном направлении гораздо больше. Чувствительность наводок можно представить величиной предельно заметного для глаза изменения формы волнового фронта:

- при продольных наводках – стрелок двух волновых фронтов в пределах диаметра рабочего пучка;
- при поперечных – величиной их взаимного наклона, выраженного линейным расстоянием между фронтами на краю пучка.

При  $D'_p \geq D_{\text{гл}} = 2$  мм чувствительность для обоих типов наводок в такой мере равна 0,1 мкм. Данная величина имеет более общее значение. Можно утверждать, что любая деформация волнового фронта, вызванная различными причинами, будет визуально незаметна, если она меньше 0,1 мкм в пределах рабочего пучка. Этим пользуются при расчете допусков на оптические системы для визуальных наблюдений и измерений.

#### 4.11. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ ПРОДОЛЬНЫХ И ПОПЕРЕЧНЫХ НАВОДОК

Отношение величин  $\Delta z'_t$  и  $\Delta y_t$  определяется как

$$\frac{\Delta z'_t}{\Delta y_t} = \frac{4n k_z}{A k}, \quad (14)$$

где  $k_z$  и  $k$  – коэффициенты, характеризующие изменение оптической разности хода при наводках в продольном и поперечном направлениях. Из формулы (14) следует, что чувствительность продольных наводок может быть выше поперечных лишь в том случае, когда  $\frac{k_z}{k} < \frac{A}{4n}$ . Если  $k_z = k$  и  $n=1$ , то

$$\frac{\Delta z'_t}{\Delta y_t} = \frac{4}{A}.$$

При наблюдении объектов невооруженным глазом, когда  $D_p=2$  мм, расстояние  $a=250$  мм и, следовательно, апертура  $A = \frac{1}{250}$ ,

по формуле (14) получаем, что  $\frac{\Delta z'_t}{\Delta y_t} = 100$ .



Соотношение между величинами  $\Delta z_t$  и  $\Delta y_t$  при изменении апертуры оптической системы видно из рис. 36, где представлен случай, соответствующий  $n=1$ .

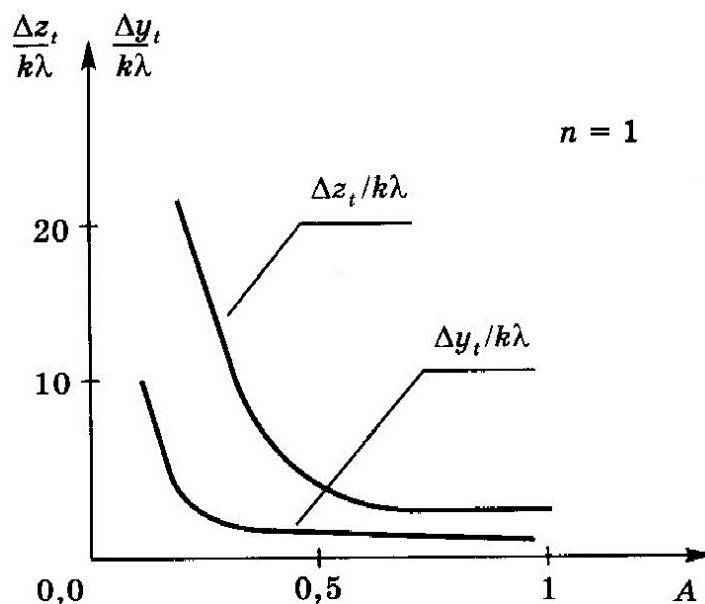


Рис. 36. Соотношение между чувствительностью продольных и поперечных наводок

#### 4.12. СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ НАВОДОК

В ряде случаев измерения производятся на пределе чувствительности метода. Чувствительность наводок измерительного прибора можно повысить различными способами. Рассмотрим некоторые из них. В области классических оптических измерений практическое распространение получил метод, основой которого является автоколлимация и многократные отражения.

Метод основывается на том, что при отражении лучей от зеркала угол между падающим и отраженным лучом изменяется на вдвое большую величину, чем угол поворота трубы относительно зеркала. Расстояние между предметом и его зеркальным изображением также меняется на удвоенную величину изменения расстояния между предметом и зеркалом. Благодаря этому при использовании автоколлимации, когда наблюдается предмет и его автоколлимационное изображение после отражения лучей от зеркала, точность поперечных и продольных наводок удваивается по сравнению с обычными установками.

Рассмотрим преимущества метода на конкретных примерах.

Пример 1. Установка трубы на бесконечность автоколлимационным методом (рис. 37).

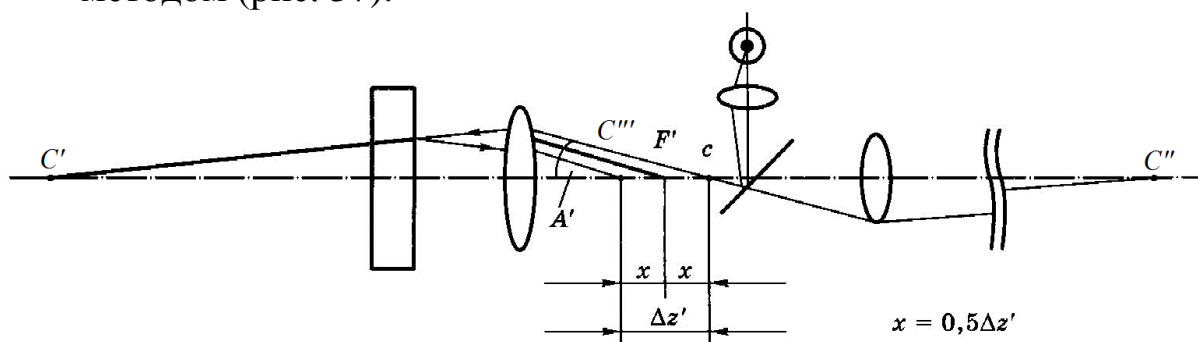


Рис. 37. Установка трубы на бесконечность автоколлимационным методом

В данном примере используются *продольные измерительные наводки*. Процесс установки сводится к помещению перекрестья в фокальную плоскость объектива трубы. Для этого трубу фокусируют так, чтобы  $S$  и  $S''$  оказались в одной плоскости. Эта плоскость как раз совпадает с фокальной.

Такую установку можно сделать с чувствительностью продольных наводок  $\pm \Delta z'$ . При этом установка трубы на бесконечность, т.е. совмещение  $S$  и  $S''$ , будет произведена с точностью до  $x = \frac{\pm \Delta z'}{2} = \frac{0,1}{A'^2}$ , мкм.

Пример 2. Установка трубы перпендикулярно нормали к плоскому зеркалу (рис. 38).

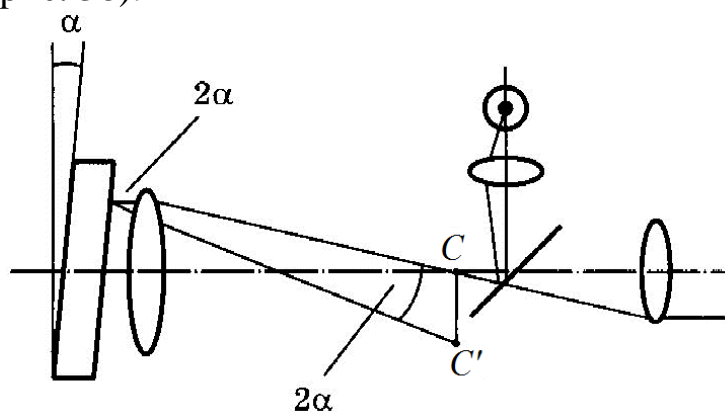


Рис. 38. Установка трубы перпендикулярно нормали к плоскому зеркалу

Метод основан на *поперечных измерительных наводках*, что повышает его точность.

Трубу необходимо установить так, чтобы ее визирная ось была параллельна нормали к зеркалу. При наличии угла  $\alpha$  между осью и нормалью угловое расстояние между центром  $S$  перекрестия и его

автоколлимационным изображением  $C'$  получаем равным  $2\alpha$ . В процессе установки трубы в положение нормали к зеркалу добиваются совмещения центра перекрестия  $C$  и его автоколлимационного изображения  $C'$ .

Чувствительность поперечных наводок при этом совмещении составит

$$(2\alpha)_{\min} = \left[ \frac{1}{6} \frac{138}{D_p} \right]''.$$

При этом точность установки трубы относительно зеркала составляет

$$\alpha = \left[ \frac{1}{6} \frac{138}{D_p} \right]''.$$

Естественно, что требования к aberrациям и ошибкам объектива при автоколлимации ужесточаются в два раза.

Пример 3. Для высокочувствительного измерения малых угловых отклонений плоской полированной поверхности (зеркала  $M_2$ , связанного с измеряемым объектом), она устанавливается под углом  $\Theta$  ко второму, неподвижному зеркалу  $M_1$  (рис. 39).

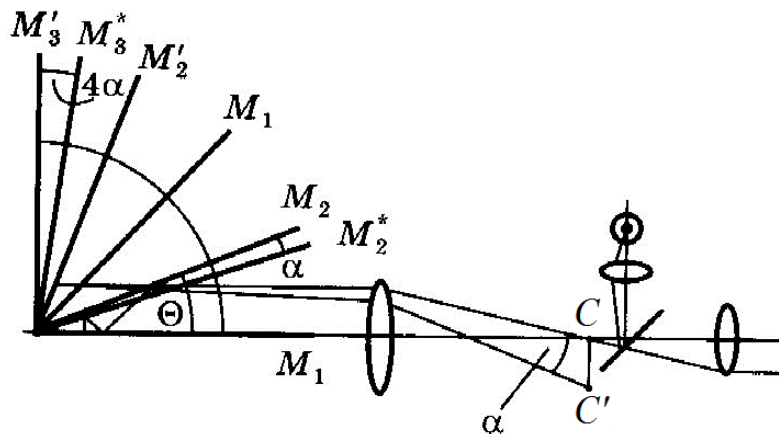


Рис. 39. Измерения малых угловых отклонений плоской полированной поверхности

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотренный материал позволяет нам убедиться в том, что пороговая чувствительность и точность классических методов оптических измерений находятся на уровне длины волны применяемого излучения, что и делает оптические измерения одними из наиболее чувствительных и точных среди известных методов измерений. Современные технологии, в том числе электронные и компьютерные, и другие научно-технические достижения дают возможность дальнейшего повышения точности и чувствительности оптических измерений еще в десятки раз.

## 6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения. Учебное пособие. – СПб.: Лань, 2010. – 304 с.
2. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Ишанин Г.Г. и др. Оптические измерения. – М.: Университетская книга; Логос, 2008. – 416 с.
3. Кирилловский В.К., Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 131 с.
4. 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.
5. Селиванов М.Н., Фридман А.Э., Кудряшова Ж.Ф. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 295 с.
6. Афанасьев В.А. Оптические измерения. Учебник для вузов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1981. – 229 с.
7. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. Учебник для вузов по специальностям «Оптико-электронные приборы» и «Технологии оптического приборостроения». – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
8. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
9. Еськова Л.М. Оптические измерения. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1984. – 89 с.
10. Лившиц Э.М. Оптические измерения. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1985. – 87 с.
11. Сокольский М.Н. Об ошибках измерений в приборах, обладающих несимметричными аберрациями типа комы и поперечного хроматизма // Оптико-механическая промышленность. – 1972. – № 9. – С. 25.
12. Порохова Т.Г. Оптические измерения. Конспект лекций. Ч. 1. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1976. – 126 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>1. ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>2. ОСНОВЫ ТЕОРИИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>4</b>
2.1. Этапы создания оптической системы.....	4
2.2. Этапы оптического измерения.....	5
2.3. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований.....	8
<b>3. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЕРВОГО И ВТОРОГО РОДА.....</b>	<b>12</b>
3.1. Изображения первого рода. Типовые тест-объекты и функции, описывающие их изображения.....	12
Тест-объект «светящаяся точка».....	14
Тест-объект «светящаяся линия».....	15
Тест-объект «полуплоскость».....	16
Тест-объект «линейная решетка».....	17
3.2. Оптические измерительные изображения второго рода.....	19
Теневая картина (тенеграмма).....	19
Гартманограмма.....	22
Интерферограмма.....	25
<b>4. ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ И ТОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЯ.....</b>	<b>27</b>
4.1. Оптические измерительные наводки.....	27
4.2. Разрешающая способность и чувствительность поперечных и продольных наводок отсчетных труб и микроскопов.....	28
4.3. Светящаяся точка.....	32
4.4. Структура изображения светящейся линии, ее поперечный размер.....	38
4.5. Структура изображения полуплоскости.....	40
4.6. Разрешающая способность.....	42
4.7. Чувствительность наводок.....	45
4.8. Способы выражения смещений при оптических измерительных наводках.....	46
Поперечные наводки.....	46
Продольные наводки.....	47
4.9. Практическая чувствительность поперечных наводок.....	48

4.10. Продольные наводки.....	52
4.11. Соотношение между чувствительностью продольных и поперечных наводок.....	55
4.12. Способы повышения чувствительности наводок.....	56
<b>5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>59</b>
<b>6. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....</b>	<b>60</b>

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

---

## **КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ**

Кафедра прикладной и компьютерной оптики является одной из крупнейших кафедр российских вузов, занимающихся задачами современной оптической науки.

Кафедра возникла при слиянии двух кафедр оптического факультета: кафедры теории оптических приборов и кафедры оптических приборов и компьютерной оптики. На кафедре обучают специалистов, имеющих самое широкое представление об оптике в целом – от проектирования оптических систем самого разного назначения до компьютерной обработки изображений и интерферограмм.

Овладение такими разнообразными знаниями невозможно без практической работы с приборами, и кафедра имеет в своем составе несколько учебно-исследовательских лабораторий.

В лаборатории оптических измерений и контрольно-измерительных приборов студенты получают знания и навыки в области метрологии, учатся измерять характеристики оптических систем и параметры деталей и материалов.

Лаборатория микроскопов и медицинских оптических приборов знакомит с различными типами микроскопов (поляризационными, биологическими, металлографическими), методами наблюдения микрообъектов и т.п., а также с приборами, применяемыми офтальмологами для диагностики зрения.

Лаборатория геодезических приборов позволяет получить начальные навыки работы с теодолитами, дальномерами, другими приборами, применяемыми в геодезии и картографии, узнать особенности проектирования различных их узлов и конструкций.

В лабораториях компьютерных средств контроля оптики и исследования качества оптического изображения занимаются проблемами контроля качества оптических поверхностей оптической системы в целом, а также компьютеризации и автоматизации этих процессов.



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.

За период существования кафедры было подготовлено более 150 кандидатов наук, из них 30 иностранцев, а также 16 докторов наук. Большинство научных и производственных подразделений в области прикладной оптики в России, а также многие – в США, Израиле и Китае возглавляют ученики нашей научной школы.

В настоящее время кафедра Прикладной и компьютерной оптики Факультета лазерной и световой инженерии Мегафакультета фотоники является одним из крупнейших подразделений Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ориентированным на выпуск высококвалифицированных специалистов в области оптотехники.

С информацией о кафедре можно ознакомиться на сайте: **[aco.ifmo.ru](http://aco.ifmo.ru)**

**Владимир Константинович Кирилловский**  
**Татьяна Вячеславовна Точилина**  
**Оптические измерения.**  
**Часть 1. Введение и общие вопросы.**  
**Точность оптических измерений**  
**Учебное пособие**

В авторской редакции

Дизайн

Верстка

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Подписано к печати 22.12.2016

Заказ № 3806

Тираж 50 шт.

Отпечатано на ризографе

Т.В. Точилина

Т.В. Точилина

Н.Ф. Гусарова

Редакционно-издательский отдел  
Университета ИТМО  
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49