

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

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

**В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина**

**ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ  
СБОРНИК ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ**

**Часть 2. Оценка качества оптического  
изображения**

**Учебно-методическое пособие  
к лабораторному практикуму по дисциплине  
«Оптические измерения»**



**Санкт-Петербург**

**2011**

Кирилловский В.К., Точилина Т.В. ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ. СБОРНИК ВОПРОСОВ И ЗАДАЧ. Часть 2. Оценка качества оптического изображения. Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму по дисциплине «Оптические измерения». – СПб: НИУ ИТМО, 2011. – 158 с.

В пособии представлена теория, вопросы и задачи. Ответы на вопросы и решение задач позволит закрепить знания, полученные при изучении дисциплины «Оптические измерения», глубже понять физический смысл лабораторного практикума и закрепить лекционный материал. Формулировке вопросов и задач предшествует краткое изложение соответствующего раздела оптических измерений, необходимые соотношения для выполнения численных расчетов при решении задач и требования к ответам на вопросы.

Учебное пособие предназначено для студентов оптических специальностей, изучающих методы оптических измерений по направлению подготовки 200400 «Опготехника», а также может быть полезным для инженерно-технических работников исследовательских лабораторий и для технологов оптического производства.

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

Рецензент: к.т.н., ст.н.с., зав. лабораторией АПОИ и ЭС (НИУ ИТМО)

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



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

© Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, 2011  
© В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина, 2011

## **Раздел 1. ТОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ**

### **Роль измерений в различных областях жизни**

Повышение качества промышленной продукции – надежный путь более полного удовлетворения потребностей народного хозяйства и ускорения научно-технического прогресса. В связи с этим постоянно возрастают требования к соблюдению метрологических правил и норм, направленных на повышение уровня измерений, их точности, надежности и производительности.

Повышение уровня измерений направлено на: повышение качества промышленной продукции; более полное удовлетворение потребностей народного хозяйства и общества; ускорение научно-технического прогресса. От точности и своевременности измерительной информации зависит правильность принимаемых решений. От качества измерений зависят: современные технологии и научные исследования; учет и экономия материальных ресурсов; техническая, экологическая и медицинская диагностика; крупные научные открытия.

Единство измерений и их требуемое качество контролируются и обеспечиваются государственными и ведомственными метрологическими службами.

К оптике нового класса могут быть отнесены оптические системы: космических телескопов; высококачественные объективы исследовательских микроскопов; объективы оптических приборов для технологий микроэлектроники; оптические системы лазерных устройств записи и воспроизведения информации; оптические системы для лазерных технологий, прежде всего при условии достижения предельно высоких оптических характеристик качества изображения, когда волновой фронт, сформированный оптической системой, не имеет отклонений свыше нескольких сотых долей длины световой волны от формы, соответствующей идеальному качеству изображения (чаще всего сферической). При этом, по концентрации энергии, изображение, построенное реальной оптической системой, должно лишь на несколько процентов отличаться от идеального, т.е. предсказанного теорией дифракции.

## Соотношение между метрологией и наукой о технических измерениях

В познании материального мира важную роль играют количественные оценки, позволяющие раскрывать действующие в природе закономерности, учитывать ресурсы, определять качественные стороны явлений, производимой продукции и других сторон человеческой деятельности. В обиходном смысле различного рода оценивание (например – оценивание знаний учащихся в баллах и т.д.) часто относят к измерениям. Однако, в научно-техническом смысле, к измерениям предъявляются строго определенные требования.

*Измерение* – совокупность операций по нахождению количественного значения физической величины опытным путем с помощью технического средства, хранящего единицу физической величины, заключающихся в сравнении измеряемой величины с ее единицей.

Предметами науки *метрологии* являются изучение и оптимизация измерений.

*Метрология* – область технической физики, являющаяся научной основой измерительной техники.

*Задачи метрологии:*

- обеспечение единства и правильности измерения физических величин;
- оценка достоверности результатов измерения;
- разработка новых методов и средств измерений;
- определение значений универсальных физических констант.

*Единство измерений* – такое состояние измерений, при котором:

- их результаты выражены в узаконенных единицах;
- погрешности измерений известны с заданной вероятностью.

Правильный размер каждой единицы физической величины определяется соответствующим единым государственным *эталоном*, воспроизводящим данную единицу с наивысшей точностью и передающим ее к рабочим средствам измерений через систему образцовых средств измерений.

*Метрологическая суть измерения* состоит в сравнении измеряемой физической величины с ее единицей, хранимой применяемым средством измерений; размер единицы физической величины передан средству измерений от нормативно утвержденного эталона или образцового средства измерений.

*Оценивание* обычно отличается от измерения, отсутствием технического средства, хранящего единицу измеряемой величины (связанную с эталоном), и неопределенностью в оценке погрешности, полученного значения оцениваемой величины.

*Специфика оптических методов измерений:* оптические методы измерений основаны на использовании оптических методов и устройств для извлечения измерительной информации об исследуемом объекте, или, другими словами, на использовании оптического сигнала для кодирования измерительной информации.

Так, в измерительном микроскопе информацию о геометрических координатах измеряемого объекта содержит распределение освещенности в его оптическом изображении; интерферометр позволяет судить о малых деформациях полированной поверхности, по изменениям формы (фазовой структуры) исследуемого волнового фронта оптического излучения, которые преобразуются интерферометром в изменения конфигурации интерференционных полос.

## Совокупные измерения

Одни и те же величины измеряют несколько раз, при этом от одного измерения к другому меняют сочетание измеряемых величин. Искомые значения величин находят решением системы уравнений, связывающих измеренные и искомые величины. Совокупные измерения позволяют, при необходимости, обойтись без аттестованного эталона. Пример – абсолютный метод измерения ошибок оптических поверхностей (пробных стекол), когда три пробных стекла последовательно накладывают друг на друга в разных сочетаниях.

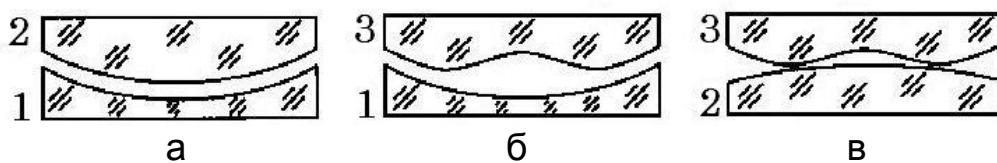


Рис. 1. Абсолютный метод измерения трех плоских пробных стекол

Абсолютный метод измерения трех плоских пробных стекол (рис. 1) состоит в том, что три пробных стекла (1, 2, 3) последовательно накладывают друг на друга в разных сочетаниях (а, б, в) и по возникающей интерференционной картине оценивают их относительные ошибки в числе  $N$  интерференционных колец. Затем составляют систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} N_1 &= x_1 + x_2, \\ N_2 &= x_1 + x_3, \\ N_3 &= x_2 + x_3, \end{aligned} \right\}$$

где  $x_1, x_2, x_3$  – абсолютные ошибки поверхностей, которые и находятся при решении системы.

Итак, совокупные измерения состоят в том, что искомую величину находят решением системы уравнений, составленной по результатам ряда прямых или косвенных измерений величин при различающихся условиях.

### Метод совпадений

Метод основан на сопоставлении двух периодических сигналов близкой частоты (верньеры, нониусы, муар-микрометры, стробоскопы) (рис. 2).

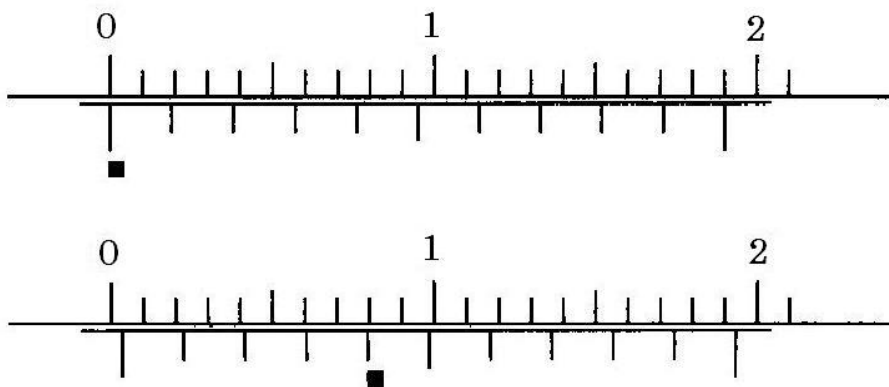


Рис. 2. Нониус

Коэффициент повышения точности определяется отношением числа делений нониуса к приращению числа делений (т.е. несущего периода к приращению периода)

$$M = \frac{N_{\text{Н}}}{N_{\text{Н}} - N_{\text{Ш}}},$$

где  $N_{\text{Н}}$  – число делений нониуса;  $N_{\text{Ш}}$  – соответствующее ему число делений шкалы.

## **Средства измерений. Эталоны. Образцовые и рабочие средства измерений**

Для обеспечения единства измерений требуется тождественность единиц, в которых проградуированы все средства измерений одной и той же физической величины, что достигается путем:

- точного воспроизведения и хранения единиц физических величин;
- передачи их размеров рабочим средствам измерений.

По метрологическому назначению средства измерений делятся на: эталоны; образцовые и рабочие средства измерения.

*Средство измерений* – техническое средство, предназначенное для измерений, имеющее нормированные метрологические характеристики, воспроизводящее или хранящее одну или несколько единиц физических величин, размеры которых принимаются неизменными в течение известного промежутка времени.

*Эталон* – средство измерений, обеспечивающее воспроизведение и хранение единицы измерения физической величины для передачи другим средствам измерений и официально утвержденное в качестве эталона.

*Образцовые средства измерений* – меры, измерительные приборы или измерительные преобразователи, предназначенные для поверки и градуировки по ним других средств измерений и официально утвержденные в качестве образцовых.

*Рабочие средства измерений* – средства применяются для измерений, не связанных с передачей размера единиц другим средствам измерений.

*Поверенный измерительный прибор* – прибор, прошедший государственную или ведомственную поверку; результатом поверки является определение и занесение в паспорт прибора основной и дополнительной погрешностей прибора.

## **Погрешности оптических измерений**

*Точность результата измерения* – характеристика качества измерения, отражающая близость к нулю погрешности его результата.

*Погрешность измерения* – интервал, в который с заданной вероятностью попадает отступление измеренного значения данного параметра от его истинной величины. Учитываются погрешности средств измерений, методические погрешности и результаты измерительных наблюдений.

При создании измерительной установки важно теоретически оценить ее точностные характеристики, предварительно рассчитав все известные составляющие погрешности данного измерения.

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ к Разделу 1**

1. Афанасьев В.А. Оптические измерения: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1981. – 229 с.
2. Еськова Л.М. Обработка результатов измерений. Краткие методические указания по получению результата измерений при выполнении лабораторных работ по курсу «Оптические измерения». – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. – 15 с.
3. Еськова Л.М. Оптические измерения: учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1984. – 90 с.
4. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
6. Лившиц Э.М. Оптические измерения и исследования оптических систем: учебное пособие по лабораторному практикуму. – Л.: ЛИТМО, 1988. – 96 с.
7. Лившиц Э.М. Оптические измерения: учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1985. – 88 с.
8. Основы метрологии: учебное пособие по курсу «Основы метрологии и планирование эксперимента / Гордов А.Н. и др. – Л.: ЛИТМО, 1983. – 423 с.
9. Селиванов М.Н., Фридман А.Э. и др. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 294 с.



## Раздел 2. ТЕОРИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ НАВОДОК

### Основы теории чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения

**Этапы оптического измерения.** В процессе оптического измерения обобщенно можно указать следующие основные этапы (рис. 3).

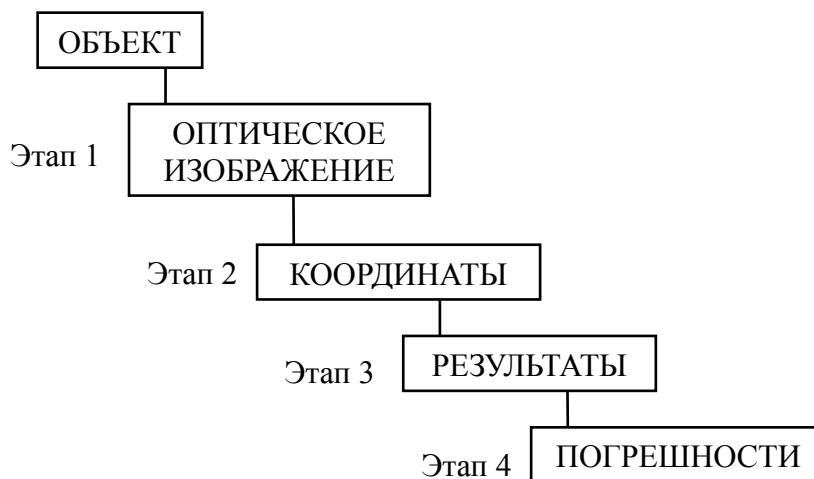


Рис. 3. Схема этапов оптического измерения

Этап 1. Создание оптического изображения, связанного с измеряемыми параметрами объекта (назовем такое изображение «оптико-измерительным изображением»).

Этап 2. Определение (измерение) координат элементов изображения.

Этап 3. Обработка результатов измерения изображения с целью определения необходимых параметров объекта.

Этап 4. Анализ погрешностей измерений, с целью определения точности полученных результатов.

Рассмотрим в качестве примера одну из простейших оптических измерительных схем с использованием оптического изображения измеряемого объекта: длина элемента малого объекта измеряется при помощи визирного измерительного микроскопа (рис. 4).

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

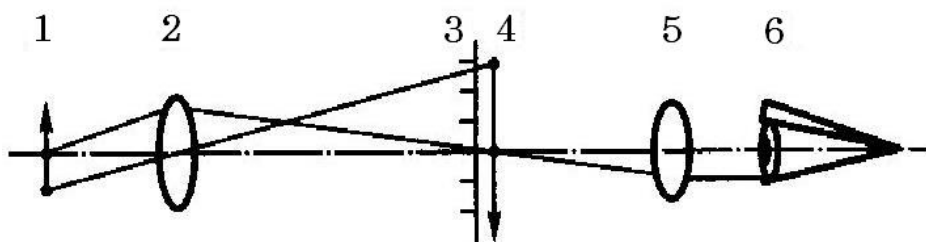


Рис. 4. Визирный измерительный микроскоп: 1 – объект; 2 – объектив микроскопа; 3 – измерительная шкала, совмещенная с плоскостью изображения объекта; 4 – изображение объекта; 5 – окуляр; 6 – глаз оператора измерений

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

В данном примере можно проследить все указанные в обобщенной схеме (рис. 3) этапы оптического измерения:

- объектив микроскопа 2 строит увеличенное изображение 4 объекта 1 (этап 1);
- координаты точек изображения, связанные с требуемыми точками объекта измеряются при помощи измерительной шкалы 3 (этап 2);
- результаты измерения получают (этап 3) обработкой измерительных отсчетов для определения протяженности объекта  $L_{об}$  по шкале окуляр-микрометра с учетом паспортной характеристики (увеличения  $V$ ) объектива микроскопа:  

$$L_{об} = \frac{(l_2 - l_1)}{V} \text{ (рис. 5);}$$
- погрешности определяют обработкой серии измерительных отсчетов (данных) с применением аппарата математической статистики (этап 4).

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

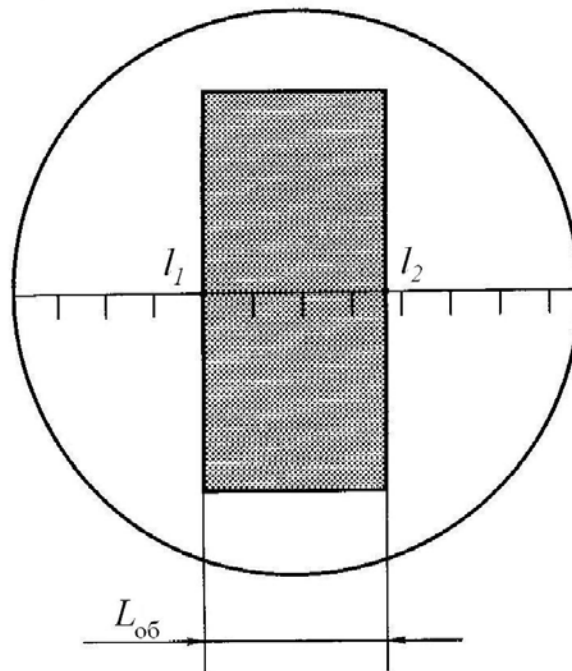


Рис. 5. Изображение в поле зрения измерительного микроскопа

Пользуясь измерительной шкалой (окуляр-микрометром), совмещенной с изображением объекта, мы считываем протяженность между интересующими нас точками объекта, например,  $l_1$  и  $l_2$  (рис. 5). Паспортной характеристикой микроскопа служит поперечное увеличение  $V$  в получаемом изображении объекта.

### **Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований**

Если обобщенно рассмотреть совокупность традиционных методов контроля и исследования оптических систем и элементов, то можно убедиться в том, что эти методы, в основном, сводятся к регистрации структуры волнового фронта, сформированного системой (деталью) в схеме контроля. Следующий шаг – исследование этой структуры, которая визуализируется в форме изображения того или иного вида (названного выше оптико-измерительным изображением), например, в виде интерференционных полос, теневой картины, совокупности пятен, составляющих диаграмму Гартмана, дифракционных изображений светящейся точки или линии и т.д. (рис. 6).

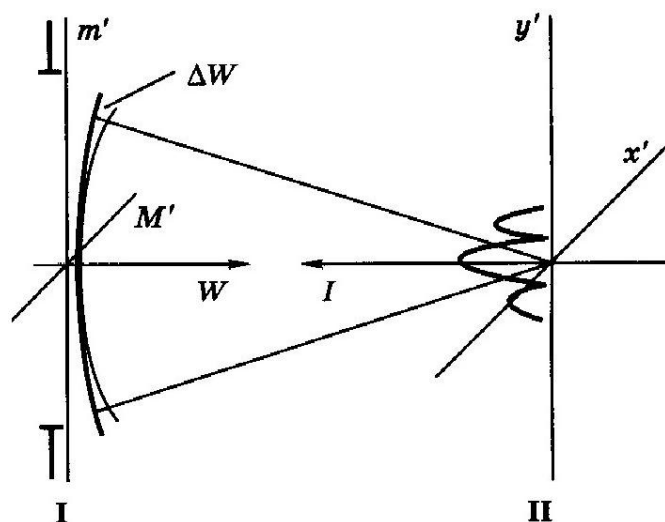


Рис. 6. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований:  $M'$  и  $m'$  – координаты на выходном зрачке оптического элемента в схеме;  $x'$  и  $y'$  – координаты в плоскости изображения тест-объекта;  $W$  – координата формы волнового фронта;  $I$  – относительная освещенность в изображении тест-объекта

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

1) В зоне зрачка I объектом исследования служит, чаще всего, фазовая характеристика волнового фронта, а именно – отклонение  $\Delta W$  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 аберрациях исследуемых оптических систем и элементов и об ошибках формы оптических поверхностей.

2) 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.

## Прямые и косвенные методы оценки качества изображения

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

*Прямые методы оценки качества изображения* состоят в наблюдении изображения тест-объекта, сформированного при помощи исследуемой системы в зоне II (зоне изображения, рис. 6), 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 (ОПФ), функция передачи модуляции (ФПМ) и функция концентрации энергии (ФКЭ) в изображении точечного тест-объекта, служат на практике количественными характеристиками качества изображения оптической системы.

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. Исходя из этого, в ответственных случаях, при исследованиях и измерениях оптических систем высокой точности, методы прямой и косвенной оценки качества изображения применяются совместно.

*Косвенные методы оценки качества изображения* состоят в измерении структуры деформаций волнового фронта в зоне I (зоне зрачка, рис. 6), на выходе оптической измерительной схемы, и последующем вычислении на основе полученной карты волнового фронта функций, описывающих структуру и качество оптического изображения.

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

К ограничениям косвенных методов следует отнести: высокую трудоемкость расшифровки данных; сложный математический аппарат обработки данных; дорогостоящее программное обеспечение. Кроме того при таких методах 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.

### **Тест-объект типа «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 типа «светящаяся точка» – пятно рассеяния или дифракционный кружок (рис. 7).

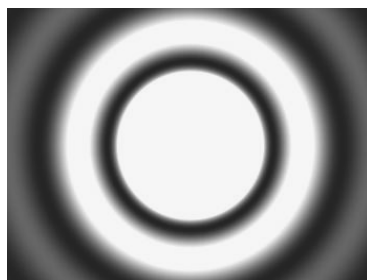


Рис. 7. Дифракционный кружок

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

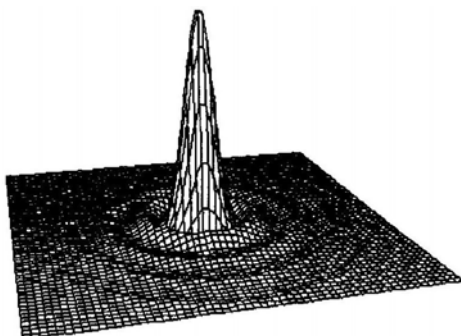


Рис. 8. Функция рассеяния точки

Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта типа «светящаяся точка» – двумерная функция, носящая название 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 флюктуации оптических характеристик воздушного тракта, непрерывно изменяющиеся во времени по сложному случайному закону. ФРТ позволяет надежно аттестовать качество изображения системы с несколькими зрачками. ФРТ, являясь первичной характеристикой качества изображения, позволяет перейти к другим требуемым характеристикам качества изображения, таким как ФРЛ; частотно-контрастная характеристика (ЧКХ); краевая функция; ФКЭ и другие.

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

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

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

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

Общий вид графика ФРЛ показан на рис. 9. Видно, что данная функция квазиодномерна.

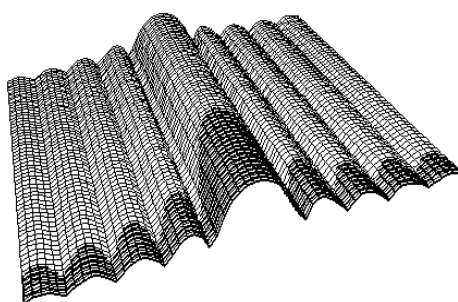


Рис. 9. Функция рассеяния линии

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

### **Тест-объект типа «полуплоскость»**

*Тест-объект типа «полуплоскость»* материализуется в виде прямолинейного края непрозрачной заслонки (лезвия) на освещенном фоне. При необходимости охарактеризовать 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 типа «полуплоскость» (рис. 10) – квазиодномерная функция скачка.



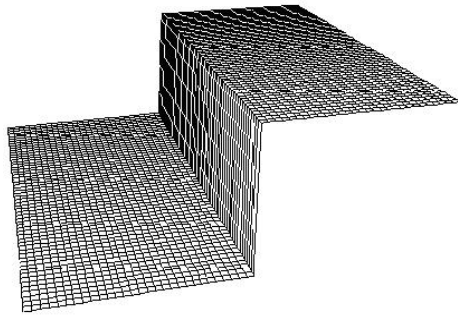


Рис. 10. Распределение яркости в тест-объекте типа «полуплоскость»

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

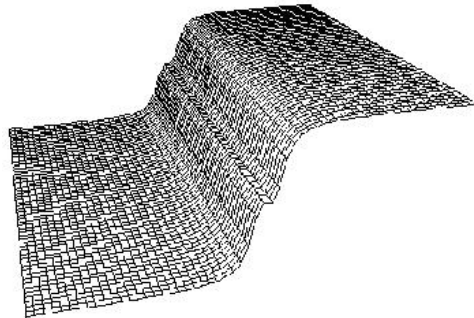


Рис. 11. Функция края

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

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

*Тест-объект типа «линейная решетка»* материализуется в виде ряда темных (непрозрачных) прямолинейных параллельных штрихов на освещенном фоне. Функция, описывающая распределение яркости в тест-объекте типа «линейная решетка» – 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.

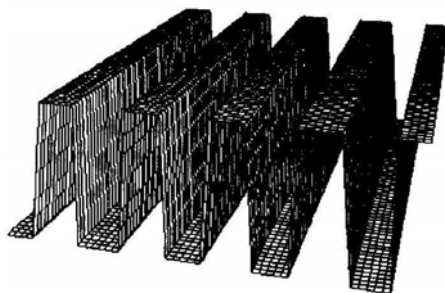


Рис. 12. Распределение интенсивности в тест-объекте типа «линейная решетка»

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

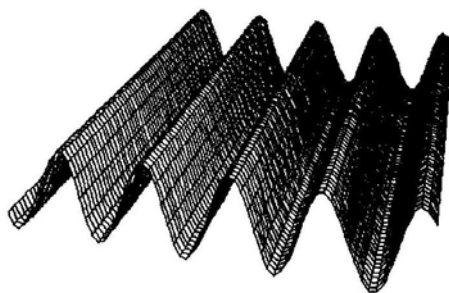


Рис. 13. Распределение интенсивности в изображении «линейной решетки»

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

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

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

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

## Оптические измерительные изображения второго рода

**Теневая картина (тенеграмма).** Революцию в оптическом контроле и измерениях совершил Жан Бернар Леон Фуко (1819–1868 г.г.), впервые предложивший метод исследования деформаций волнового фронта, связанных с абберациями оптических систем и ошибками оптических элементов.

*Метод «ножа Фуко»*, и вообще, все теневые методы доказали свою исключительную полезность для контроля оптических поверхностей. Абберации, дифракция света и ошибки изготовления оптических поверхностей вызывают отклонение лучей от теоретических траекторий и 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 абберациям оптической системы или ошибкам оптической поверхности, в плоскости схождения парааксиального 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.

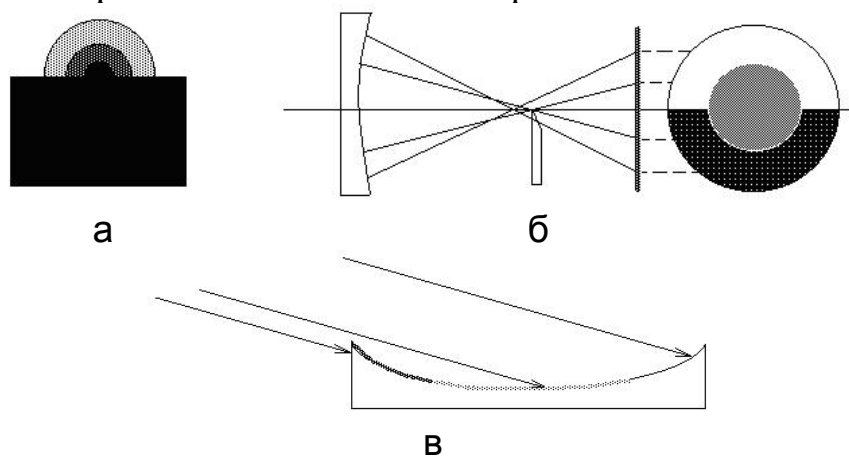


Рис. 14. Принципиальная схема теневого метода Фуко

При отсутствии ошибок зеркало, создающее изображение точечного тест-объекта, выглядит равномерно освещенным. Наличие ошибок (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».

Если «нож» находится за фокусом, направление перемещения темного участка меняется на противоположное. При введении «ножа» точно в фокус зеркало затемняется внезапно по всему диаметру, без каких-либо заметных движений теневой картины. Это является 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:

- впервые получена возможность визуальных наблюдений малых деформаций волнового фронта на выходе из системы;
- высокая чувствительность, порядка  $0,1\lambda$ ;
- наглядность, позволяющая наблюдать характер искажения волнового фронта, место расположения, форму, величину, протяженность деформаций волнового фронта и ошибок обрабатываемой оптической поверхности.

К недостаткам можно отнести, не преодоленные до конца, трудности количественной интерпретации теневого изображения, в результате чего метод в настоящее время применяется преимущественно для технологического контроля в форме качественных оценок состояния оптических поверхностей и материалов, а также уровня 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 теоретическим 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, выходящие из системы и создающие в схеме контроля изображение тест-объекта типа «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 фотопластинок 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-ой фотопластинке сгруппируются на краю, а на 2-ой они сдвинутся к центру. Если измерить расстояние между пятнами, и если известно расстояние до фотопластинок, из подобия треугольников можно определить точки схождения лучей и пересечения ими оптической оси.

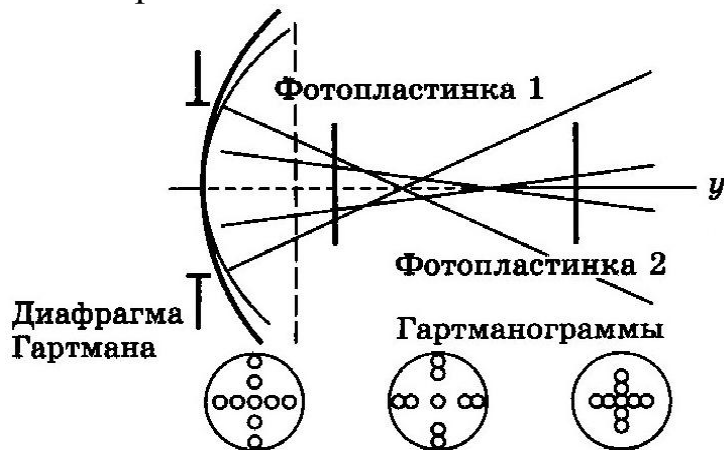


Рис. 15. Метод Гартмана

Итак, диафрагма Гартмана (рис. 15) 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).

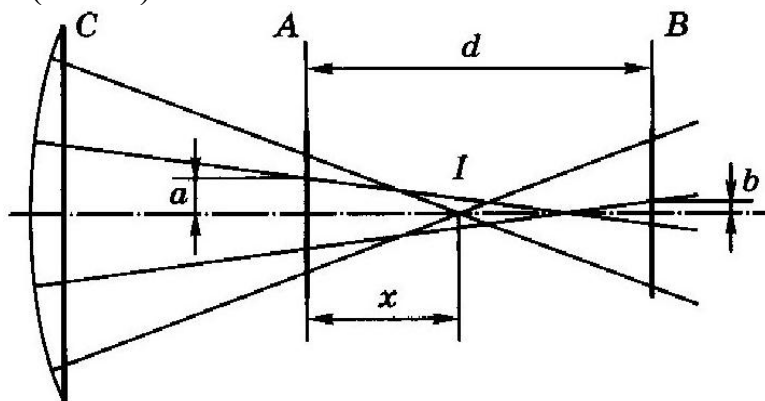


Рис. 16. Схема метода Гартмана:  $d$  – расстояние между предфокальным и зафокальным положениями фотопластинок;  $a$  – расстояние между следом оптической оси и следом данного луча (пятном) на предфокальной фотопластинке  $A$ ;  $b$  – соответствующее расстояние на зафокальной фотопластинке

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

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

Достоинства метода:

- возможность количественного определения (измерения) aberrаций и деформации волнового фронта;
- метод прост (используется точечный источник света, диафрагма и две фотопластинки);
- метод позволяет исследовать параметры оптической системы прибора непосредственно по наблюдаемому объекту, т.е. в рабочем положении.

Недостатки метода.

- Отсутствие наглядности.
- Необходимо измерение координат пятен гартманогаммы с точностью порядка 1 мкм; для этого применяется дорогостоящая двумерная измерительная машина (например, «Ascogrecord»). Фундаментальным недостатком является пространственная дискретность данных по зрачку, так как метод построен на выделении из общего волнового фронта отдельных пучков лучей, что является пространственным пределом интервала, в котором можно расположить отверстия. Получается лишь информация о макродеформациях волнового фронта; информация о мелкоструктурных деформациях поверхности здесь отсутствует.
- Виброчувствительность: если элементы схемы вибрируют, то будет вибрировать и пятно рассеяния, а, следовательно, и все пучки лучей синхронно, что приводит к дополнительной нерезкости пятен гартманогаммы и снижает точность измерений. Если имеются флуктуации воздушного тракта, а значит и волнового фронта, то пятна будут вибрировать случайным образом, что также снижает точность измерений.

**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,  $n$  – число проходов лучей через систему.

Начало XX века ознаменовалось развитием методов бесконтактной интерферометрии. В 1916 году Фрэнк Твайман (1876–



1959 г.) сообщил о методе интерферометрии aberrаций 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.

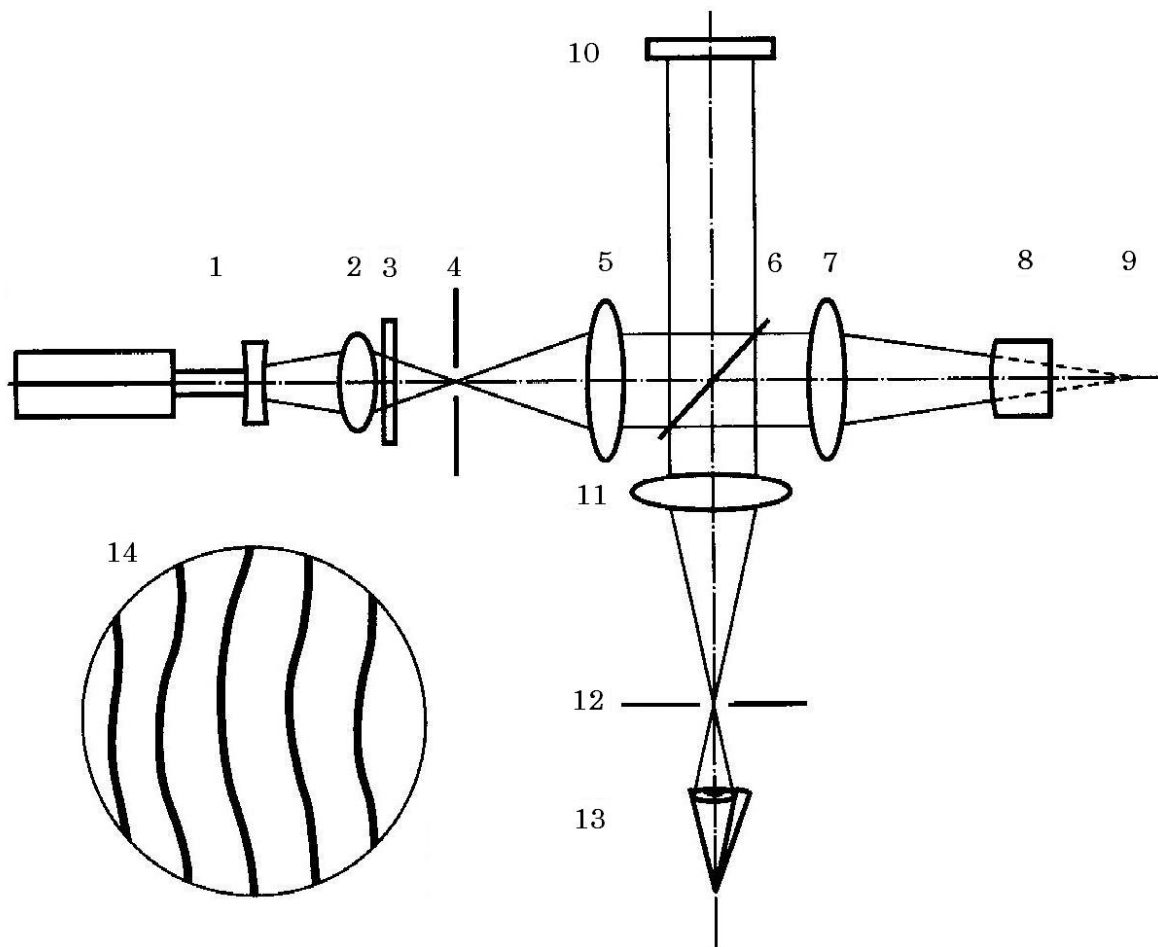


Рис. 17. Интерферометр Тваймана для исследования объектива: 1 – лазер; 2 – осветительная система; 3 – светофильтр; 4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив; 6 – светоделитель; 7 – исследуемый объектив; 8 – автоколлимационное сферическое зеркало; 9 – центр кривизны автоколлимационного сферического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

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

Влияние турбулентности воздуха обычно устраняют, контролируя систему в камере с частичным вакуумом. Воздействие вибраций можно уменьшить до допустимого уровня применением противовибрационных устройств. Впрочем, такое решение становится экономически неоправданным при контроле систем большого

диаметра или с большим фокусным расстоянием. В этих случаях полезно использовать скоростную регистрацию интерференционной картины (например, видеозапись) и последующую покадровую расшифровку.

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

## **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 (которое наводится на изображение измерительной марки) с оптическим изображением объекта (на которое выполняется измерительная наводка). Итак, измерительное наведение (наводка) – 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.

## **Разрешающая способность и чувствительность поперечных и продольных наводок отсчетных труб и микроскопов**

В приборах, использующих оптико-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.

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

- а) того, на которое наводятся (изображение измеряемого объекта);
- б) 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:

- а) изображение края;
- б) 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

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. 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 следуют и умеренные требования к оптической конструкции окуляра.

В связи с этим 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.

Оптические системы, применяемые в оптических измерительных приборах, имеют качество изображения, обусловленное, в основном, дифракцией. Таким образом, 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.

Распределение интенсивности оптического излучения, обусловленное влиянием дифракции, характеризуется плавными функциональными зависимостями (например, рис. 8 – ФРТ, рис. 9 – ФРЛ, 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* – 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;
- aberrации;
- 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 aberrации 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.

## 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%) находится вблизи геометрического изображения точки (рис. 18).

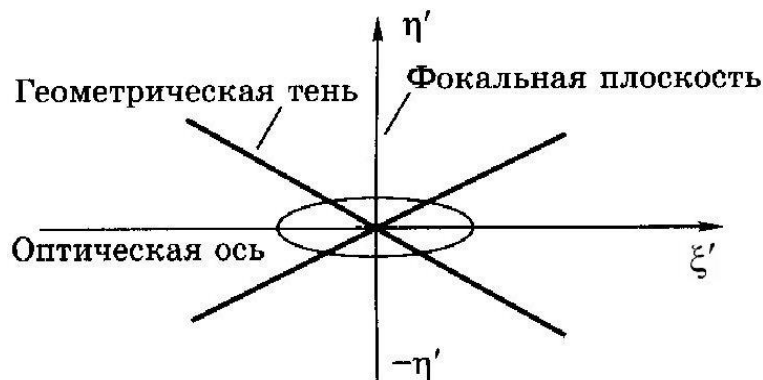


Рис. 18. Дифракционное распределение энергии в зоне пространства вблизи геометрического фокуса, где создается изображение точки

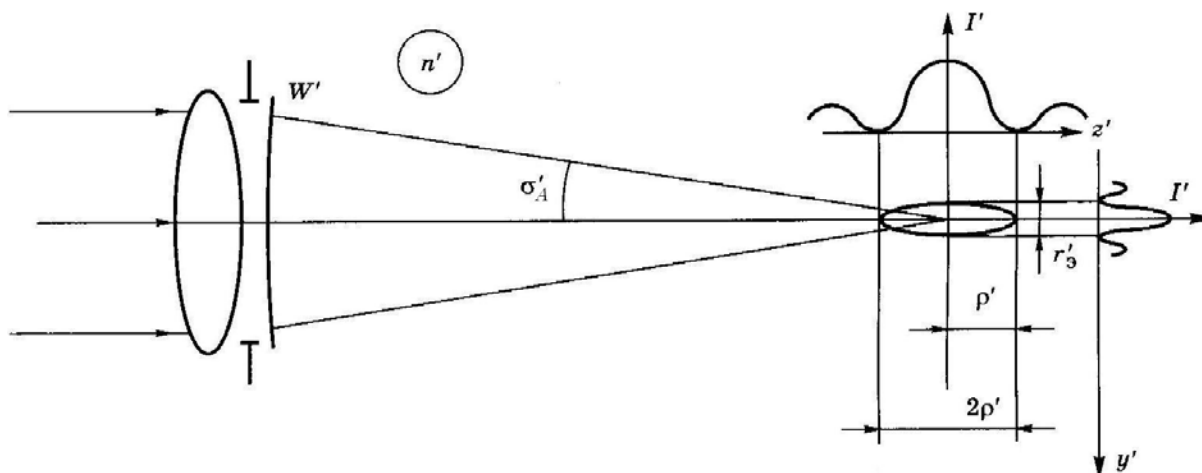


Рис. 19. Размеры дифракционного тела

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:

$$A' = n \sin \sigma'_A, \quad (2)$$

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

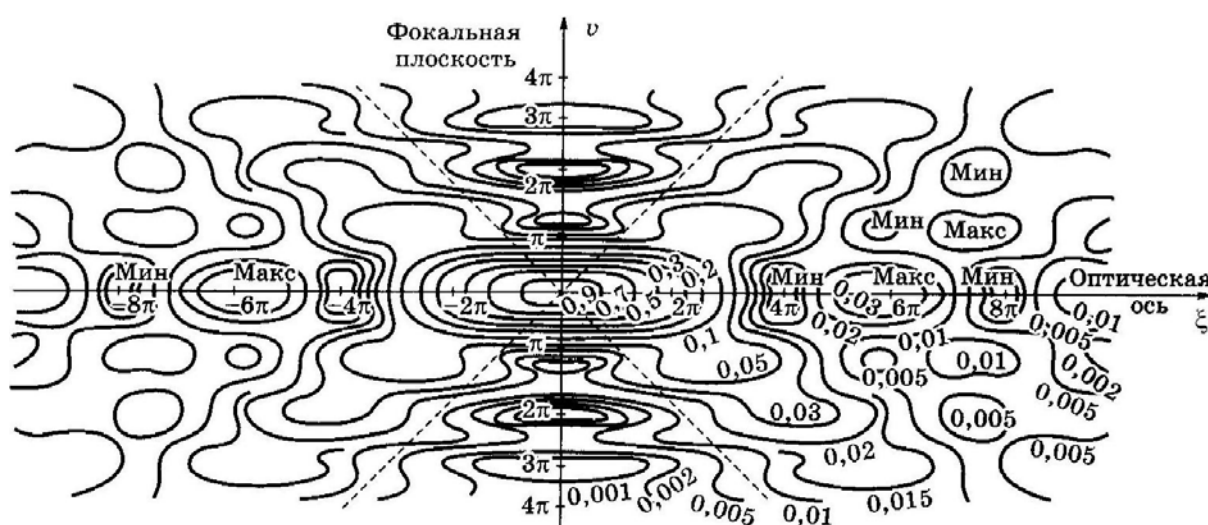


Рис. 20. Структура распределения интенсивности вблизи геометрического центра кривизны сходящейся сферической волновой поверхности

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:

$$\eta' = \frac{A'y'}{\lambda}, \quad (3)$$

$$\xi' = \frac{A'^2 z'}{\lambda n}, \quad (4)$$

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

В формулах (3) и (4)  $\sin A'$  заменен на  $A'$ , так как оптические системы измерительных приборов, как правило, имеют небольшую выходную апертуру, а для углов менее  $30^\circ$  градусов 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  $\xi' = \xi$ .

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. 19 приведено меридиональное сечение такого изображения. Так как качество изображения в идеальной системе определяется, в основном, концентрацией энергии в пределах центрального максимума дифракционного распределения, то 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 или нормированной ФРТ:

$$h(\eta') = \left[ \frac{2J_1(2\pi\eta')}{2\pi\eta'} \right]^2 = \text{Bes} \sin c^2[2\pi\eta'], \quad (5)$$

где  $J_1$  – функция Бесселя 1-го рода, 1-го порядка;  $Bes \sin c^2[2\pi\eta']$  – мнемоническое обозначение функции.

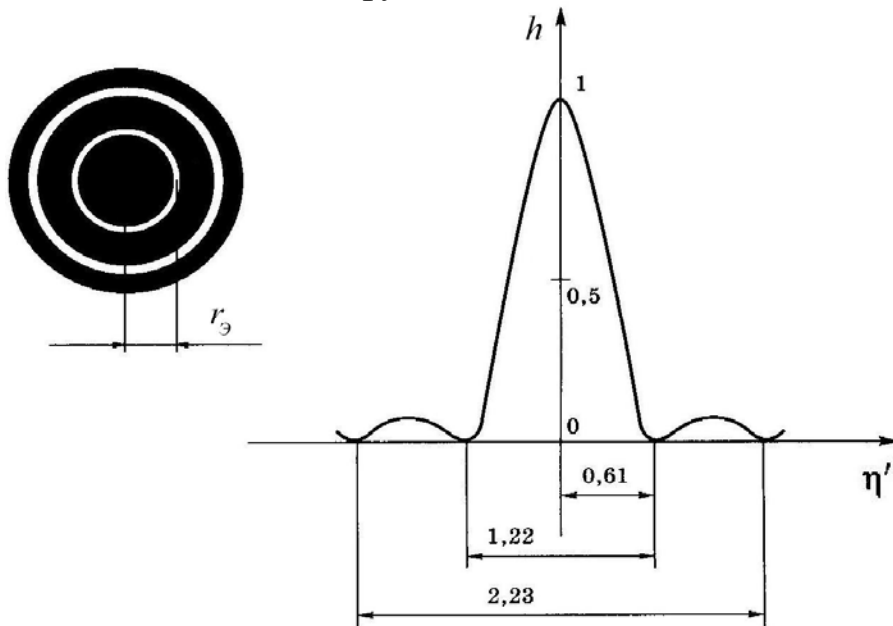


Рис. 21. Дифракционное изображение точки, его структура

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

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

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

Нормированная двумерная ФРТ позволяет описать только структуру изображения, абстрагируясь от масштабных и энергетических параметров.

Используя выражение (5), можно найти радиус  $r_Э$  диска Эри. Из (3) находим

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

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

$$r'_Э = \left[ \frac{0,61\lambda}{A'} \right], \text{ мм.} \quad (6)$$

Угловой размер радиуса Эри составляет:

$$\Psi'_{\text{Э}} = \left[ \frac{1,22\lambda}{n'D'} \right], \text{ рад}, \quad (7)$$

где  $D'$  – диаметр выходного зрачка.

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

$$r'_{\text{Э}} = \left[ \frac{0,34}{A'} \right], \text{ мкм},$$

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

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 (5)–(7) 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. Исходя из этого, для пространства предметов можно определить размер дифракционного изображения, если заменить в формулах  $A'$  на  $A$ :

$$r = \frac{0,61\lambda}{A}, \quad (8)$$

$$\rho = \frac{2\lambda}{A^2}. \quad (9)$$

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:

$$h(\xi') = \left[ \frac{\sin(\pi\xi'/2)}{\pi\xi'/2} \right]^2. \quad (10)$$

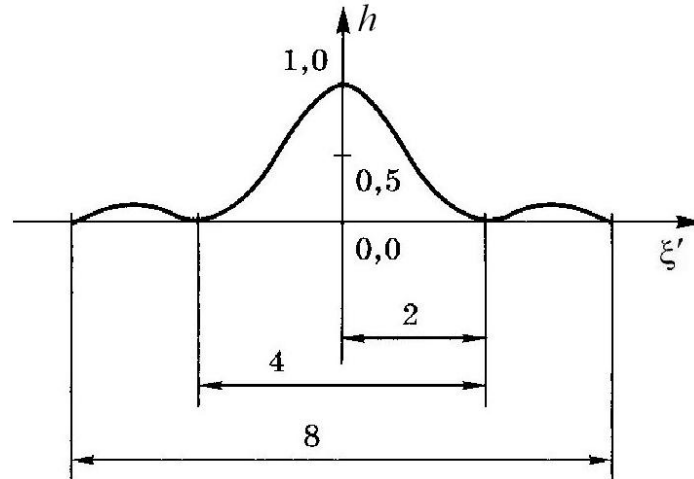


Рис. 22. Расфокусировочная кривая идеальной оптической системы

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

$$\sin^2 c^2 \left[ \frac{\pi\xi'}{2} \right].$$

Первый минимум интенсивности функции (10) возникает при  $\xi' = 2$  на расстоянии  $\rho'$  от центра изображения. Тогда продольный размер центральной фигуры дифракционного изображения точки:

$$\rho' = \frac{2\lambda n'}{A'^2}. \quad (11)$$

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.

### Структура изображения светящейся линии, ее поперечный размер

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.

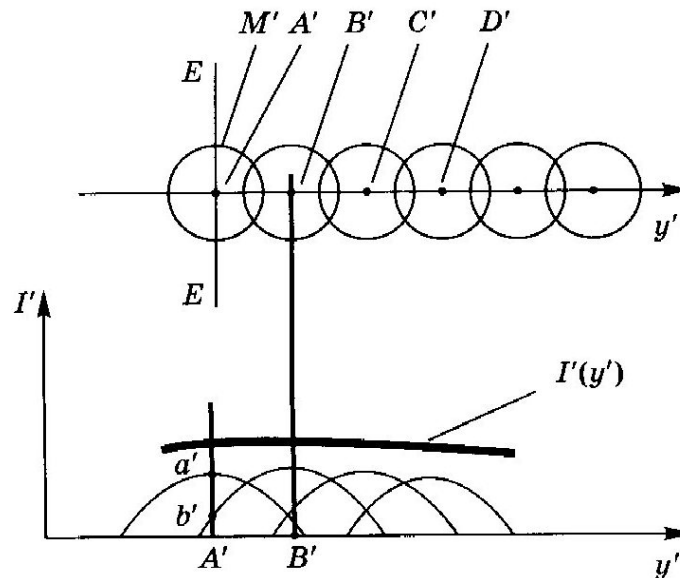


Рис. 23. Функцию распределения интенсивности в любом сечении, перпендикулярном линии, можно получить сложением ординат ФРТ

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.

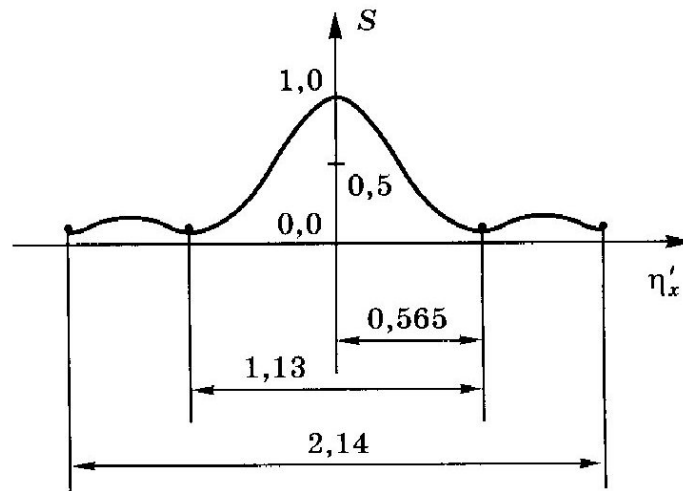


Рис. 24. Распределение интенсивности в изображении бесконечно тонкой светящейся линии

$$S(\eta'_x) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\eta'_x \eta'_y) d\eta'_y = H_1 \frac{4\pi\eta'_x}{(2\pi\eta'_x)^2}, \quad (12)$$

где  $H_1$  – функция Струве 1-го порядка.

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:

$$r'_л = \left[ \frac{0,565\lambda}{A'} \right], \text{ мм}, \quad (13)$$

$$\psi'_л = \left[ \frac{1,13\lambda}{n'D'} \right], \text{ рад}. \quad (14)$$

При  $\lambda = 0,555 \text{ мкм}$ , имеем

$$r'_л = \left[ \frac{0,32}{A'} \right], \text{ мкм},$$

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

## Разрешающая способность

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

Согласно *критерию Рэля* – расстояние, при разрешении пары светящихся точек, равно радиусу дифракционного изображения точки, 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, освещенность которой на 24% меньше освещенности в максимуме.

Такая перемычка будет еще заметна для наблюдателя, но при дальнейшем сближении точек их изображения сольются. Следовательно, пороговое разрешение по Рэлю для пары светящихся точек (точечных объектов в пространстве предметов для средней длины волны) составит:

$$\varepsilon = r = \frac{0,32\lambda}{A}, \text{ мкм} \quad (15)$$

или в угловой мере

$$\varphi = \left( \frac{138}{D} \right)'' \quad (16)$$

Формула (16) используется для определения предельного разрешения телескопических систем.

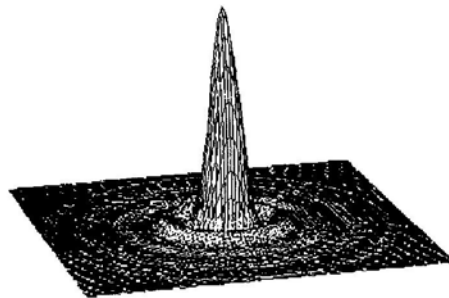


Рис. 25. Структура изображения светящейся точки

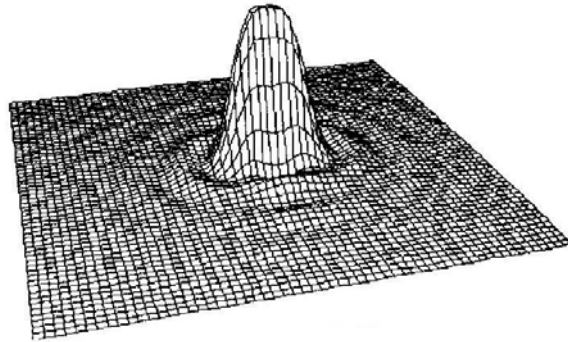


Рис. 26. Структура изображения пары светящихся точек, расположенных ближе порога разрешения

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.

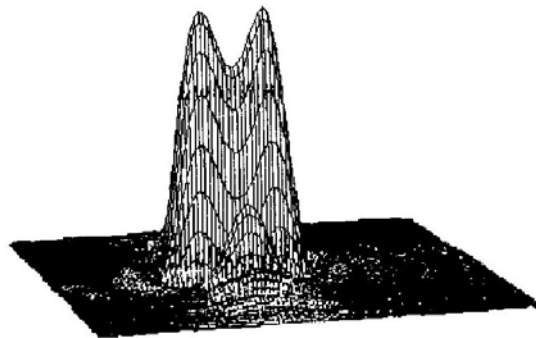


Рис. 27. Структура изображения пары светящихся точек, расположенных на расстоянии порога разрешения

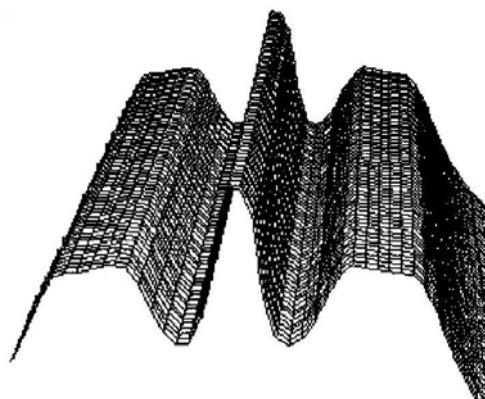


Рис. 28. Распределение освещенности в изображении темного штриха, совмещенного с биссектором (точная наводка)

В случае линейчатых объектов (темные штрихи) разрешающая способность безабберационных оптических приборов несколько выше. Каждая линия может рассматриваться как совокупность точек



(рис. 28), 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. В связи с этим оптические изображения двух близко расположенных параллельных линий не будут сливаться и при меньшем расстоянии (рис. 29, 30). Экспериментально установлено, что для пары светящихся линий справедливы формулы линейного (17) и, соответственно, углового (18) разрешения:

$$\varepsilon_p = \frac{0,29}{A}, \text{ мкм}, \quad (17)$$

$$\varphi = \left( \frac{120}{D_p} \right)'' \quad (18)$$

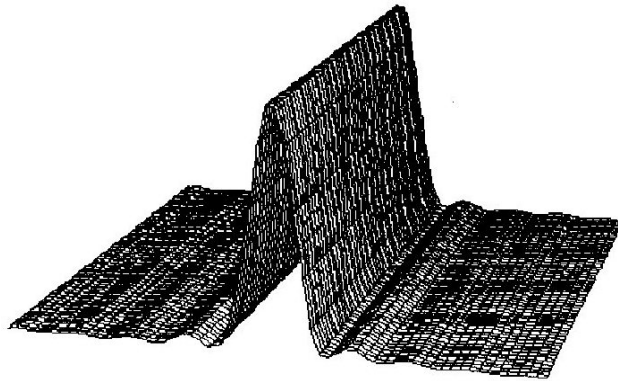


Рис. 29. ФРЛ идеальной оптической системы (квазиодномерная функция  $[\sin(x)/x]^2$ )

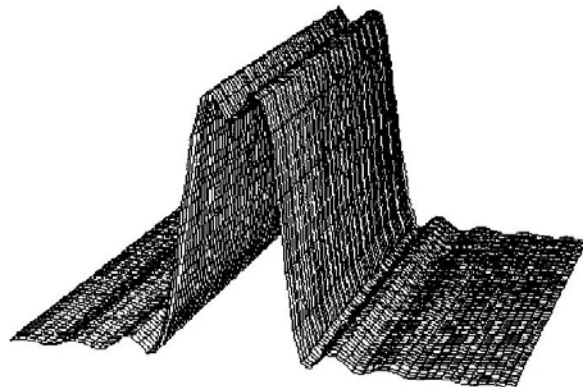


Рис. 30. Структура изображения двух близко расположенных линий, иллюстрирующая порог разрешения пары линий

## 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 двух изображений:

- изображения базы анализатора (роль которого могут играть перекрестие окулярной сетки или штрих окулярной шкалы);
- 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:

- смещение изображения анализатора (например, сетки) относительно изображения элемента объекта;
- фиксация положения совмещения этих двух изображений;
- выполнение 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.

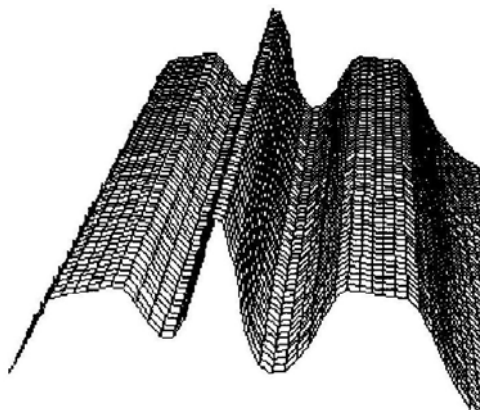


Рис. 31. Распределение освещенности в изображении темного штриха, совмещенного с биссектором (неточная наводка)

Например: совмещение штриха с биссектором характеризуется формированием суммарного изображения, структура которого

показана на рис. 28 и рис. 31. 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. 1).

Таблица 1. Практическая чувствительность поперечных наводок

Форма совмещаемых объектов	Точность совмещения, с
Наложение штрихов друг на друга; совмещение перекрестья 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

Так как визуальные приборы работают совместно с глазом, то, прежде всего, рассмотрим чувствительность невооруженного глаза для различных случаев. Экспериментальные данные приведены в табл. 1. Сравним приведенные данные с угловым разрешением глаза, которое при диаметре зрачка, равном 2 мм, составляет:

$$\varphi_{\text{гл}} = \left( \frac{120}{2} \right)'' = 60'' . \quad (19)$$

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

$$\tau_{\text{гл}} = (0,5 - 0,1)\varphi_{\text{гл}} . \quad (20)$$

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. 29 и рис. 32), 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:

$$\Delta E \varepsilon_{\Pi} = (0,02 - 0,03). \quad (21)$$

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

$$\tau = (0,5 - 0,1)\varphi, \quad (22)$$

где  $\varphi$  – угловой предел разрешения прибора.

Или, в линейной мере для плоскости объекта

$$T = (0,5 - 0,1)\varepsilon_p, \quad (23)$$

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

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

$$T = \frac{1}{6}\varepsilon_p = \frac{0,29}{6A}, \quad (24)$$

т.е.

$$T = \frac{0,05}{A}, \text{ мкм.} \quad (25)$$

$$\text{Для зрительных труб } \tau = \left( \frac{120}{6D_p} \right)''$$

или

$$\tau = \left( \frac{20}{D_p} \right)'' \quad (26)$$

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, 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ к Разделу 2

1. Афанасьев В.А. Оптические измерения: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1981. – 229 с.
2. Еськова Л.М. Обработка результатов измерений. Краткие методические указания по получению результата измерений при выполнении лабораторных работ по курсу «Оптические измерения». – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. – 15 с.
3. Еськова Л.М. Оптические измерения: учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1984. – 90 с.
4. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
5. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 1: учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 40 с.
6. Коломийцев Ю.В. Интерферометры. Основы инженерной теории, применение. – Л.: Машиностроение, 1976. – 296 с.
7. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
8. Лившиц Э.М. Оптические измерения: учебное пособие по лабораторному практикуму. – Л.: ЛИТМО, 1987. – 114 с.
9. Основы метрологии: учебное пособие по курсу «Основы метрологии и планирование эксперимента» / Гордов А.Н. и др. – Л.: ЛИТМО, 1983. – 423 с.
10. Селиванов М.Н., Фридман А.Э. и др. Качество измерений. Метрологическая справочная книга. – Л.: Лениздат, 1987. – 294 с.

### Раздел 3. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК

Традиционные методы контроля оптических характеристик объективов, определяющих качество изображения, во многом основаны на визуальных оценках. Для оценки передающих свойств объектива широко используется измерение разрешающей способности – традиционного и наиболее распространенного критерия качества оптических приборов.

Производить оценку качества объектива на основе остаточных aberrаций недостаточно. Оценка качества изображения и разрешающей силы производится на оптической скамье с помощью штриховой линейной миры (рис. 32).

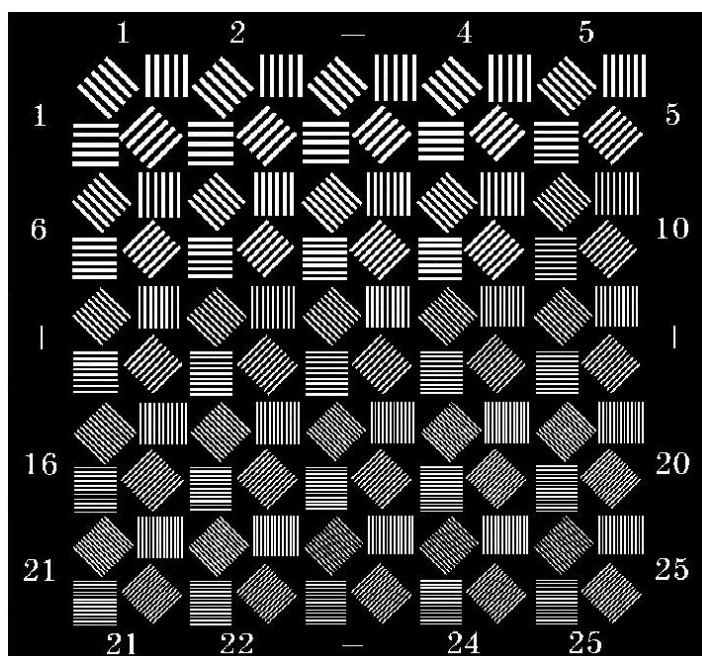


Рис. 32. Изображение миры

Рассмотрим процесс оценки качества изображения. Хорошо исправленный объектив типа анастигмата, при полной диафрагме, должен давать резкое изображение миры на совершенно черном фоне, без ореола, белесоватого тона, без раздвоения, окрашивания и искажения рисунка миры.

Белесоватый тон неодинаковой яркости получается, если падающий из объектива свет не концентрируется в фокальной плоскости, а рассеивается по всему полю зрения. *Ореолом* называют некоторое рассеяние света вокруг изображения объекта, в результате которого граница раздела не очерчена резко, а несколько размыта.

Эффект раздвоения изображения может быть результатом несовершенной центрировки оптической системы фотообъектива.

Наличие у краев изображения предмета цветной каймы указывает на остаточную хроматическую aberrацию. Так как образование ореолов говорит нам о наличии сферической aberrации, то интересно проследить, при какой диафрагме исчезают ореолы, чтобы знать величину отверстия объектива, исправленного в отношении сферической aberrации.

Под *разрешающей силой объектива* подразумевается то наименьшее угловое расстояние между двумя точками, при котором объектив еще в состоянии их разрешить и дать в фокальной плоскости изображение в виде двух отдельных точек.

*Критерием разрешающей силы объектива* служит тот квадрат, у которого можно свободно различить светлые и темные полосы, расположенные в разных квадратах по различным направлениям, и определить их количество.

Как правило, каждый сложный фотообъектив типа анастигмата, прежде чем будет выпущен на рынок, проверяется заводом. Следовательно, необходим такой метод испытания, который, с одной стороны, гарантировал бы качественную сторону испытания, с другой – не требовал бы много времени и был по возможности прост. Чаще всего испытание состоит в фотографировании проверяемым объективом специальной крупномасштабной миры или таблицы.

Традиционные методы актуальны и в условиях современного серийного производства.

Однако повышенные требования к качеству изображения, создаваемого объективом, приводят к тому, что исследования объективов и контроль их оптических характеристик, определяющих качество изображения, уже нельзя выполнить на базе только визуальных измерений. В частности, для оценки передающих свойств объектива недостаточно измерения разрешающей способности, а требуется более полная, количественная и объективная информация о качестве оптического изображения.

Визуальные методы контроля качества изображения трудоемки и утомительны. Результаты измерений зависят от психофизиологических особенностей испытателя. Кроме того, визуальные методы нельзя использовать для непосредственного определения оптических характеристик объективов, применяемых для создания изображения в невидимой области спектра.

В связи с этим современные средства контроля объективов развиваются в направлении создания методов и аппаратуры, дающих однозначные количественные результаты и не зависящих от индивидуальных особенностей зрения испытателя.

## **Понятие качества изображения оптической системы**

До недавнего времени в области прикладной оптики наиболее широко были приняты оценки оптической системы, основанные на геометрической оптике, т.е. на измерении геометрических aberrаций системы, например, известным методом Гартмана.

Оценки оптической системы, основанные на измерениях геометрических aberrаций, оправдывают себя на практике в тех случаях, когда aberrации столь велики, что при определении качества изображения дифракция играет незначительную роль. Однако прогресс оптической технологии и проектирования, применение персонального компьютера (ПК) при расчете оптических систем позволяют сегодня получать оптические системы все более высокого качества.

Важной задачей является измерение действительной структуры изображения, построенного системой, и сопоставление полученного результата с предельно достижимым, предсказанным на основании расчета. Например, разрешающая сила не всегда является, безусловно, правильным критерием качества изображения, построенного оптической системой. Исследованиями показано, что во многих случаях наилучшее с точки зрения практики изображение получается не в плоскости максимальной разрешающей силы, на которую ориентируется расчетчик, а в другой плоскости, которую можно назвать плоскостью максимального контраста. В ней формируется изображение с наиболее крутыми градиентами освещенностей.

Естественно, не все ошибки системы можно устранить на стадии расчета, так как проектирование высококачественной и сложной оптической системы требует, несмотря на использование ПК, большого объема кропотливых и трудоемких работ. Подчас на практике затруднительно продолжать эту работу за пределами того этапа, на котором получается удовлетворительное качество.

До недавнего времени не было экспериментальных средств, при помощи которых можно было бы точно определить распределение энергии в пятне рассеяния. А это значит, что невозможно было установить, какое распределение освещенности в пятне рассеяния



соответствует оптимальному качеству изображения того объекта, для регистрации которого предназначена данная система.

Первичной характеристикой качества оптического изображения является функция распределения освещенности в изображении светящейся точки. Тест-объектом при таком испытании системы служит освещенная круглая диафрагма малого диаметра или ее уменьшенное изображение. Диаметр точечного источника, используемого при количественных исследованиях высокоточных систем, должен быть, на порядок меньше диаметра дифракционного кружка, который способна построить исследуемая система в обратном ходе лучей, что можно выразить соотношением:

$$d = \frac{0,122\lambda}{A}, \quad (27)$$

где  $A = \sin \sigma$  – передняя апертура оптической системы в схеме контроля (в случае исследования фотообъектива  $A$  – апертура коллиматора);  $\lambda$  – длина волны света в схеме контроля.

Полученные экспериментальные данные о распределении освещенности в изображении точки для данной системы необходимо проанализировать, сопоставив их с характеристиками дифракционного пятна для идеальной системы данной апертуры.

Экспериментальное исследование и измерение характеристик качества изображения имеет большое значение для выпуска оптических систем высшего качества и новых классов точности, а также для развития современных высоких технологий. К оптическим системам новых классов относятся, например, оптические системы космических телескопов; современных исследовательских микроскопов; объективы для технологий микроэлектроники и для оптической записи и воспроизведения информации.

## **Способы оценки оптических систем**

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

Сведения о структуре изображения, построенного изготовленной оптической системой, могут быть получены прямым и косвенным

методами. *Методы прямой оценки* состоят в наблюдении изображения тест-объекта, сформированного при помощи исследуемой системы, и измерении фотометрической структуры этого изображения. В качестве тест-объектов обычно используются: освещенная точечная диафрагма; узкая щель; полуплоскость; линейная и радиальная решетки абсолютного контраста; решетка с синусоидальным законом распределения яркости. Данные измерений позволяют определить значения таких критериев качества изображения, как разрешающая способность; пороговый контраст; концентрация энергии и т.д.

Эти величины могут быть получены при необходимости и косвенным методом – при математической обработке данных о форме волнового фронта, сформированного в зрачке исследуемой системы. Преимущества косвенных методов состоят в том, что они позволяют по известной топографии отклонений фронта волны рассчитать большинство характеристик качества изображения. Результаты, полученные этими методами, не зависят от особенностей приемника изображения в схеме контроля. *Косвенные методы* дают возможность определить влияние конкретных искажений волнового фронта, вносимых системой, на качество изображения, что служит предпосылкой широкого применения косвенных методов в условиях производства, например, при обработке оптических поверхностей; изготовлении оптических элементов и юстировке оптических систем.

В ряде случаев косвенные методы обеспечивают высокую точность измерения отдельных характеристик системы, например, концентрации энергии в изображении, если этому не препятствуют ограничения, присущие таким методам.

К ограничениям косвенных методов следует отнести трудоемкость расшифровки данных для их ввода в ПК (этот процесс трудно полностью автоматизировать); сложный математический аппарат обработки данных, требующий использования наиболее современных компьютеров и сложного, дорогостоящего программного обеспечения.

Но главное, что при таких оценках не учитывается влияние на качество изображения ряда факторов, действующих при изготовлении оптической системы, например, таких, как:

- малые дефекты оптических поверхностей, возникающие в процессе обработки, например, при ретуши астрономических зеркал;
- нечистота и шероховатость оптических поверхностей;

- мелкоструктурные свили и неоднородности оптических материалов при работе в проходящем свете;
- дефекты оптических покрытий и дефекты склеек в оптических компонентах;
- светорассеяние и блики в оптической системе и в приборе.

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

С точки зрения потребителя, эксплуатирующего оптическую систему, строящую изображение, важнейшая задача контроля – измерение действительной структуры изображения, построенного системой, и сопоставление полученного результата с характеристикой, предсказанной на основании расчета.

Как отмечено выше, одним из первых способов прямой оценки качества изображения системы, широко применяемым до сих пор, является наблюдение и измерение структуры изображения светящейся точки. В наши дни этот метод широко применяется для контроля качества вогнутых сферических поверхностей; оптики микроскопов; высококачественных фотообъективов; объективов зрительных труб и т.д. Исследуемая оптическая система при этом устанавливается так, чтобы образовалось действительное изображение светящейся точки, которое рассматривают в окуляр или в микроскоп.

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

Если контролируемый волновой фронт, образованный исследуемой системой, искажен ошибками, это вызывает перераспределение энергии в дифракционных кольцах и искажение формы дифракционного кружка.

В практике контроля оптических систем по виду дифракционной точки иногда достаточно установить сам факт отклонения контролируемой поверхности от идеальной формы. При этом оценка погрешностей имеет, конечно, ориентировочный характер. Экспериментальные данные о распределении освещенности в изображении точки, построенном данной системой, часто

анализируются сопоставлением с характеристиками дифракционного пятна для идеальной системы данной апертуры.

При испытании оптической системы, которая обладает значительными остаточными aberrациями и изображает точку в виде пятна рассеяния, не имеющего отчетливой дифракционной структуры, часто пользуются способом измерения видимого диаметра пятна рассеяния по окуляр-микрометру наблюдательного микроскопа. Измеренный диаметр сопоставляется с диаметром первого темного кольца дифракционного кружка. Следует отметить, что диаметр кружка рассеяния, измеренный таким образом, зависит не только от формы распределения освещенности в кружке, но и от светового потока в схеме контроля. Таким образом, полученные результаты, несмотря на свою численную форму, пригодны лишь для сравнительной качественной оценки в сопоставимых условиях, чаще всего – для наблюдения изменений структуры изображения в ходе обработки данной поверхности.

В ряде случаев структура распределения освещенности в пятне рассеяния, и концентрация энергии в заданном диаметре являются аттестационными характеристиками прибора. Это касается, например, астрономических телескопов и оптико-электронных приборов.

Напоминаем, что функция, описывающая двумерное распределение освещенности в изображении точки, называется ФРТ данной системы.

Обозначим ее как  $h(x', y')$ , где  $x'$  и  $y'$  – прямоугольные координаты в плоскости изображения.

Понятие функции рассеяния распространяют и на изображение линии. В качестве элементарного объекта используется не точка, а светящаяся линия. Применение такого тест-объекта позволяет при экспериментальном определении функции рассеяния увеличить световой поток в схеме контроля. Кроме того, ФРЛ может быть получена как результат интегрирования ФРТ по одному из направлений:

$$h_{\text{л}}(x') = \int_{-\infty}^{\infty} h(x', y') dy'. \quad (28)$$

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». Распределение яркости

$L_n(y)$  в таком объекте описывается функцией скачка. Принимая контраст равным единице, имеем

$$L_n(y) = 1 \text{ при } y \leq y_0,$$

$$L_n(y) = 0 \text{ при } y > y_0.$$

График функции распределения освещенности в изображении пограничного теста  $h_k(y')$  называют «пограничной кривой» или переходной функцией.

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. Одномерную функцию рассеяния можно получить (считая увеличение  $V = 1$ ), дифференцируя переходную функцию:

$$h_n(y') = \frac{dh_k(y')}{d(y')} . \quad (29)$$

Следовательно, ФРЛ может быть получена дифференцированием пограничной функции.

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 широко используется визуальная оценка по различимости штрихов в изображении штриховой миры, построенной системой, например на фотоматериале. *Критерием разрешающей способности* при этом служит частота того поля миры, в изображении которого можно уверенно различить темные и светлые штрихи и определить их количество.

С другой стороны, возникли и развиваются методы исследований, характеризующие форму волнового фронта в зрачке оптической системы. Первым из них был теневой метод. Дальнейшее развитие методов испытания оптических поверхностей привело к созданию Гартманом метода для оценки ошибок волновой поверхности по данным, полученным по ряду локальных точек на зрачке.

При интерферометрическом методе, проблема исследования оптической системы ставится как задача о деформациях, претерпеваемых поверхностью световой волны. Особое преимущество интерферограммы состоит в том, что при определенных условиях может быть получена интерференционная картина, подобная топографической карте исследуемой волновой

поверхности, где изолинии уровня (горизонтали) представлены в виде полос с разностью хода, кратной длине волны.

## Передача изображения через оптическую систему

Значение функции рассеяния  $h(x', y')$ , характеризующей закономерность распределения освещенности в изображении светящейся точки, дает возможность рассчитать распределение интенсивности в изображении  $I(x', y')$  при заданном распределении яркости объекта  $O(x, y)$ .

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

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

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

$$I(x', y') = \iint_O O(x, y) h(x' - x, y' - y) dx dy. \quad (30)$$

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

$$I = O \otimes h. \quad (31)$$

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

В современной теории образования изображения применяется и второй способ представления объекта, заключающийся в том, что объект рассматривается как сумма элементарных объектов, яркость в которых распределена по синусоидальному закону. Таким образом, объект представляется в виде суперпозиции синусоидальных решеток, различающихся амплитудой, пространственной частотой и фазой, т.е. расположением на плоскости. При рассмотрении особенностей изображения оптической системой синусоидального объекта

обнаруживается, что его изображение также является синусоидальной решеткой. Изображение сложного объекта получается суммированием изображений синусоидальных составляющих.

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

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

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

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

Найдем преобразование Фурье двумерного объекта:

$$O(\mu, \nu) = \iint_{-\infty}^{\infty} o(x, y) e^{-2\pi i(\mu x + \nu y)} dx dy, \quad (32)$$

где  $\nu$  – пространственная частота,  $\text{мм}^{-1}$ .

Эту операцию можно записать сокращенно:

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

Аналогично для функции двумерного изображения

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

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

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

$$i(\mu, \nu) = o(\mu, \nu) D(\mu, \nu), \quad (33)$$

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

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

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

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

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

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

$$D(y', z') = \left[ \frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2, \quad (34)$$

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

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

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

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

где  $\sigma'$  – апертурный угол в пространстве изображений.

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

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

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

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



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

Представляют также интерес величины освещенности при различных значениях величины  $Z$ :

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

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

$$r_0 = \frac{0,61\lambda}{A'}. \quad (35)$$

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

Теперь рассмотрим более подробно ОПФ. Из уравнения (33) видим, что преобразование Фурье-распределения освещенности в изображении  $i(\mu, \nu)$  отличается от преобразования Фурье-функции распределения яркости в объекте  $o(\mu, \nu)$  коэффициентом  $d(\mu, \nu)$ , который и назван ОПФ и является преобразованием Фурье ФРТ. Таким образом, ОПФ может быть представлена в виде:

$$d(\mu, \nu) = \iint_{-\infty}^{\infty} D(y, z) e^{-2\pi i(\mu y + \nu z)} dy dz. \quad (36)$$

Для одномерного тест-объекта (освещенной щели) имеем:

$$d(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} D(y) e^{-2\pi i\mu y} dy. \quad (37)$$

Пользуясь формулой Эйлера

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

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

$$\begin{aligned} d_{\Pi}(\mu) &= \int_{-\infty}^{\infty} D_{\Pi}(y) \cos \pi\mu y dy - i \int_{-\infty}^{\infty} D_{\Pi}(y) \sin \pi\mu y dy = \\ &= T_c(\mu) - iT_s(\mu). \end{aligned} \quad (38)$$

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

$$d_{\text{л}}(\mu) = T(\mu)e^{i\varphi(\mu)}. \quad (39)$$

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

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

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

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

$$O(y) = b_0 + b_1 \cos 2\pi\mu y, \quad (40)$$

где  $b_0$  – средняя яркость;  $b_1$  – амплитудное значение яркости;  $\mu$  – частота.

Распределение освещенности в изображении объекта

$$I(y) = b_0 + b_1 T_{\mu} \cos(2\pi\mu y - \varphi). \quad (41)$$

Выражения (40) и (41) отличаются появлением фазового угла  $\varphi$ , показывающего смещение изображения – фазовый сдвиг, и изменением амплитуды  $b_1$  в  $T_{\mu}$  раз.

Используем формулу для определения контраста синусоидального объекта:

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} = \frac{b_1}{b_0}, \quad (42)$$

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

Определим контраст объекта

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

Для изображения

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

отсюда коэффициент изменения амплитуды

$$T_{\mu} = \frac{K_I}{K_o}. \quad (43)$$

Значение МПФ на фиксированной частоте называют коэффициентом передачи контраста (КПК).

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

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

## Критерии оценки качества оптического изображения

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

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

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

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

Обозначив расстояние между точками в объекте как  $\varepsilon$ , определим контраст в изображении пары точек:

$$K = \frac{I(y=0) - I\left(y = \frac{\varepsilon}{2}\right)}{I(y=0)} \geq K_{\text{п}}, \quad (44)$$

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

Две точки объекта различаются, если контраст в их изображении больше или равен пороговому контрасту приемника. Если разрешение

удовлетворяет критерию Рэля, то центральный максимум первой точки накладывается на первый минимум второй точки. При этом контраст в изображении пары точек составляет 22,5%.

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

$$R = \frac{1,64A'}{\lambda}, \quad (45)$$

где  $A'$  – задняя апертура исследуемой системы.

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

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

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

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

3. *Разрешающая способность* является удобным критерием для оценки объективов, предназначенных для различения малых деталей объекта. В настоящее время этот критерий используется при контроле качества большинства кинофотообъективов. Его ограниченность состоит в том, что во многих случаях передача деталей, близких к пределу разрешения, не влияет решающим образом на оценку изображения.

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

$$J = \frac{1}{\mu_{\text{пр}}} \int_0^{\mu_{\text{пр}}} T(\mu) d\mu, \quad (46)$$

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

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

При оценке оптических систем для телевидения используется соотношение

$$\mu_{\text{кр}} = \frac{n}{2h_r}, \quad (47)$$

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

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

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

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

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

$$L_K = \frac{F_d}{F}, \quad (48)$$

$$F_d = \int_0^{\frac{d}{2}=r} D(r) r dr, \quad (49)$$

где  $D(r)$  – ФРТ.

С другой стороны, вся энергия в пятне рассеяния:

$$F = \int_0^{\infty} D(r)rdr . \quad (50)$$

Величины  $F_d$  и  $F$  в ряде случаев могут быть непосредственно измерены фотометром. Кроме того, их можно определить математической обработкой ФРТ, методика измерения которой рассмотрена в табл. 2.

Таблица 2. Концентрация энергии для ФРТ идеальной системы

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

### Задача исследования структуры пятна рассеяния

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

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

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

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

2) При оценке качества изображения большой интерес представляет способ прямого измерения структуры изображения точечного тест-объекта. Экспериментально найденная ФРТ, характеризуя качество системы, позволяет учитывать все особенности волновой поверхности, сформированной системой, в том числе и характер микрорельефа оптических поверхностей; дефекты оптических материалов; блики; отклонения пропускания (или отражения) на зрачке; сдвиги изображения, возникающие при работе прибора и т.д. С помощью ФРТ в усредненной и мгновенной форме

можно учитывать флуктуации оптических характеристик воздушного тракта, непрерывно изменяющиеся во времени по сложному случайному закону. ФРТ позволяет надежно аттестовать качество изображения системы с несколькими зрачками.

3) ФРТ, являясь первичной характеристикой качества изображения, позволяет перейти к требуемым характеристикам качества изображения, таким, как: ФРЛ; ЧКХ; краевая функция; ФКЭ и другие.

### Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния

Контроль линзовых систем производится в проходящем свете (рис. 33).

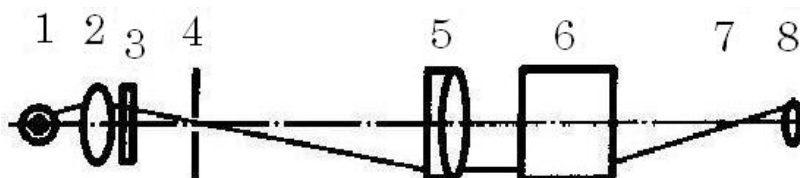


Рис. 33. Контроль линзовых систем

Свет от источника *1* проходит конденсор *2*, светофильтр *3* и собирается в точечную диафрагму *4*, расположенную в фокальной плоскости коллиматора *5*; параллельный пучок лучей, выходящий из коллиматора в контролируемый объектив *6*, фокусируется в его фокальной плоскости *7*; изображение точки рассматривается в микроскоп *8*, *9*. Отверстие диафрагмы, которая устанавливается в фокальной плоскости коллиматора, должно удовлетворять соотношению (27). При этом достигается максимальная чувствительность контроля.

При контроле качества изображения по полю, апертура микрообъектива определяется из соотношения

$$\sin \sigma_m = \sin(\sigma'_0 + \beta'), \quad (51)$$

где  $\sigma_m$  – апертурный угол микрообъектива;  $\sigma'_0$  – апертурный угол контролируемого объектива;  $\beta'$  – полевой угол, при котором наблюдается дифракционный кружок.

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

Традиционные методы экспериментального исследования и измерения ФРТ и ФРЛ реальных оптических систем обобщенно можно распределить на две группы:

- 1) методы фотографической фотометрии;
- 2) методы фотоэлектрического сканирования.

Обе группы традиционных методов основаны на использовании приемников излучения (или приемников изображения), обладающих плавной, монотонно возрастающей световой характеристикой.

## Фотографическая фотометрия

Фотографический процесс, используемый в оптической измерительной системе, имеет ряд существенных достоинств:

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

Рассмотрим основные характеристики фотографического процесса применительно к задаче исследования структуры оптического изображения. Светочувствительность фотослоя имеет иной характер, чем чувствительность к свету человеческого глаза или фотоэлектрического приемника. Если последние в обычных условиях реагируют на мгновенное значение яркости объекта, то фотографическая эмульсия реагирует на общее количество световой энергии, которое в фотографической практике называют *экспозицией* и обозначают как  $H$ . При этом действует соотношение:



$$H = Et, \quad (52)$$

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

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

$$D_{\Pi} = \lg \frac{I_0}{I} = \lg \frac{1}{\tau}, \quad (53)$$

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

Оптическая плотность почернения является функцией логарифма экспозиции:

$$D_{\Pi} = f[\lg(Et)]. \quad (54)$$

Кривая взаимосвязи между измеренным почернением и наложенной экспозицией называется *характеристической кривой фотоматериала* (рис. 34). Этот график строится в осях  $D_{\Pi}$  и  $\lg(Et)$ .

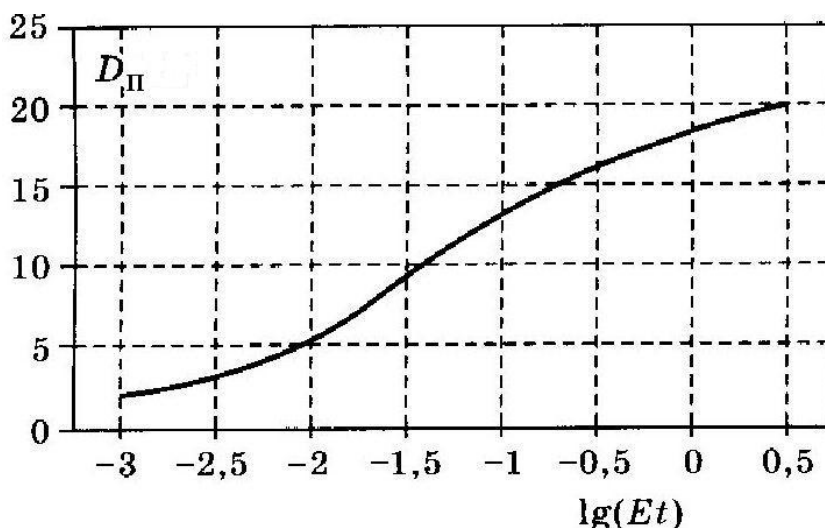


Рис. 34. Характеристическая кривая фотографического материала

Вся характеристическая кривая может быть разделена на четыре участка. Начало характеристической кривой с постоянным почернением небольшой плотности – так называемая вуаль, которая появляется после проявления на участках фотоматериала, не

подвергшихся действию света. Область недодержек характеризуется нелинейной зависимостью плотности от экспозиции. Рабочая часть – прямолинейный участок – характеризуется зависимостью

$$D_{\text{п}} = \gamma \lg(Et), \quad (55)$$

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

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

На практике, как правило, в выражении (54) значение  $t = \text{const}$ , т.е. экспонируется все изображение целиком и время экспозиции всех его участков одинаково, в этом случае характеристическая кривая отражает зависимость:

$$D_{\text{п}} = f(\lg E), \quad (56)$$

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

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

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

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

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

Для восстановления по фотографическим изображениям функции распределения освещенности в оптическом изображении, прежде всего, измеряют распределение оптической плотности в фотоизображении, используя для этой цели микрофотометр. Сигнал с микрофотометра поступает на самописец и записывается на движущейся ленте в виде

графика  $D_{\Pi}(y')$ . Далее, исходя из характеристической кривой, по значениям плотностей определяют уровни освещенности, после чего график  $D_{\Pi}(y')$  преобразуют в искомую ФРТ.

Для сокращения этих преобразований и выполнения их в один этап полезно характеристическую кривую фотоматериала в ее рабочем варианте строить сразу в осях  $D_{\Pi} = f(E)$ . После преобразования результатов микрофотометрирования через эту характеристику получаем сразу график ФРТ. Разумеется, он будет верен только в пределах линейного участка и частично начального и конечного участков исходной характеристической кривой  $D_{\Pi} = f(\lg E)$ .

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

Полученная функция будет верно отображать искомое распределение освещенности в исследуемом оптическом изображении только в пределах диапазона освещенностей, соответствующего протяженности проекции на ось прямолинейного участка характеристической кривой (рис. 35). Эта величина для реальных фотоматериалов соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую  $10^2$ .

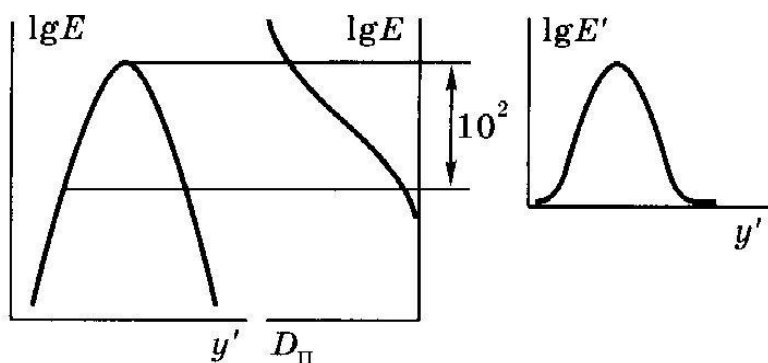


Рис. 35. Схема метода фотографической фотометрии пятна рассеяния для определения ФРТ

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

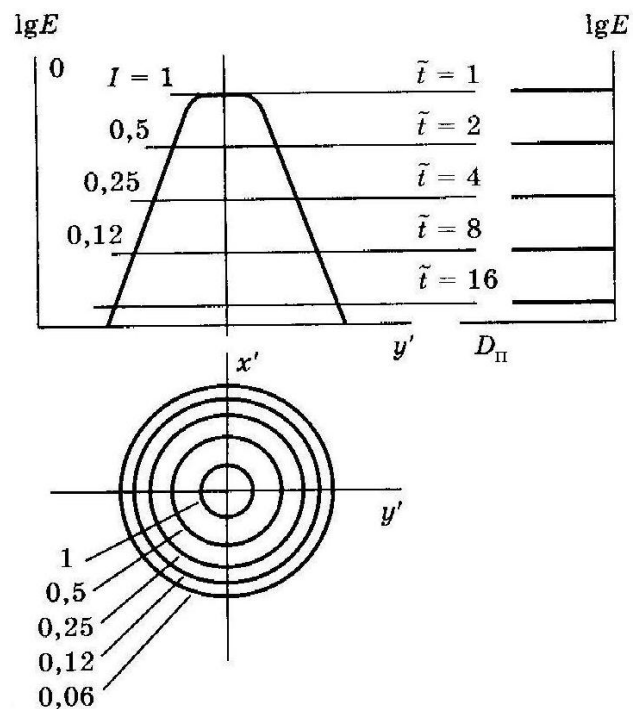
Попытки расширения указанного диапазона фотографическими средствами путем снижения величины  $g$ , давая незначительный выигрыш в расширении диапазона регистрируемых освещенностей, ведут к нарушению линейности световой характеристики и усилению вредного влияния фотографических шумов на результаты измерений.

## Изофотометрия с изменяющимся временем накопления

Для определения ФРТ разработаны изофотометрические методы экспериментального анализа пятна рассеяния, сформированного при работе реальной (изготовленной) оптической системы. Эти методы позволяют регистрировать перепады освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более пяти порядков ( $10^5$ ); строить кривые распределения освещенности в любом сочетании, а также топограмму распределения освещенности; вычислять ФКЭ (концентрацию энергии в пятне) и ФПМ. Методы были весьма эффективно использованы при контроле 6-ти метрового зеркала крупнейшего в мире телескопа (Большого Телескопа Азимутального (рис. 36, а)) и ряда других крупных астрономических систем. Эти методы нашли применение для контроля (по ФКЭ в пятне рассеяния) оптических материалов; проведения контроля оптики прецизионных микроскопов; оптических систем для фокусировки лазерных пучков; объективов для передающей телевизионной аппаратуры и других различных оптических систем.



а



б

Рис. 36. Астрономическое зеркало диаметром 6 метров (а); схема метода изофотометрии с переменным временем накопления (б)

Принцип метода изофотометрии с переменным временем накопления (рис. 36, б) удобно объяснить на основе фотографического варианта.

Метод фотографической изофотометрии основан на получении серии фотоснимков пятна рассеяния с переменным временем экспозиции. На одном куске фотоматериала экспонируются изображения фотометрических сечений оптического изображения точки вместе с изображением эталонного дифракционного кружка.

ФРТ характеризуется плавным распределением освещенности. В то же время, при проведении изофотометрического измерения ФРТ получают лишь ограниченное число значений функции в ряде характерных точек. Например, распределение освещенности в оптическом изображении пятна рассеяния можно охарактеризовать конечным числом замкнутых кривых – изофот. Каждая *изофота* – геометрическое место точек, имеющих различные пространственные координаты и равное значение координаты относительной освещенности. Формирование изофоты исследуемого оптического изображения осуществляется благодаря применению приемника изображения, обладающего ФП типа «импульс».

Как показывают проведенные исследования, для получения системы изофот (изофотограммы) исследуемого распределения освещенности необходимо использовать ФП типа «гребенка» (по латински – СОМВ) (рис. 37, б). Эта функция имеет вид ряда равномерно расположенных импульсов.

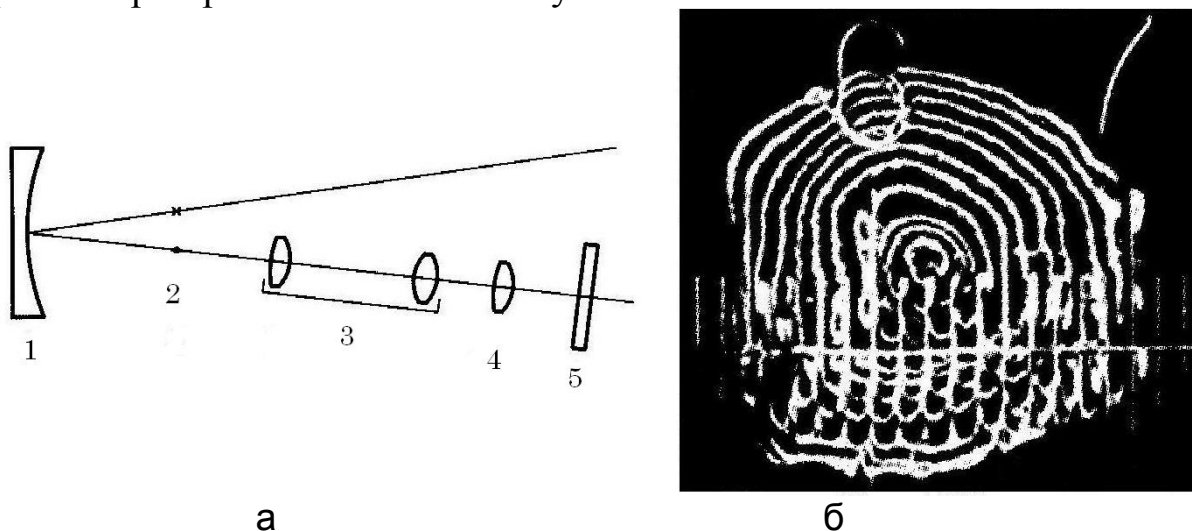


Рис. 37. Принципиальная схема технологического контроля астрономического зеркала методом фотографической изофотометрии (а): 1 – зеркало; 2 – точка; 3 – микроскоп; 4 – фотообъектив; 5 – фотоматериал; вид изофотограммы (б)

Итак, выполняется регистрация данного оптического изображения в виде серии последовательных кадров при осуществлении ряда

экспозиций различной длительности. Удобно этот ряд экспозиций располагать по шкале длительностей, значения которых определяются степенным законом возрастания:

$$t_i = 2^{-i}, \quad (57)$$

где  $t$  – относительная продолжительность экспозиции.

Равномерная шкала логарифмов экспозиции позволяет последовательно «наводиться» импульсной характеристической кривой на равномерный ряд фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону изменения интенсивности.

Для построенного семейства характеристических кривых  $D_{\Pi} = f(\lg E)$ , при  $t = const$ , каждой отдельной кривой соответствует соотношение из следующей серии:

$$E_1 = \frac{H}{t_1}; E_2 = \frac{H}{t_2}; \dots; E_n = \frac{H}{t_n}. \quad (58)$$

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

$$E_{\text{отн}} = \frac{H}{t_{\text{отн}}}; \quad (59)$$

или, в логарифмической форме

$$-\lg E_{\text{отн}} = \lg t_{\text{отн}}.$$

При этом время удобно задавать в целых числах, а относительную освещенность – в долях от максимального значения, принятого за единицу.

Последние две формулы являются основными выражениями структурометрического метода изофотометрической фоторегистрации.

Таким образом, при использовании приемника изображения с импульсной ФП, изменяя время накопления на приемнике изображения, достигаем эффекта перемещения импульсной ФП в новые положения вдоль оси  $\lg E$ .

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

Для учета фотографического эффекта невзаимозаменяемости, который описывается формулой

$$(Et^p)_{D_{\text{п}}=\text{const}} = \text{const}, \quad (60)$$

где  $p$  – показатель невзаимозаменяемости.

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

$$d = \frac{2,44\lambda l}{d_r}, \quad (61)$$

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

После промера изофотограммы дифракционного кружка строят градуировочный график  $\lg E_{\text{T}} = f(\lg E_{\text{Э}})$ , где  $E_{\text{Э}}$  – уровни освещенности дифракционного пятна, а  $E_{\text{T}}$  – соответствующие им относительные освещенности, вычисленные по основному выражению изофотометрии.

Таким образом, получают графическое выражение исследуемой ФРТ, градуированное в точных значениях  $E_{\text{отн}}$ , не искаженных влиянием невзаимозаменяемости и других факторов. ФРТ, полученная в численных значениях, служит для расчета концентраций энергии в изображении точки; ЧКХ системы; числа Штреля и других требуемых критериев качества изображения.

Достоинства метода изофотометрии с переменным накоплением:

- большой диапазон измеряемого перепада освещенностей в пятне рассеяния;
- высокая светочувствительность – это особенно важно при недостатке световой энергии в схеме, например, при контроле оптических поверхностей без зеркального покрытия.

К недостаткам этого метода следует отнести необходимость получения серии кадров с нарастающим временем экспозиции – это требование приводит к снижению оперативности исследований.

## Изофотометрия с изменяющимся световым потоком

Работа над методами изофотометрии проложена в направлении создания телевизионного изофотометра с изменяющимся световым потоком.

Принцип метода изофотометрии с изменяющимся световым потоком можно считать обратным принципу изофотометрии с переменным накоплением.

Если в первом случае импульсная ФП (рис. 36, 37) под действием переменного накопления изменяет свое положение относительно ФРТ, выделяя изофоты различных уровней освещенности, то во втором случае (рис. 38) положение импульсной ФП является фиксированным, в то время как ФРТ меняет свое положение в системе координат под влиянием изменяющегося светового потока в схеме изофотометрического контроля.

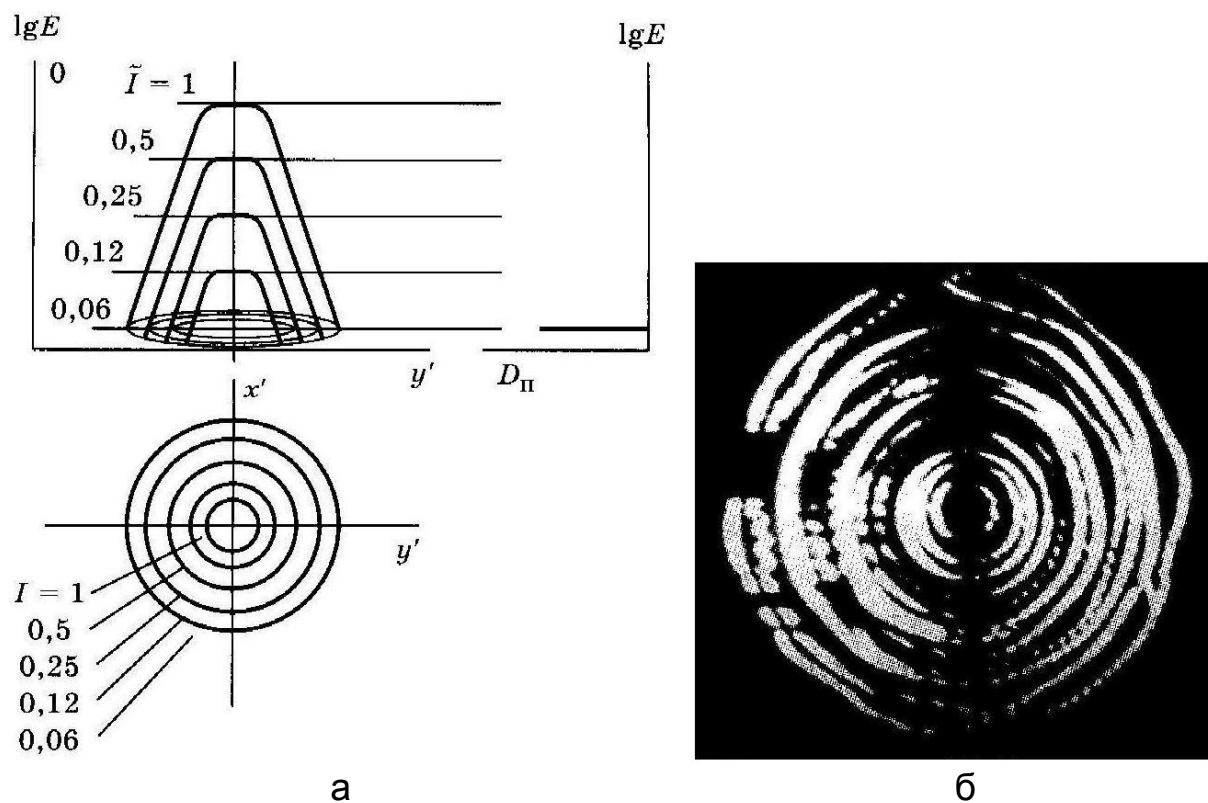


Рис. 38. Схема метода изофотометрии с изменяющимся световым потоком (а) и изофотограмма дифракционного кружка (б)

Схема установки для исследования качества изображения фотообъектива методом изофотометрии с изменяющимся световым потоком показана на рис. 39.



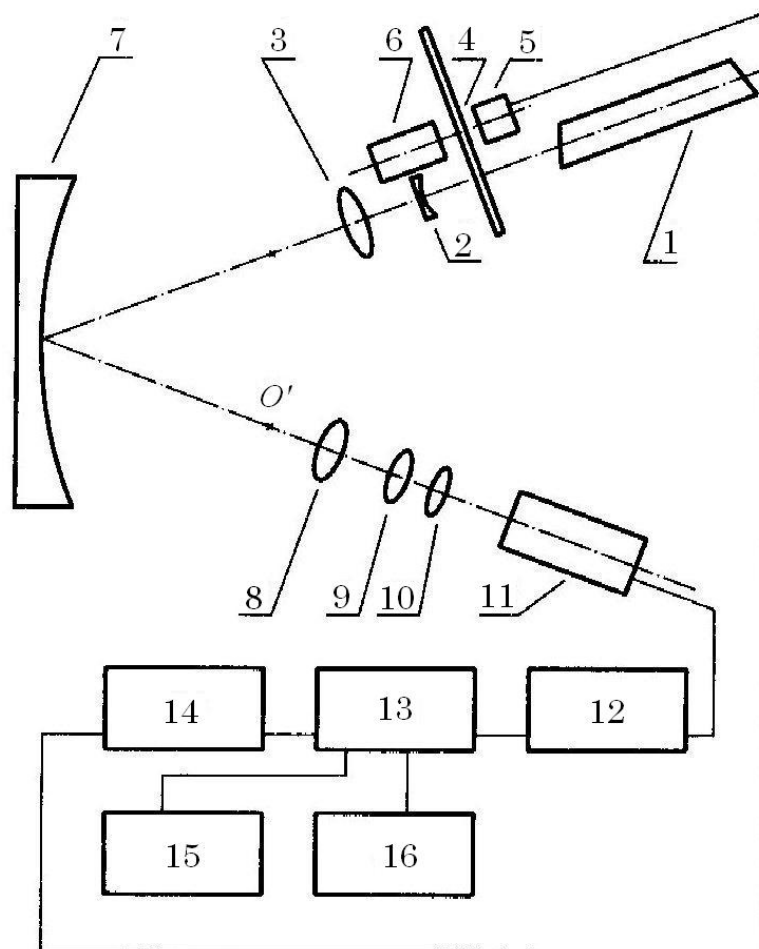


Рис. 39. Принципиальная схема телевизионного изофотометра с изменяющимся световым потоком

В новом изофотометре экспрессность измерений достигнута за счет формирования всех фотометрических сечений при одинаковых временах экспозиции, составляющих  $\frac{1}{50}$  с.

В исходном состоянии фотометрический клин введен полностью; чувствительность телевизионной системы установлена таким образом, чтобы исходный световой поток в схеме контроля формировал изображение линии равного уровня освещенности (изофоты) в изображении точечного источника, соответствующее максимуму освещенности, которая принимается равной единице. Обычно изофота максимума имеет вид точки (на рис. 38, а – центральная изофота).

Переместим фотометрический клин и добьемся повышения светового потока вдвое. Кривая распределения освещенности при этом сместится в новое положение, а крутая импульсная световая характеристика телевизионной системы с дискриминатором выделит из распределения освещенности изофоту (рис. 38, а) на уровне освещенности, вдвое меньше, чем первоначальный, и на экране

видеоконтрольного устройства (ВКУ) будет сформировано изображение изофоты для уровня освещенности  $E_2 = 0,5$ .

Следующее удвоение светового потока вызывает формирование изофоты уровня относительной освещенности  $E_3 = 0,25$  и т.д. Промежуточные положения клина дают изофоты промежуточных уровней освещенности.

Уровень относительной освещенности, которому соответствует данная изофота, составляет:

$$E_i = \frac{\tau_0}{\tau_i},$$

где  $\tau_0$  – коэффициент пропускания клина, при котором выделяется изофота максимума освещенности в пятне рассеяния (определяется экспериментально);  $\tau_i$  – коэффициент пропускания клина, при котором выделяется изофота искомого уровня освещенности.

В тех случаях, когда клин отградуирован в значениях оптической плотности,  $E_i$  находят из выражения:

$$\lg E_i = D_{pi} - D_{p0}. \quad (62)$$

Видеосигналы всех изофот последовательно подаются на устройство памяти.

В результате запоминания ряда фотометрических сечений и воспроизведения на экране их исходного взаимного расположения формируется изофотограмма (рис. 38, б), т.е. топограмма распределения освещенности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой. Изофотометр позволяет в процессе фокусировки и юстировки системы следить за изменением качества изображения по форме графика ФРТ и точно определять оптимальное положение, соответствующее наилучшему качеству изображения.

Применение компьютера создает также возможность автоматизации управления клином; формирования карты и графика ФРТ; считывания и обработки результатов.

**Телевизионный изофотометр с изменяющимся световым потоком.** Телевизионный изофотометр с накоплением создает существенные преимущества по сравнению с фотографической изофотометрией, особенно в схемах контроля, имеющих дефицит световой энергии.

Ограничением данного устройства является то, что из-за необходимости получения серии кадров накопления с удлиняющимся

рядом времен экспозиции накопления, один цикл измерения может длиться десятки минут. Это не позволяет следить за изменениями качества изображения в течение времени измерения, а эти изменения недопустимы, так как, измерительная система чувствительна к вибрациям и осредняет влияние воздушных потоков и других искажающих факторов. Кроме того, фотометрические сечения регистрируются лишь на отдельных уровнях освещенности, увеличение числа которых затруднено, потому что влечет за собой увеличение затрат времени на измерение. По этой причине работа над телевизионным изофотометром была продолжена. Ее целью было повышение экспрессности измерений за счет формирования всех фотометрических сечений в новом изофотометре при одинаковых временах экспозиции, составляющих  $\frac{1}{25}$  с. Результаты измерений выводятся на экран электронно-лучевой трубки практически одновременно с процессом анализа изображения точки.

Эта цель достигнута за счет того, что в схему введены новые элементы. Позади осветителя установлен фотометрический клин, который может перемещаться в плоскости, перпендикулярной оптической оси. Клин связан с электрическим преобразователем перемещения, выход которого подключен к вертикальной развертке двухкоординатного регистрирующего устройства, например, к осциллографу с памятью.

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

На рис. 39 изображена принципиальная схема устройства. Оно содержит осветительную систему, в которую входят лазер 1, расширительная линза 2 и объектив, формирующий точечный источник света. В осветительную систему введен перемещающийся (вращающийся) фотометрический клин 4, плавно меняющий световой поток. Клин оснащен приводом 6 и датчиком угла поворота 5. Сформированный точечный источник света посылает расходящийся пучок в зрачок исследуемой системы 7, которая строит пятно рассеяния  $O'$ . Это изображение переносится с увеличением при помощи микроскопа 8, 9 и объектива телевизионной камеры 10 на чувствительную площадку приемника изображения 11. Приемник через блоки 12 и 13 (формирующие контур фотометрического сечения), связан с регистрирующим устройством 14, блоком измерения площади изображения 15 и ВКУ 16. Выход датчика угла

поворота клина, соединен с входом вертикальной развертки регистратора.

Видеосигналы всех изофот могут последовательно подаваться на электронно-лучевую трубку с памятью, например, на экран осциллографа типа СВ-7А, дополненного блоком кадровой развертки. Таким образом, в результате запоминания ряда фотометрических сечений и воспроизведения на экране их исходного взаимного расположения формируется изофотограмма, т.е. топограмма распределения освещенности в изображении точечного источника, построенная исследуемой оптической системой.

Далее с помощью построения осциллографа выделяется строка, проходящая через максимум освещенности изображения. Затем фотометрическому клину сообщается непрерывное возвратное перемещение (например, круглый клин вращают), что вызывает изменение светового потока в системе по пилообразному закону. При этом, благодаря датчику перемещения (угла поворота), изменяется высота расположения строки на экране осциллографа пропорционально смещению клина, т.е. пропорционально увеличению его оптической плотности.

Одновременно, в соответствии с плотностью клина, изменяются уровень и величина выделяемого фотометрического сечения, и изменяется расстояние между парой импульсов на строке, соответствующих концам диаметра фотометрического сечения.

Таким образом, благодаря изменению расстояния между импульсами при одновременном изменении высоты расположения строки на экране осциллографа, формируется график, отображающий форму ФРТ в данном сечении. Подобные операции могут быть выполнены и при помощи компьютера, оснащенного соответствующей аппаратурой.

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

## **Метод изофотометрии ФРЛ**

Разработан метод изофотометрии ФРЛ, позволяющий визуализировать график ФРЛ и измерять ее значения в диапазоне перепада интенсивности  $10^3-10^4$ , в том числе – и в реальном времени. Это направление основано на применении методов и средств оптических измерений третьего поколения.

Распределение освещенности поперек изображения щели получают в виде логарифмической кривой ФРЛ, фотографируя изображение щели через серый клин. Сущность метода – в следующем. Оптическое изображение щели перекрывается клином, оптическая плотность в котором изменяется вдоль клина и рассчитывается:

$$D_k = KX, \quad (63)$$

где  $K$  – постоянная клина;  $X$  – протяженность вдоль клина.

Результатирующее двумерное распределение относительной освещенности характеризуется в поперечном сечении ФРЛ, а в поперечном направлении – функцией модуляции освещенности клином –  $\lg E = KX$ . (64)

Изофота такого распределения дает график ФРЛ с логарифмической шкалой освещенностей.

Фотографический изофотометрический метод определения ФРЛ нашел применение при исследованиях фотографических объективов и объективов любительской киноаппаратуры. Телевизионный метод изофотометрического анализа ФРЛ позволяет визуально оценивать качество изображения по форме графика функции (рис. 40); непрерывно наблюдать и измерять характеристики качества изображения при юстировках, фокусировках и других перестройках систем и, кроме того, расширить диапазон измеряемых освещенностей в ФРЛ до значений, достаточных для надежных оценок качества системы.

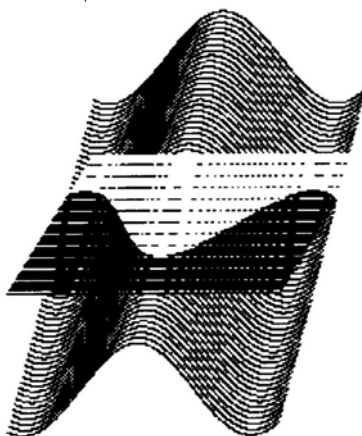


Рис. 40. Компьютерное моделирование принципа формирования изофоты как графика ФРЛ исследуемой оптической системы

Установка для испытания объективов собрана на базе оптической скамьи. Изображение освещенной щели, построенное исследуемой системой и увеличенное микроскопом, переносится на мишень передающей телевизионной трубки, а затем по телевизионному каналу воспроизводится на телевизионном экране с максимальным контрастом. Изофота выделяется как граница черного и белого в

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

Сущность способа изофотометрии ФРЛ состоит в том, что в качестве тест-объекта исследуемому объективу предъявляется тест-объект типа «светящаяся линия переменной яркости». Для реализации такого тест-объекта в коллиматоре установлена щель, совмещенная с линейным фотометрическим клином, ось которого совпадает с расположением щели.

Построенное исследуемым объективом изображение этого тест-объекта переносится с увеличением при помощи вспомогательного микрообъектива на чувствительную площадку передающей телевизионной камеры, включенной в замкнутую телевизионную систему. Видеосистема работает в режиме выделения контура при постоянных световых характеристиках приемника изображения. Для этого в ее состав (рис. 41, а) подключен блок выделения контура 10, выделяющий изофоту изображения тест-объекта типа «светящаяся линия переменной яркости», сформированного исследуемой оптической системой.

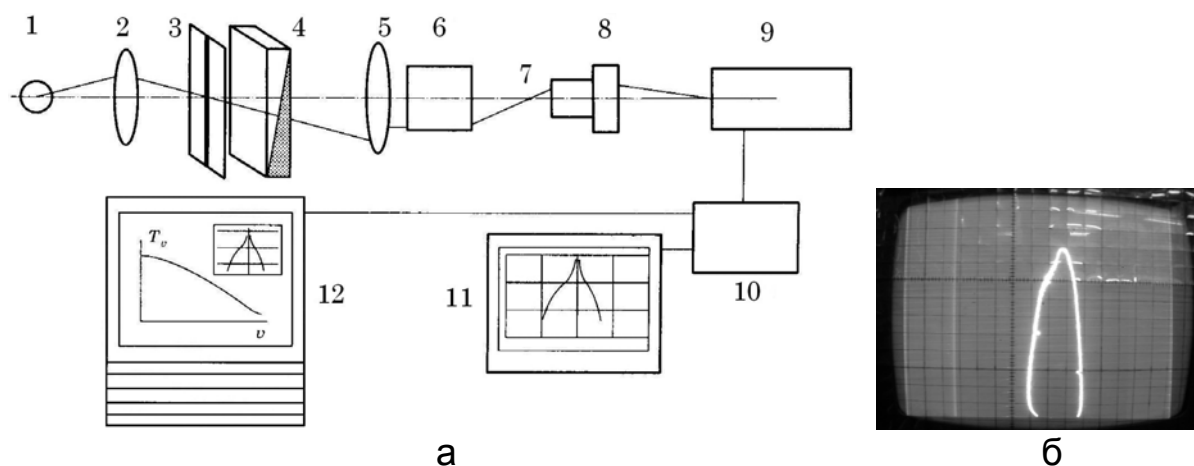


Рис. 41. Схема установки для изофотометрического измерения ФРЛ объектива (а): 1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – щелевая диафрагма; 4 – линейный фотометрический клин; 5 – объектив коллиматора; 6 – исследуемый объектив; 7 – изображение тест-объекта; 8 – микрообъектив; 9 – передающая телекамера; 10 – блок выделения контура; 11 – ВКУ (телевизионный монитор); 12 – компьютер с видеоадаптером; график ФРЛ на TV-экране (б)

Эта изофота имеет форму графика ФРЛ исследуемого объектива (рис. 41, б), где по оси ординат располагаются значения логарифма относительной освещенности ( $\lg E_{\text{отн}}$ ), а по оси абсцисс – пространственная протяженность в плоскости изображения.

Так как график ФРЛ [ $\lg(E_{\text{отн}}) = f(y')$ ] формируется на экране телевизионного монитора в реальном масштабе времени; данная установка позволяет оперативно определять плоскость наилучшей установки (фокусировки) объектива, осуществлять его юстировку до достижения наилучшего качества изображения и оценивать качество изображения по ширине ФРЛ и соответствующему значению фотографической разрешающей способности.

Компьютерной обработкой данных получают весь комплекс требуемых характеристик качества изображения объектива: ОПФ и ФПМ (или ЧКХ). Определяют требуемые критерии качества изображения исследуемой системы, такие как значение КПК на заданной критической частоте.

Другой критерий – среднее значение ФПМ на сюжетно важном интервале частот, определяемое по формуле:

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

где  $\mu_{\text{пр}}$  – частота, принятая в качестве предельной на сюжетно важном интервале;  $T(\mu)$  – КПК.

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

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ к Разделу 3

1. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Кирилловский В.К. и др. Оптические измерения: учебное пособие. – М.: Университетская книга; ЛОГОС, 2008. – 416 с.
2. Вычислительная оптика: справочник / Под ред. Русинова М.М., Грамматина А.П. и др. – Л.: Машиностроение, 1984. – 423 с.
3. Зверев В.А. Основы геометрической оптики. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. – 218 с.
4. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
5. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 1: учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 43 с.
6. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 2: учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 60 с.
7. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 3: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 67 с.
8. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 4: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 89 с.
9. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения. – СПб: ЛАНЬ, 2010. – 304 с.
10. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
11. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.
12. Прикладная оптика: учебно-методическое пособие / Под ред. Шехонина А.А. в 2-х ч. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2003. – Ч. 1 – 75 с., Ч. 2 – 77 с.
13. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000. – 169 с.



## Раздел 4. АБЕРРАЦИИ И КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ

### Интерферометрия – механизм формирования интерференционной картины

В 1916 году Твайман сообщил о методе интерферометрии aberrаций 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.

Особое преимущество интерферограммы состоит в том, что при определенных условиях может быть получена интерференционная картина, подобная топографической карте исследуемой волновой поверхности, где изолинии уровня (горизонталы) представлены в виде полос с разностью хода, кратной длине волны (рис. 42).

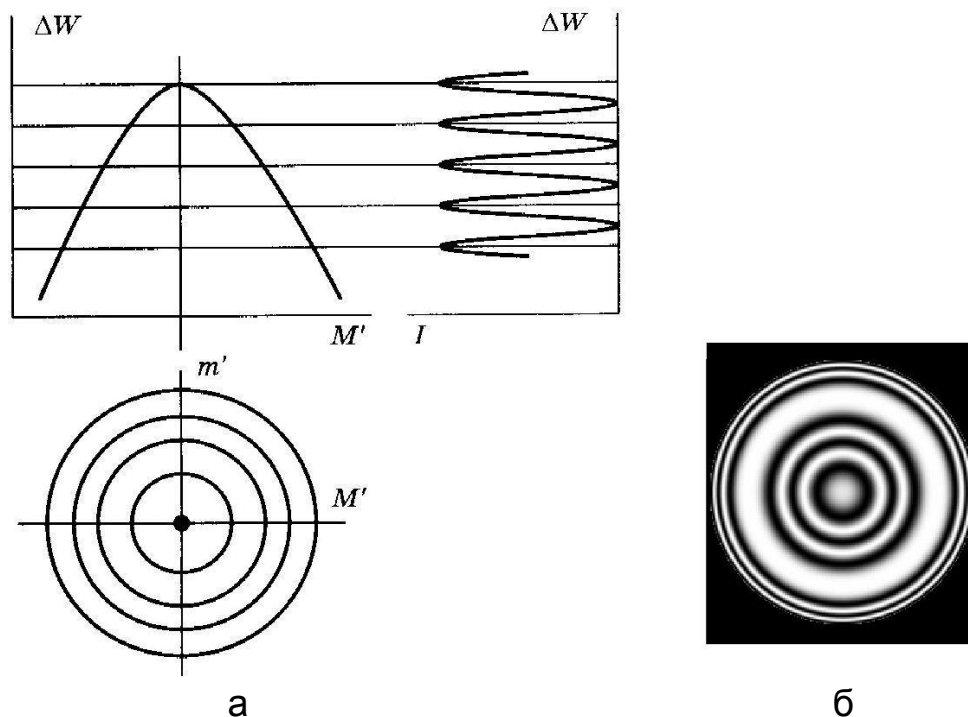


Рис. 42. Схема метода интерферометрии для варианта точной продольной и поперечной настройки интерферометра (а); вид интерферограммы (б)

Таким образом, метод интерферометрии сочетает достоинство наглядности, подобно теневому методу, с достоинством возможности количественных оценок деформаций волнового фронта, связанных с aberrациями оптических систем и ошибками оптических поверхностей и элементов. Так, общий вид интерференционной картины часто позволяет опознать характер преобладающей aberrации для исследуемой системы (рис. 43).

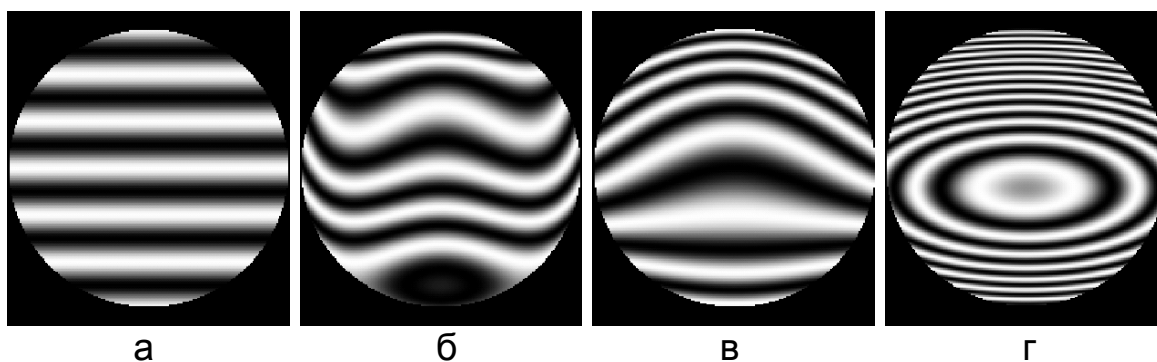


Рис. 43. Вид интерференционных картин для круглого зрачка: отсутствие aberrаций (а); сферическая aberrация (б); кома (в); астигматизм (г)

Ограничение интерферометрического метода в его исходной форме состоит в том, что освещенность поперек полосы изменяется по синусоидальному закону, контуры полос неотчетливы и поэтому погрешность визуальной расшифровки не менее 0,05 ширины полосы. Современные методы специальной регистрации дают возможность не только записать информацию, содержащуюся в той или иной картине при оптических измерениях, но и преобразовать структуру изображения к виду, позволяющему достичь максимально возможной точности при его расшифровке, в том числе и при помощи устройства автоматического ввода графиков в ПК. Например, каждая интерференционная полоса синусоидальной структуры трансформируется в пару четких контуров (рис. 44).

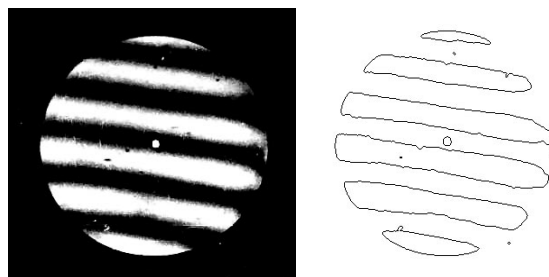


Рис. 44. Обработка интерференционного изображения с целью повышения точности расшифровки интерферограммы

Начало XX века ознаменовалось развитием методов бесконтактной интерферометрии.

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, присущее 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. 45.

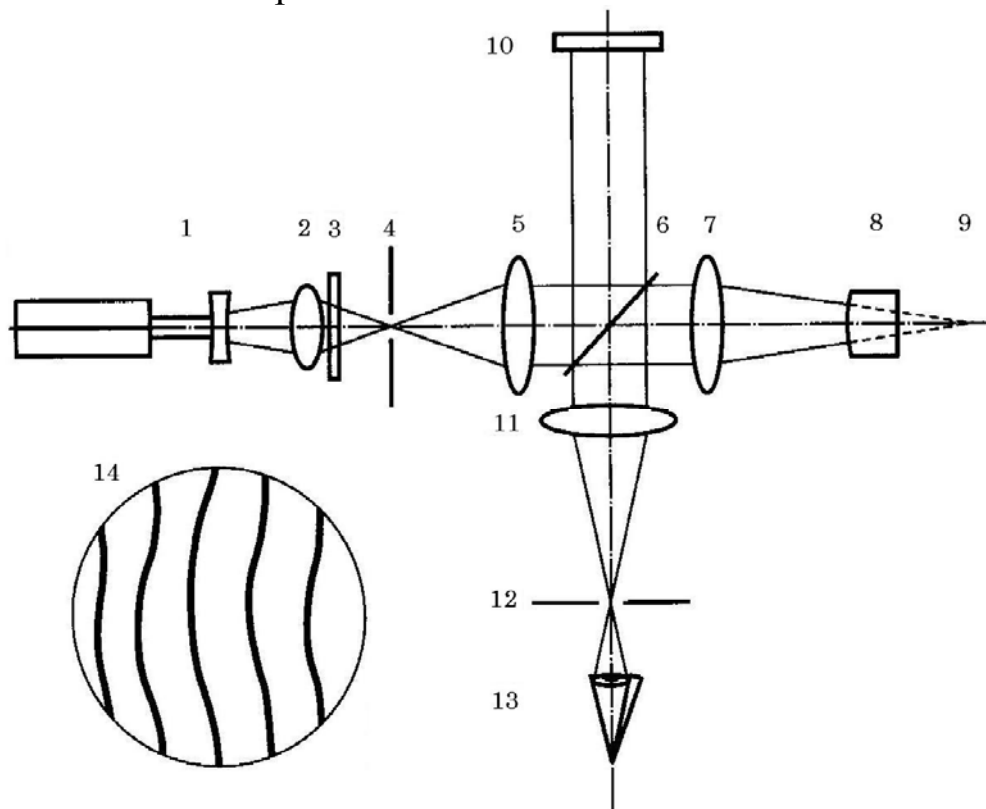


Рис. 45. Интерферометр Тваймана для исследования объектива:  
1 – лазер; 2 – осветительная система; 3 – светофильтр;  
4 – точечная диафрагма; 5 – коллиматорный объектив;  
6 – светоделитель; 7 – исследуемый объектив;  
8 – автоколлимационное сферическое зеркало; 9 – центр кривизны автоколлимационного сферического зеркала; 10 – образцовое плоское зеркало; 11 – объектив наблюдательной системы;  
12 – наблюдательная диафрагма; 13 – приемник изображения (например, глаз); 14 – вид интерференционной картины

На теоретически возможную точность интерферометрического метода часто отрицательно влияет его чувствительность. Точность снижается, например, если среда между контролируемой и эталонной системами турбулентная или быстро изменяется, или если контролируемая система колеблется относительно эталонной.

Влияние турбулентности воздуха обычно устраняют, контролируя систему в камере с частичным вакуумом; воздействие вибраций можно уменьшить до допустимого уровня применением противовибрационных устройств.

Такие решения становятся экономически неоправданными 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. Практика показала, что такой прием позволяет устранить вредное влияние вибрации и существенно повысить точность интерферометрии.

## Интерферометр Физо

**Контроль плоской поверхности.** Высокая чувствительность к вибрации двухлучевого интерферометра Тваймана послужила стимулом к поиску схемных решений интерферометров, в которых этот недостаток снижен. В наши дни получил распространение интерферометр Армана Ипполита Луи Физо (1819–1896 г.г.). В его схеме рабочее плечо, содержащее исследуемую поверхность или систему, совмещено с опорным плечом, содержащим образцовую («эталонную») деталь или поверхность, формирующую опорный волновой фронт. Такое совмещение стало возможным благодаря применению в качестве образцовой, детали с поверхностью, работающей в проходящем свете.

На рис. 46 дана схема интерферометра Физо для контроля плоской поверхности. Здесь в качестве образцовой применяется пластина  $\delta$ , фронтальная поверхность которой выполнена с образцовой точностью (на уровне до  $\frac{1}{20}\lambda$ ). В практике контроля поверхностей средней точности, погрешности образцовой поверхности в интерферометре по традиционной схеме принято считать пренебрежимо малыми.

С целью исключения влияния паразитной интерференционной картины, возникающей при отражении плоского фронта от обратной, нерабочей поверхности образцовой пластины, эта поверхность

выполнена с небольшой клиновидностью, порядка 0,5–1 мм снижения толщины от верхнего края пластины к нижнему. При этом возникающая паразитная интерференционная картина от обратной поверхности имеет полосы высокой частоты (порядка 1000 полос на всю поверхность), которые практически не разрешаются приемником изображения и не мешают восприятию основной интерферограммы.

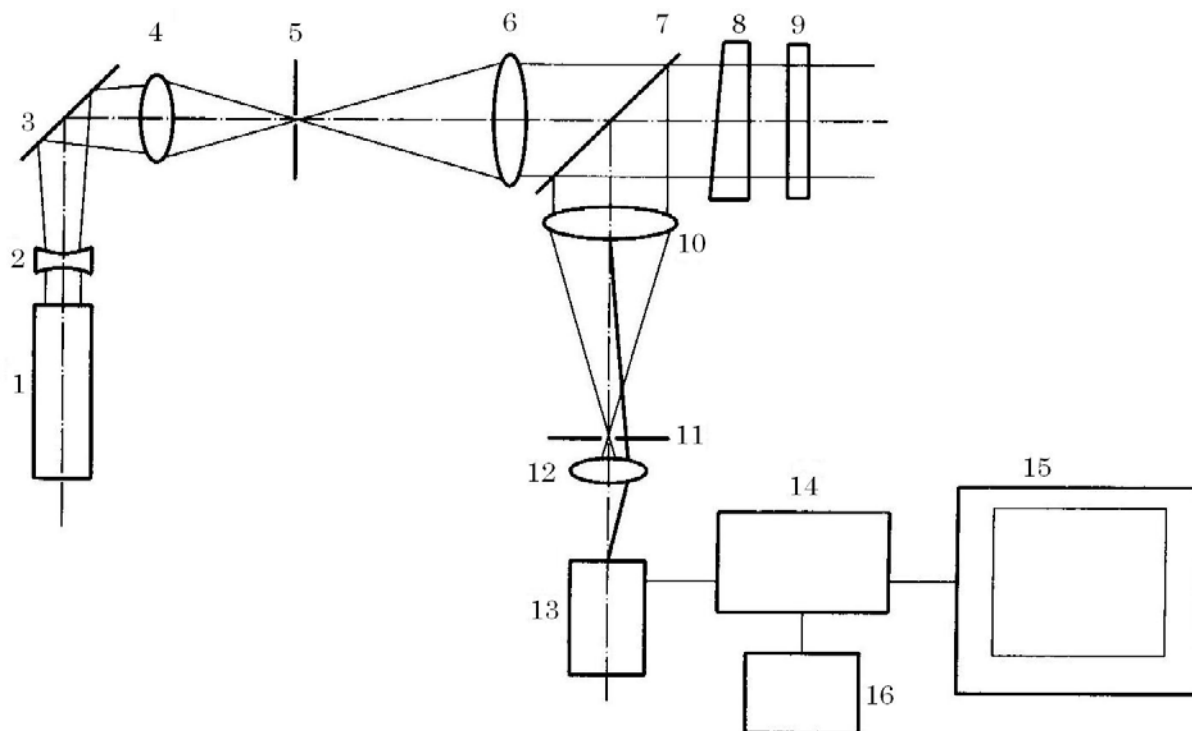


Рис. 46. Схема интерферометра Физо при контроле плоской оптической поверхности: 1 – лазер; 2 – отрицательный компонент осветительной системы; 3 – наклонное зеркало; 4 – объектив осветительной системы; 5 – точечная диафрагма; 6 – коллиматорный объектив; 7 – светоделитель; 8 – пластина с образцовой плоской фронтальной поверхностью; 9 – исследуемая плоская поверхность; 10 – объектив наблюдательной системы; 11 – наблюдательная диафрагма; 12 – объектив регистрации интерферограммы (линза Бертрана); 13 – регистрирующая камера; 14 – электронный блок телевизионного анализатора интерферограмм; 15 – телевизионный монитор; 16 – пульт управления

**Контроль сферической поверхности.** Интерферометр (рис. 47) построен по схеме автоколлимационного микроскопа, в которой между исследуемой поверхностью и микрообъективом установлен мениск.

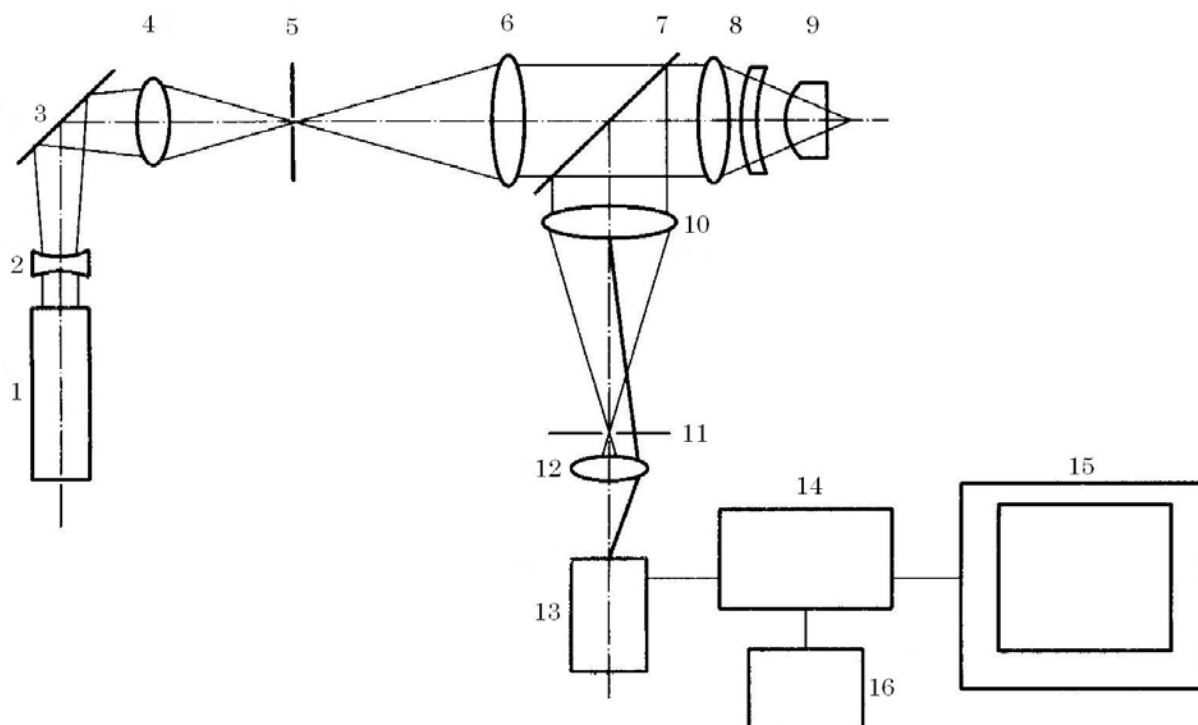


Рис. 47. Схема интерферометра Физо при контроле сферической оптической поверхности: 1 – лазер; 2 – отрицательный компонент осветительной системы; 3 – наклонное зеркало; 4 – объектив осветительной системы; 5 – точечная диафрагма; 6 – коллиматорный объектив; 7 – светоделитель; 8 – объектив интерферометра с образцовой фронтальной поверхностью; 9 – исследуемая деталь; 10 – объектив осветительной системы; 11 – наблюдательная диафрагма; 12 – объектив регистрации интерферограммы (линза Бертрана); 13 – регистрирующая камера; 14 – электронный блок телевизионного анализатора интерферограмм (ТАИ); 15 – телевизионный монитор; 16 – пульт управления ТАИ

Фронтальная поверхность мениска играет роль образцовой поверхности, отражая волновой фронт сравнения, интерферирующий с волновым фронтом, отраженным от исследуемой оптической поверхности (рис. 48).

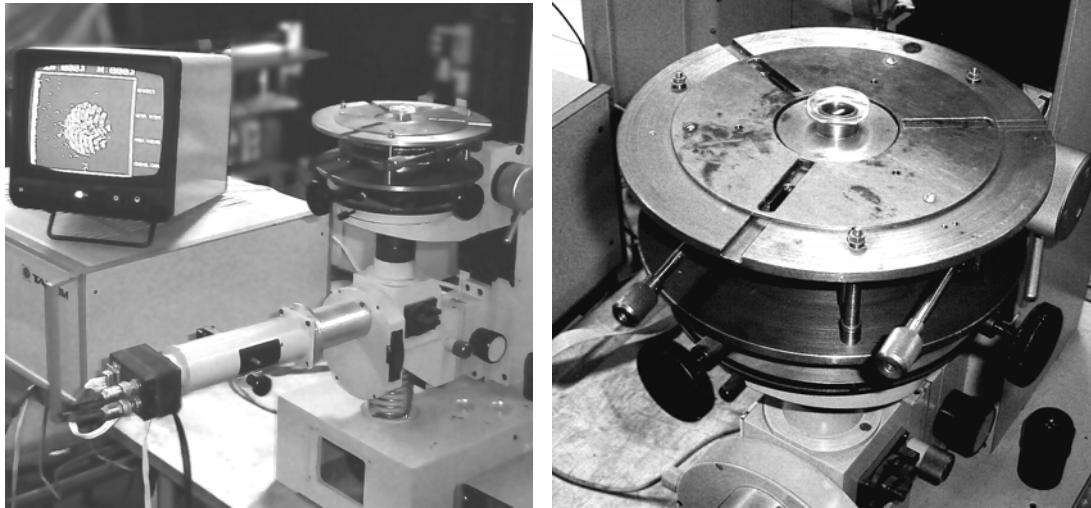


Рис. 48. Общий вид интерферометра Физо в агрегате с анализатором интерферограмм ТАИ-1, при контроле линзы (а); контроль линзы на интерферометре Физо (б)

**Методика проведения измерений.** Рассмотрим пример лабораторной методики проведения измерений.

Задача: получить интерферограммы поочередно от 3-х линз. Для этого, при выключенной линзе Бертрана, ищут автоколлимационные блики, настраивая интерферометр подвижками столика интерферометра вдоль и поперек оптической оси.

После продольного и поперечного совмещения автоколлимационных бликов включают линзу Бертрана и наблюдают интерференционную картину.

Число полос и их ориентацию изменяют поперечными подвижками столика по двум поперечным осям.

По виду интерференционной картины определяют величину ошибки исследуемой оптической поверхности, как отношение максимальной стрелки прогиба интерференционной полосы к шагу (периоду) полосы (рис. 49).

$$\Delta N = \frac{l}{h}.$$

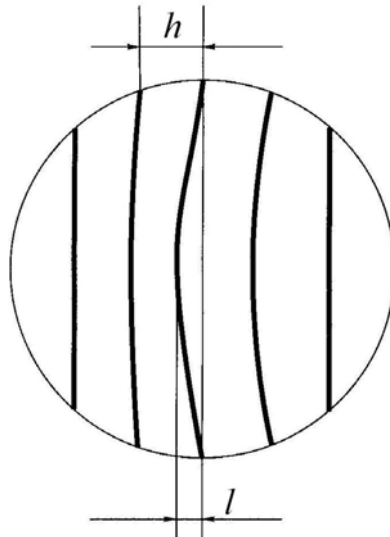


Рис. 49. Методика определения максимальной ошибки волнового фронта по интерферограмме, исходя из оценки соотношения стрелки прогиба полосы с ее шагом

На рис. 50 показаны схема для контроля объектива на интерферометре Физо, общий вид установки и ее элементов (рис. 51–55).

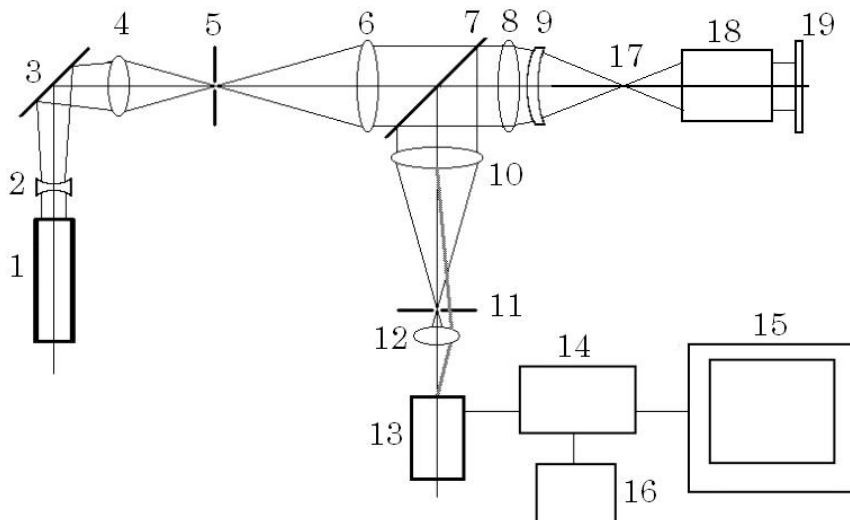


Рис. 50. Схема интерферометра Физо при контроле объектива:  
 1 – лазер; 2–4 – элементы осветительной системы лазера;  
 5 – точечная диафрагма; 6 – коллиматорный объектив;  
 7 – светоделитель; 8 – объектив интерферометра Физо;  
 9 – образцовая фронтальная поверхность; 10 – объектив наблюдательной системы; 11 – наблюдательная диафрагма;  
 12 – объектив регистрирующей видеокамеры;  
 13 – видеокамера; 14 – блок обработки видеосигнала;  
 15 – видеомонитор; 16 – пульт управления; 17 – рабочая точка интерферометра (точечный тест-объект); 18 – исследуемый объектив; 19 – автоколлимационное плоское зеркало



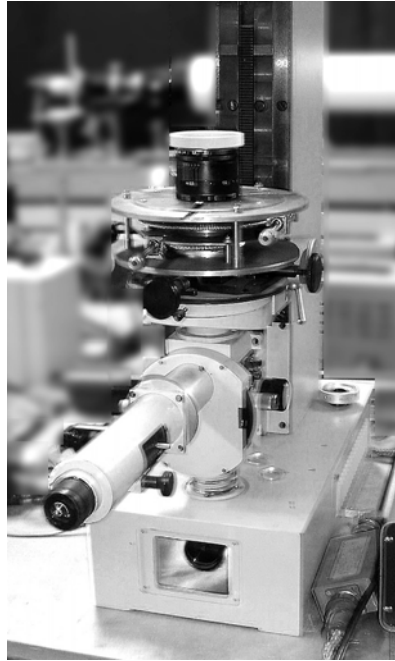


Рис. 51. Общий вид интерферометра Физо при контроле объектива

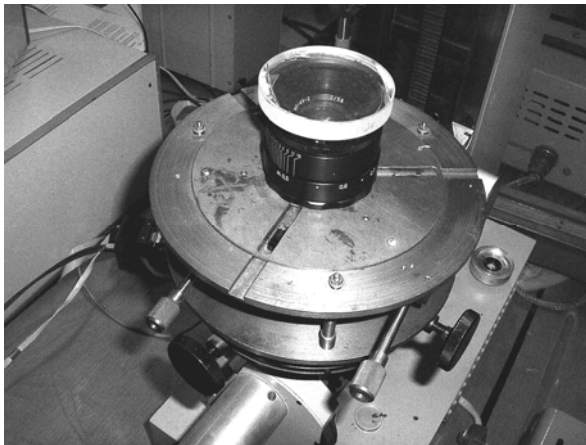


Рис. 52. Контроль объектива «Гелиос-44» на интерферометре Физо

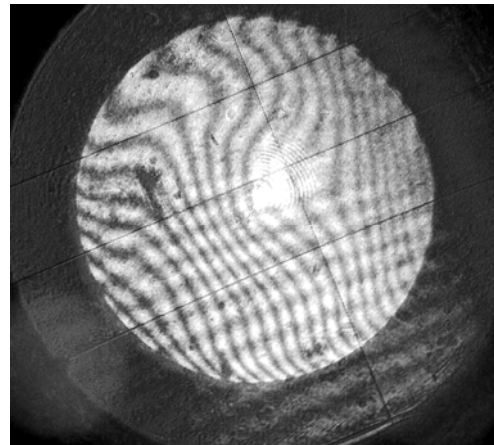


Рис. 53. Интерферограмма объектива «Гелиос-44»

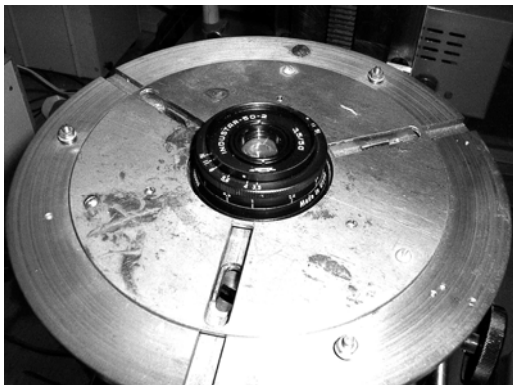


Рис. 54. Объектив «Индустар-50» на интерферометре Физо

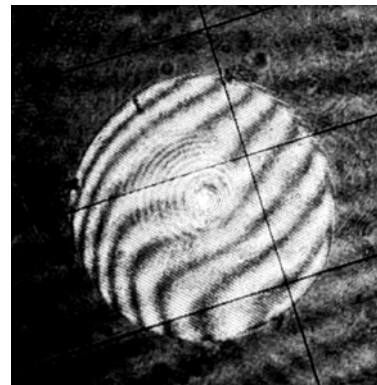


Рис. 55. Интерферограмма объектива «Индустар-50»

Низкая чувствительность к вибрациям принесла широкую популярность интерферометрам по схеме Физо при контроле оптических изделий средней точности.

На рис. 56 показаны разновидности конструктивных решений интерферометра Физо для различных целей. Выпускаемые комплексы оснащены компьютерами, видеовыходом и дорогостоящим программным обеспечением. Однако их точностные возможности ограничены необходимостью применения в их конструкции образцовых деталей, точность которых неизбежно ограничена и находится на уровне  $\frac{\lambda}{20}$ .



Рис. 56. Разновидности конструктивных решений интерферометра Физо (Фирма Möller-Wedel и ЛОМО)

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ к Разделу 4

1. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Кирилловский В.К. и др. Оптические измерения: учебное пособие. – М.: Университетская книга; ЛОГОС, 2008. – 416 с.
2. Афанасьев В.А. Оптические измерения: учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1981. – 229 с.
3. Духопел И.И., Федина Л.Г. Интерференционные методы и приборы для контроля правильности формы сферических поверхностей // ОМП, 1973. – № 8. – С. 50.
4. Еськова Л.М., Гаврилин Д.В. Компьютерные методы контроля оптики: учебно-методические указания к лабораторному практикуму. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. – 92 с.
5. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.
6. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 1: учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 43 с.
14. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 2: учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 60 с.
15. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 3: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 67 с.
7. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 4: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 89 с.
8. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 5: учебное пособие. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 107 с.
9. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения. – СПб: ЛАНЬ, 2010. – 304 с.
10. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры: учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1990. – 51 с.
11. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Контроль оптических систем с применением лазеров: учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1986. – 67 с.
12. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
13. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 223 с.
14. Лившиц Э.М. Оптические измерения: учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1985. – 88 с.

15. Линник В.П. Простой интерферометр для исследования оптических систем. – Л.: ДАН СССР, 1933. – № 5. – С. 208–211.
16. Максудов Д.Д. Изготовление и исследование астрономической оптики. – М.: Наука, 1984. – 272 с.
17. Оптический производственный контроль / Под ред. Д. Малакары. – М.: Машиностроение, 1985. – 400 с.

## Раздел 5. ВОПРОСЫ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ МАТЕРИАЛУ

1. Дайте развернутый ответ, на какие народно-хозяйственные цели направлено повышение уровня измерений, их точности, надежности и производительности?
2. Дайте развернутый ответ, какими службами контролируются и обеспечиваются единство измерений и их требуемое качество?
3. Дайте развернутый ответ, какими свойствами характеризуется современное оптическое приборостроение?
4. Дайте развернутый анализ понятия оптики нового класса. Приведите примеры, какие приборы и системы могут быть отнесены к оптике нового класса?
5. Дайте определение понятию «измерение».
6. Дайте определение понятию «метрология».
7. Дайте определение понятию «единство измерений».
8. Сформулируйте, в чем состоит метрологическая суть измерения?
9. Дайте развернутый сравнительный анализ признаков и различий понятий «оценивание» и «измерение»?
10. Дайте развернутый ответ, в чем «специфика оптических методов измерений»?
11. Перечислите оптические методы измерений. Дайте подробное описание нулевого метода. Приведите пример использования метода.
12. Перечислите оптические методы измерений. Дайте подробное описание метода непосредственной оценки. Приведите пример использования метода.
13. Перечислите оптические методы измерений. Дайте подробное описание совокупных измерений. Приведите пример использования метода.

14. Перечислите оптические методы измерений. Дайте подробное описание прямого измерения. Приведите пример использования метода.
15. Перечислите оптические методы измерений. Дайте подробное описание косвенного измерения. Приведите пример использования метода.
16. Измерения проводятся абсолютным методом измерения трех пробных стекол. Вычислить, каковы абсолютные ошибки каждой из трех поверхностей  $x_1, x_2, x_3$ , когда их относительные ошибки в числе  $N$  интерференционных колец составляют следующие величины?
  - а)  $N_1 = 2,5, N_2 = 2, N_3 = 1,8$ ;
  - б)  $N_1 = 1,5, N_2 = 1,2, N_3 = 1,3$ ;
  - в)  $N_1 = 0,5, N_2 = 0,2, N_3 = 0,3$ .
17. Перечислите оптические методы измерений. Дайте подробное описание метода совпадений. Приведите пример использования метода.
18. Измерения проводятся методом совпадений. Вычислить, какова величина коэффициента повышения точности при нониальном измерении, если:
  - а)  $N_H = 19, N_{III} = 10$ ;
  - б)  $N_H = 15, N_{III} = 8$ ;
  - в)  $N_H = 9, N_{III} = 6$ .
19. Дайте определение понятию «средство измерений». Перечислите средства измерений, которые знаете.
20. Дайте определение понятию «эталон». Приведите примеры эталонов физических единиц.
21. Дайте определение понятию «образцовые средства измерений».
22. Дайте определение понятию «рабочие средства измерений».
23. Дайте определение понятию «поверенный измерительный прибор».

24. Дайте определение понятию «точность результата измерения».
25. Дайте определение понятию «погрешность измерения».
26. Дайте определение понятиям «дополнительной», «абсолютной» и «относительной» погрешностей.
27. Перечислите случайные погрешности.
28. Назовите источники погрешностей, связанные с объектом. Приведите примеры.
29. Назовите источники погрешностей, связанные с прибором. Приведите примеры.
30. Назовите ошибки от нестабильности условий измерения.
31. Перечислите основные этапы оптического измерения, дайте обобщенную структурную схему и укажите место и роль в ней оптического изображения.
32. Укажите этапы обобщенной схемы оптического измерения, реализуемые в схеме визирного измерительного микроскопа.
33. Вычислите размер объекта при работе с измерительным микроскопом, согласно приведенным параметрам:
  - а)  $l_1 = 4,5 \text{ мм}$ ,  $l_2 = 5,6 \text{ мм}$ ,  $V = 10^\times$ ;
  - б)  $l_1 = 3,1 \text{ мм}$ ,  $l_2 = 6,5 \text{ мм}$ ,  $V = 15^\times$ ;
  - в)  $l_1 = 2,7 \text{ мм}$ ,  $l_2 = 8,2 \text{ мм}$ ,  $V = 20^\times$ .
34. Изобразите обобщенную схему комплекса методов оптических измерений и исследований. Дайте развернутый ответ на вопрос, что является объектом исследования и измерения в зоне зрачка I.
35. Изобразите обобщенную схему комплекса методов оптических измерений и исследований. Дайте развернутый ответ на вопрос, оптическое измерительное изображение какого рода формируется в зоне зрачка.

36. Изобразите обобщенную схему комплекса методов оптических измерений и исследований. Дайте развернутый ответ на вопрос, оптическое измерительное изображение какого рода формируется в зоне изображения тест-объекта, сформированной исследуемой и измеряемой оптической системой.
37. Изобразите обобщенную схему комплекса методов оптических измерений и исследований. Дайте развернутый ответ на вопрос, что является объектом исследования и измерения в зоне изображения тест-объекта, сформированной исследуемой оптической системой.
38. Дайте развернутый сравнительный анализ прямого и косвенного методов для определения характеристик качества изображения, построенного оптической системой, и опишите эти методы.
39. Укажите и опишите преимущества и недостатки косвенных методов оценки качества изображения, построенных оптической системой. Приведите пример.
40. Укажите и опишите преимущества и недостатки прямых методов оценки качества изображения, построенных оптической системой. Приведите пример.
41. Дайте развернутый ответ, какого типа первичный и наиболее универсальный тест-объект используется при исследовании качества изображения оптических систем. В виде какой диафрагмы он материализуется и как называется его изображение, если функция, описывающая распределение освещенности в этом изображении, называется ФРТ.
42. Дайте развернутый ответ, какого типа первичный и часто применяемый тест-объект используется при исследовании качества изображения оптических систем. В виде какой диафрагмы он материализуется и как называется его изображение, если функция, описывающая распределение освещенности в этом изображении, называется ФРЛ.



43. Дайте развернутый ответ, какого типа первичный и часто применяемый тест-объект используется при исследовании резкости изображения оптических систем. В виде какой диафрагмы он материализуется и как называется его изображение, если функция, описывающая распределение освещенности в этом изображении, называется «пограничной кривой».
44. Дайте развернутый ответ, какого типа первичный и часто применяемый тест-объект используется при исследовании разрешающей способности оптических систем. В виде какой диафрагмы он материализуется и как называется его изображение, если функция, описывающая распределение контраста в этом изображении, называется ЧКХ.
45. Сформулируйте название и дайте развернутое описание впервые предложенного метода исследования деформаций волнового фронта, связанных с аберрациями оптических систем и ошибками оптических элементов.
46. Укажите, основная идея каких методов состоит в обнаружении боковых смещений сфокусированных лучей за счет их задерживания или модификации, которое осуществляется путем помещения специальных экранов в плоскость схождения пучков лучей от контролируемой оптической поверхности или системы.
47. Дайте развернутый ответ, для получения какой картины деформаций исследуемого волнового фронта, в плоскости схождения параксиального пучка лучей устанавливается перпендикулярно оптической оси непрозрачный экран с прямолинейным краем, который наполовину перекрывает пятно рассеяния.
48. Дайте развернутый ответ, как изменяется освещенность на теневой картине соответствующей зоны поверхности при помещении «ножа Фуко» в различные точки вдоль оптической оси, если контролируемое зеркало не является сферическим, и каждый его участок имеет свой отличный радиус кривизны.

49. Сформулируйте области применения теневого метода при исследовании оптических систем, оптических материалов и оптических явлений.
50. Дайте развернутый сравнительный анализ достоинств и недостатков теневого метода по сравнению с методом Гартмана при контроле оптических систем и поверхностей.
51. Дайте развернутый анализ основного принципа метода контроля оптической системы с применением экрана вблизи выходного зрачка, когда волновой фронт оценивается в ряде предварительно выбранных точек. Чье имя носит данный метод. Укажите, возможен ли контроль этим методом несферического волнового фронта.
52. Укажите чье имя носит метод контроля волнового фронта, построенного оптической системой, когда в выходной зрачок исследуемой оптической системы устанавливается диафрагма (непрозрачная заслонка с серией отверстий).
53. Дайте развернутый анализ и объясните, чему соответствует расположение пятен на диафрагме Гартмана, если волновой фронт не имеет деформаций.
54. Дайте развернутый анализ метода интерферометрии с точки зрения операций с волновыми фронтами.
55. В чем состоит основная задача метода интерферометрии.
56. Опишите, как интерпретировать интерференционную картину при точно сфокусированном интерферометре при интерферометрическом методе.
57. Опишите, как при поперечной расфокусировке интерферометра, предложенного Твайманом, возникает система полос, форма каждой из которых соответствует профилю ошибок волнового фронта в данном сечении зрачка.
58. Укажите достоинства метода Гартмана по сравнению с теневым методом «ножа Фуко».

59. Какие факторы отрицательно сказываются на теоретически возможную точность интерферометрического метода:
- а) мощность источника излучения;
  - б) спектральный состав рабочего освещения;
  - в) чувствительность к вибрациям;
  - г) чувствительность к флюктуациям воздушного тракта.
60. Укажите способ устранения погрешностей интерферометрии, возникающих в результате влияния флюктуаций воздушного тракта.
61. Опишите способы устранения погрешностей интерферометрии, возникающих в результате влияния вибраций.
62. Укажите условия интерферометрии, в которых можно эффективно использовать скоростную регистрацию интерференционной картины (например, видеозапись) и последующую покадровую расшифровку.
63. При контроле оптической системы используется метод Гартмана. Рассчитайте значение  $x$  по следующим данным:
- а)  $d = 193$  мм;  $a = 8$  мм;  $b = 6$  мм;
  - б)  $d = 193$  мм;  $a = 20$  мм;  $b = 10$  мм;
  - в)  $d = 193$  мм;  $a = 26$  мм;  $b = 6$  мм.
64. Опишите роль оптического изображения в процессе измерительных наводок при помощи оптических измерительных приборов.
65. Опишите процесс измерительного наведения (наводки) как комплекс операций с оптическими изображениями. Приведите пример из области геодезических измерений.
66. Укажите приемник изображения, на чувствительной площадке которого осуществляется процесс совмещения элементов двух оптических измерительных изображений при оптических измерительных наводках.
67. Укажите разницу между поперечной и продольной оптическими измерительными наводками.

68. Дайте развернутое описание явления фундаментальной нерезкости оптического изображения в оптических измерительных приборах:
- причины фундаментальной нерезкости оптического изображения в оптических измерительных приборах;
  - влияние фундаментальной нерезкости оптического изображения в оптических измерительных приборах на погрешности наводок при определении пространственной координаты изображения, связанного с измеряемым объектом.
69. Дайте развернутый ответ, как погрешность от фундаментальной нерезкости связана с градиентом перепада интенсивности и другими структурными особенностями оптического измерительного изображения.
70. Дайте развернутое описание, путем каких подвижек в приборе в процессе измерения перекрестие прибора совмещается с изображением объекта (или тест-объекта) при продольных измерительных наводках.
71. Дайте развернутое объяснение необходимости присутствия перекрестия (сетки) при продольных наводках в фокальной плоскости окуляра в измерительных приборах.
72. Дайте развернутое описание, как физическая величина выражается с использованием шкалы соотношений, которая имеет ряд отметок (делений), а также нулевую отметку.
73. Укажите, к измерениям какого рода (световым, геометрическим, температурным) сводится большинство оптических измерений. Приведите примеры.
74. Укажите, где (на какой поверхности) при оптических измерительных наводках изображение объекта физически совмещается с элементами марки (шкалы). Проиллюстрируйте на примере различных измерительных приборов.
75. Дайте развернутый анализ процесса измерительного наведения (наводки) как комплекса операций с оптическими изображениями. Приведите пример из области геодезических измерений.

76. Укажите приемник изображения, на чувствительной площадке которого осуществляется процесс совмещения элементов двух оптических измерительных изображений при оптических измерительных наводках.
77. Дайте развернутый анализ разницы между поперечной и продольной оптическими измерительными наводками.
78. Дайте развернутый ответ, как структура оптического изображения определяет качество оптического измерения и его важнейшие метрологические характеристики – чувствительность и точность.
79. Дайте развернутый анализ, от каких факторов зависит структура оптического изображения, на которое выполняются оптические измерительные наводки.
80. Дайте развернутое объяснение, в каких условиях происходит формирование оптического изображения марки на чувствительной площадке приемника изображения в оптическом измерительном приборе и в чем причина его высокой резкости.
81. Укажите, какие параметры оптического изображения определяют качество оптического измерения и его важнейшие метрологические характеристики – чувствительность и точность.
82. Дайте развернутое описание распределения интенсивности в изображении светящейся точки, найденное исходя из дифракции Фраунгофера на круглом зрачке. Как называется трехмерное тело, сформированное вблизи геометрического изображения точки, в котором концентрируется большая часть энергии.
83. Укажите, как называется кружок, сформированный в плоскости меридионального сечения дифракционного тела, проходящего через точку геометрического фокуса, дайте развернутое описание структуры кружка.

84. Приведите формулу для определения радиуса диска Эри для любой длины волны. Приведите примеры размеров кружка для разных длин волн и разных апертур на примерах приборов различного назначения. Дайте подробное рассмотрение формулы.
85. Приведите формулу для определения углового размера радиуса диска Эри для любой длины волны. Приведите формулу для определения углового размера радиуса диска Эри для средней длины волны. Дайте подробное рассмотрение формулы.
86. Приведите формулу для определения радиуса диска Эри для средней волны. Приведите формулу для определения углового размера радиуса диска Эри для средней длины волны. Дайте подробное рассмотрение формулы.
87. Приведите формулу для определения продольного размера центральной фигуры дифракционного изображения точки – дифракционного тела для любой длины волны. Дайте подробное рассмотрение формулы.
88. Приведите формулу для определения продольного размера центральной фигуры дифракционного изображения точки – дифракционного тела для средней длины волны. Дайте подробное рассмотрение формулы.
89. Укажите формулу для определения порога чувствительности поперечной оптической измерительной наводки. Дайте развернутый анализ формулы.
90. Укажите формулу для определения порога чувствительности продольной оптической измерительной наводки. Дайте развернутый анализ формулы.
91. Дайте развернутое описание процесса формирования распределения интенсивности в изображении светящейся линии, если тест-объект (бесконечно тонкую светящуюся линию) представить в виде совокупности светящихся точек.

92. Укажите, как называется функция, описывающая распределение интенсивности в изображении тест-объекта типа «светящаяся линия». Дайте развернутый сравнительный анализ данной функции и ФРТ.
93. Приведите формулу для определения линейной ширины первого дифракционного максимума в изображении линии для любой длины волны. Дайте подробное рассмотрение формулы.
94. Приведите формулу для определения угловой ширины первого дифракционного максимума в изображении линии для средней длины волны. Дайте подробное рассмотрение формулы.
95. Приведите формулу для определения линейной ширины первого дифракционного максимума в изображении линии для средней длины волны. Дайте подробное рассмотрение формулы.
96. Дайте развернутый анализ понятия разрешающей способности по Рэлею, при разрешении пары светящихся точек.
97. Дайте развернутый ответ, как соотносится расстояние между центральным максимумом в изображении первой точки и первый минимумом в изображении второй точки.
98. Дайте развернутое описание структуры изображения двойной точки в суммарной дифракционной картине. Приведите формулы и графики, отображающие процесс формирования двойного изображения и дайте численные примеры.
99. Дайте развернутый анализ понятия разрешающей способности по Рэлею, при разрешении пары светящихся линий. Укажите, как называется функция, описывающая распределение интенсивности в изображении тест-объекта типа «светящаяся линия».
100. Дайте развернутый сравнительный анализ процесса формирования изображения двойной точки с процессом формирования изображения двойной линии. Приведите формулы и графики, отображающие процесс формирования двойного изображения линии и дайте численные примеры.

101. Дайте развернутый анализ понятия чувствительности поперечных оптических измерительных наводок, ее зависимости от размера дифракционного изображения и формы штрихов сетки прибора и объекта, которые должны совмещаться.
102. Дайте развернутый ответ, какую последовательность операций должна предусматривать поперечная наводка и каким соотношением изображений анализатора и объекта определяется момент совмещения, т.е. отсчета. Приведите, как пример: описание структуры суммарного изображения при совмещении штриха с биссектором.
103. Дайте развернутый анализ работы визуального прибора совместно с глазом; сравнение практической точности совмещения с угловым разрешением глаза. Дайте формулы и численные значения величин.
104. Дайте развернутый сравнительный анализ практической точности совмещения с тремя разновидностями формы совмещаемых объектов при работе визуального измерительного прибора совместно с глазом.
105. Дайте развернутый анализ понятия чувствительности поперечных наводок глаза. Приведите формулы и численные значения для разных видов совмещаемых объектов.
106. Дайте развернутый ответ, какими свойствами характеризуется пороговая чувствительность глаза к разности освещенности  $\Delta E_{\text{г}}$  двух смежно расположенных полей. Приведите формулу и численные значения.
107. Дайте развернутый анализ пороговой практической чувствительности глаза, имеющего выходной зрачок  $D' \geq 2$  мм, в угловой мере и в линейной мере, для плоскости объекта зрительных труб. Приведите формулы и численные значения.
108. Раскройте понятие практической разрешающей способности и чувствительности поперечных наводок. Дайте развернутый анализ требований к контрасту изображений сеток и объектов, увеличению прибора; остаточным aberrациям оптической системы прибора. Приведите формулы и численные значения.



109. Дайте развернутый анализ взаимосвязи остаточных aberrаций у оптической системы прибора и практической чувствительности наводок.
110. Дайте развернутый анализ традиционного метода измерения разрешающей способности по изображению миры. Приведите пример оценки качества объектива по виду изображения миры.
111. Дайте сравнительный анализ, как различные aberrации отображаются в изображении миры и как выглядит изображение миры для объектива с хорошо исправленными aberrациями.
112. Дайте развернутый ответ, что подразумевается под разрешающей силой объектива при формировании им изображения двух светящихся точек.
113. Раскройте понятие: критерий разрешающей силы объектива при измерении разрешения по сформированному им изображению линейной миры, состоящей из серии квадратов, содержащих линейные решетки различной частоты.
114. Дайте развернутый анализ достоинств и недостатков визуальных методов контроля качества изображения. Сформулируйте причины, по которым для оценки передающих свойств объектива недостаточно измерения разрешающей способности, а требуется более полная, количественная и объективная информация о качестве оптического изображения, получаемая с применением методов и аппаратуры, дающих однозначные количественные результаты и не зависящих от индивидуальных особенностей зрения испытателя.
115. Дайте развернутое описание механизма передачи изображения через оптическую систему, когда изображаемый предмет рассматривается как совокупность светящихся точек и известны ФРТ изображающей оптической системы в численном выражении. Сформулируйте понятия: линейность оптической системы, свертка. Дайте развернутый анализ роли свертки в процессе формирования изображения объекта оптической системой, для которой известна ФРТ в численном выражении.

116. Дайте развернутое описание механизма передачи изображения через оптическую систему, когда изображаемый объект рассматривается как суперпозиция элементарных объектов, яркость в которых распределена по синусоидальному закону и известна функция, являющаяся Фурье-преобразованием ФРТ изображающей оптической системы в численном выражении. Раскройте понятие: ОПФ.
117. Дайте развернутый ответ, какой вариант механизма передачи изображения через оптическую систему позволяет находить распределение освещенности в изображении при известной функции объекта и ФРТ и в то же время без вычисления свертки, а ОПФ каскада приборов определяется как простое произведение всех ОПФ отдельных звеньев.
118. Дайте развернутый ответ, какой вариант механизма передачи изображения через оптическую систему оптимален для описания работы приборов, предназначенных для передачи мелкой структуры протяженных объектов (например, в аэрофотографии), где можно значительно нагляднее судить об особенностях передачи структуры по ОПФ, чем по ФРТ. Дайте анализ случая и приведите пример, когда в приборах, предназначенных для получения изображений точечных объектов (например, в телескопах) или изображений линии (в спектральных приборах), функции рассеяния дают самое прямое и наглядное представление о качестве изображения.
119. Дайте развернутое определение, как называется число, принятое для характеристики качества изображения контролируемой оптической системы в условиях крупносерийного производства. Дайте развернутый ответ, какие характеристики качества изображения нужно проанализировать для получения данного числа.
120. Раскройте понятие критерия качества изображения, дайте анализ данного понятия на примере разрешения оптической системы по критерию Рэлея и по разрешающей способности на основе линейной решетки переменной частоты или миры.

121. Раскройте понятие линейного предела разрешения, определяемого с помощью ФРТ и ОПФ и приведите формулу для определения контраста в изображении пары точек для любой оптической системы. Дайте развернутый анализ критерия Рэлея. Как соотносится радиус диска Эри в дифракционном изображении каждой из двух точек с расстоянием от центра диска Эри до первого дифракционного минимума и с разрешением по Рэлею.
122. Дайте развернутый анализ понятия концентрации энергии в пятне рассеяния. Приведите формулы для вычисления ФКЭ на основе численных значений ФРТ.
123. Дайте развернутый ответ и приведите таблицу численных значений распределения концентрации энергии в дифракционном кружке идеальной оптической системы. Укажите процентное содержание энергии в пределах диска Эри.
124. Вычислите, чему равна разрешающая способность системы при  $\lambda = 0,6328$  мкм для оптических систем с апертурами: 0,025; 0,1; 0,5 и 0,95.
124. Дайте развернутый анализ теоретических предпосылок задачи исследования структуры пятна рассеяния. Дайте развернутое рассмотрение комплекса основных характеристик качества изображения, требующих количественной и качественной оценки. Дайте развернутый сравнительный анализ этих характеристик и приведите математические выражения, отображающие их взаимосвязь.
125. Дайте развернутое описание способов прямого измерения структуры изображения точечного тест-объекта. Сформулируйте возможности и значение экспериментально найденной ФРТ, как характеристики качества системы, ее возможности для учета всех особенностей волновой поверхности, сформированной системой, включая характер микрорельефа оптических поверхностей; дефекты оптических материалов; блики; отклонения пропускания (или отражения) на зрачке; сдвиги изображения, возникающие при работе прибора.

126. Дайте развернутый ответ, как ФРТ, являясь первичной характеристикой качества изображения, позволяет перейти к требуемым характеристикам качества изображения, таким, как: ФРЛ; ЧКХ; краевая функция; ФКЭ и др.
127. Дайте анализ понятия «экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния». Приведите пример схемы для контроля линзовых систем в проходящем свете. Сформулируйте требования к апертурному углу микрообъектива в составе установки. Раскройте понятие контроля качества оптической системы в положении наименьших или расчетных aberrаций. Приведите формулы и примеры.
128. Дайте развернутый анализ понятия классификации традиционных методов экспериментального исследования и измерения ФРТ и ФРЛ реальных оптических систем, дайте развернутый ответ о двух основных группах методов приборного исследования.
129. Дайте развернутый ответ, какими свойствами характеризуется фотографический процесс, используемый в оптической измерительной системе.
130. Дайте развернутый анализ основных характеристик фотографического процесса применительно к задаче исследования структуры оптического изображения.
131. Дайте анализ понятия характеристической кривой фотографического материала. Раскройте понятие подразделения характеристической кривой на функциональные участки; дайте анализ свойств этих участков; приведите математические соотношения, характеризующие свойства характеристической кривой в процессе измерений. Сформулируйте значение рабочего участка характеристической кривой в процессе измерения ФРТ и ФРЛ оптической системы.

132. Дайте развернутый анализ ФП фотографического процесса при использовании фотоматериала для измерения структуры изображения и исследовании характеристик качества изображения, сформированного оптической системой, в том числе при исследовании структуры оптического изображения, например, пятна рассеяния, методом фотографической фотометрии.
133. Дайте развернутый ответ, из каких этапов состоит методика фотографической фотометрии.
134. Дайте развернутый анализ методики применения ФП фотографического процесса, как калибровочной кривой в процессе определения численных значений ФРТ в процессе фотографической фотометрии.
135. Сформулируйте принцип метода изофотометрии с переменным временем накопления. Дайте развернутый анализ изофотометрического метода измерения ФРТ, когда получают лишь ограниченное число значений функции в ряде характерных точек, характеризуя распределение освещенности в оптическом изображении пятна рассеяния конечным числом замкнутых кривых – изофот.
136. Раскройте понятие ФП, применяемой при регистрации данного оптического изображения в виде серии последовательных кадров при осуществлении ряда экспозиций различной длительности с использованием ФП типа «импульс» для формирования каждой изофоты исследуемого оптического изображения. Приведите пример реализации метода изофотометрии с переменным временем накопления, с развернутым анализом математического аппарата метода.
137. Сформулируйте принцип метода изофотометрии с изменяющимся световым потоком. Дайте развернутый ответ, на каком основании принцип метода изофотометрии с изменяющимся световым потоком можно считать обратным принципу изофотометрии с переменным накоплением.

138. Дайте развернутый анализ изофотометрического метода измерения ФРТ, когда получают лишь ограниченное число значений функции в ряде характерных точек, характеризуя распределение освещенности в оптическом изображении пятна рассеяния конечным числом замкнутых кривых – изофот, полученных в условиях дискретного изменения времени накопления в процессе изофотометрии ФРТ.
139. Сформулируйте методику измерения ФРТ методом изофотометрии с изменяющимся световым потоком. Дайте развернутый сравнительный анализ достоинств и недостатков метода изофотометрии с переменным временем накопления и метода изофотометрии с изменяющимся световым потоком.
140. Сформулируйте принцип метода изофотометрии ФРЛ. Дайте развернутый анализ изофотометрического метода измерения ФРЛ, когда распределение освещенности поперек изображения щели получают в виде логарифмической кривой ФРЛ, фотографируя изображение щели через фотометрический клин.
141. Дайте развернутый анализ изофотометрического метода измерения ФРЛ, когда при фоторегистрации изображения щели через фотометрический клин результирующее двумерное распределение относительной освещенности характеризуется в поперечном сечении ФРЛ, а в поперечном направлении – функцией модуляции освещенности клином. Изофота такого распределения дает график ФРЛ с логарифмической шкалой освещенностей.
142. Сформулируйте принцип интерференционного метода оценки aberrаций. Дайте развернутый анализ интерференционного метода измерения ФРЛ, когда проблема исследования оптической системы ставится как задача о деформациях, претерпеваемых поверхностью световой волны.
143. Сформулируйте преимущество интерферограммы, когда при определенных условиях может быть получена интерференционная картина, подобная топографической карте исследуемой волновой поверхности, где изолинии уровня (горизонталы) представлены в виде полос с разностью хода, кратной длине волны.

144. Дайте развернутый сравнительный анализ, когда метод интерферометрии сочетает достоинство наглядности, подобно теневому методу, с достоинством возможности количественных оценок деформаций волнового фронта, связанных с аберрациями оптических систем и ошибками оптических поверхностей и элементов.
145. Дайте развернутый ответ, каким образом общий вид интерференционной картины позволяет опознать характер преобладающей аберрации для исследуемой системы.
146. Сформулируйте принцип интерференционного метода по схеме Физо. Дайте развернутый сравнительный анализ, как высокая чувствительность к вибрации двухлучевого интерферометра Тваймана послужила стимулом к поиску схемных решений интерферометров, в которых этот недостаток снижен, и, в наши дни, этот недостаток преодолен созданием интерферометра по схеме Физо.
147. Дайте развернутое описание схемы интерферометра Физо, где рабочее плечо, содержащее исследуемую поверхность или систему, совмещено с опорным плечом, содержащим образцовую («эталонную») деталь или поверхность, формирующую опорный волновой фронт.
148. Дайте развернутый ответ, каким образом исключается влияние паразитной интерференционной картины, возникающей при отражении плоского фронта от обратной, нерабочей поверхности образцовой пластины, когда эта поверхность выполнена с небольшой клиновидностью.

## Требования к оформлению отчетов по ответам на вопросы

Ответы на вопросы и решение задач позволяют закрепить знания, полученные при изучении дисциплины «Оптические измерения», глубже понять физический смысл лабораторного практикума и закрепить лекционный материал.

Ответы на вопросы представляются в письменном виде в форме развернутого изложения, описания или анализа на тему, заданную в вопросе. Главная задача при изложении ответа на вопрос – раскрыть тему, заданную полученным вопросом. Ответ на вопрос (или группу вопросов) оформляется в виде отчета, содержащего следующую структуру:

- 1) титульный лист:
  - название кафедры и факультета;
  - название дисциплины (практикум);
  - студент (Ф.И.О.), группа (номер);
- 2) основной текст отчета:
  - Ответы на контрольные вопросы  
*Вопрос:*.....  
*Ответ:* .....
  - Список литературы

### Оформление текста отчета:

1. Текстовый редактор Word 2003, 2007.
2. Шрифт – 14 пт.
3. Межстрочный интервал – двойной.
4. Формулы – редактор формул «Equation».
5. Рисунки, схемы, фото – включаются в текст в виде завершенных графических объектов («рисунок») и снабжаются (при необходимости) самостоятельной сквозной нумерацией для каждого ответа на вопрос.
6. Отчет «Ответы на вопросы по дисциплине «Оптические измерения» сдается преподавателю в виде файла и распечатки. (Файл может быть направлен в адрес преподавателя по e-mail или доставлен на электронном носителе для перенесения на кафедральный компьютер).

При отсутствии у студента возможности выполнить работу на компьютере она может быть выполнена и сдана в рукописном виде.



## Раздел 6. ЗАДАЧИ. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

### Расчет продольных и поперечных смещений

Продольные и поперечные смещения (на предмете; изображении; сетке прибора и т.д.) могут быть перенесены из пространства предметов в пространство изображений при условии, что оптическая система идеальна, т.е. свободна от аберраций. Для расчета продольного или поперечного увеличений оптической системы или ее части используются следующие формулы

$$V = \frac{\Delta y'}{\Delta y}, \quad V^2 = \frac{\Delta z'}{\Delta z},$$

где  $V$  – обобщенное увеличение системы или ее части;  $\Delta y$  и  $\Delta y'$  – обобщенные поперечные смещения в пространстве предметов и изображений;  $\Delta z$  и  $\Delta z'$  – обобщенные малые продольные смещения в пространстве предметов и изображений.

Если предмет (изображение) находится на конечном расстоянии, то продольные отрезки измеряются в миллиметрах.

Если предмет (изображение) находится на бесконечности, продольные отрезки измеряются от центра зрачка в миллиметрах в минус первой степени, т.е. в килодиоптриях ( $\text{мм}^{-1}$ ; кдптр). Отрезок, показывающий положение предмета, например, для зрительных труб, имеет смысл смещения по отношению к строгой бесконечности

(0 кдптр) и равен  $\Delta z = \frac{1}{t}$  ( $\text{мм}^{-1}$ ; кдптр), где  $t$  – расстояние от входного

зрачка зрительной трубы, до предмета. В расчетных формулах необходимо употребление указанных размерностей, окончательные результаты могут быть представлены в диоптриях.

Если предмет (изображение) находится на бесконечности, то малый поперечный отрезок, может оцениваться самим углом  $\omega$ , а не  $t g \omega$  и измеряться в радианах (рад). В расчетных формулах необходимо употреблять радианы, а результаты удобнее всего представлять в секундах.

## Задачи

1. Погрешность измерения поперечных отрезков составляет величину  $\Delta y'_c$  на сетке микроскопа. Чему равна погрешность в пространстве предметов и за окуляром, если увеличение объектива  $V$ , а видимое увеличение окуляра  $\Gamma$ ?
  - а)  $\Delta y'_c = 0,01 \text{ мм}$ ,  $V = -10^\times$ ,  $\Gamma = 10^\times$ ;
  - б)  $\Delta y'_c = 0,005 \text{ мм}$ ,  $V = -20^\times$ ,  $\Gamma = 10,5^\times$ ;
  - в)  $\Delta y'_c = 0,005 \text{ мм}$ ,  $V = -8^\times$ ,  $\Gamma = 20^\times$ .
2. Чему равна погрешность измерения поперечных отрезков в пространстве предметов и за окуляром? Увеличение объектива  $V$ , видимое увеличение окуляра  $\Gamma$ :
  - а)  $V = -8^\times$ ,  $\Gamma = 5^\times$ ;
  - б)  $V = -10^\times$ ,  $\Gamma = 10^\times$ ;
  - в)  $V = -5^\times$ ,  $\Gamma = 20^\times$ .Погрешность измерения поперечных отрезков на сетке микроскопа составляет  $0,01 \text{ мм}$ .
3. Насколько сместится изображение в пространстве сетки и после окуляра микроскопа с увеличением объектива  $V_{об}$ , видимым увеличением окуляра  $\Gamma_{ок}$ , если объект переместится вдоль оси на величину  $\Delta z$ ?
  - а)  $V_{об} = -10^\times$ ,  $\Gamma_{ок} = 10^\times$ ,  $\Delta z = 0,01 \text{ мм}$ ;
  - б)  $V_{об} = -20^\times$ ,  $\Gamma_{ок} = 12,5^\times$ ,  $\Delta z = 0,005 \text{ мм}$ ;
  - в)  $V_{об} = -8^\times$ ,  $\Gamma_{ок} = 20^\times$ ,  $\Delta z = 0,05 \text{ мм}$ .
4. Насколько сместится изображение в пространстве сетки и в пространстве изображений микроскопа, если весь микроскоп придвинули к объекту на  $0,01 \text{ мм}$ ? Видимое увеличение окуляра равно  $10^\times$ , увеличение объектива  $V_{об}$ .
  - а)  $V_{об} = -7^\times$ ;
  - б)  $V_{об} = -10^\times$ ;
  - в)  $V_{об} = -15^\times$ .

5. На какое расстояние сместится изображение после объектива и после всего микроскопа, если объект был отодвинут на 0,1 мм? Микроскоп имеет апертуру  $A$ , диаметр выходного зрачка  $D'$ , увеличение объектива  $V_{об}$ :
- а)**  $A = 0,1$ ,  $D' = 2$  мм,  $V_{об} = -3^{\times}$ ;
- б)**  $A = 0,2$ ,  $D' = 2$  мм,  $V_{об} = -8^{\times}$ ;
- в)**  $A = 0,3$ ,  $D' = 1$  мм,  $V_{об} = -10^{\times}$ .
6. Микроскоп имеет объектив с увеличением  $8^{\times}$ , сетку и окуляр с видимым увеличением  $\Gamma$ . На какое расстояние сместится изображение относительно сетки и относительно выходного зрачка микроскопа, если объект отодвинуть от микроскопа на 0,1 мм?
- а)**  $\Gamma = 7^{\times}$ ;
- б)**  $\Gamma = 10^{\times}$ ;
- в)**  $\Gamma = 15^{\times}$ .
7. Для восстановления резкости изображения в микроскопе сетка с окуляром были отодвинуты на 1 мм. Чему равнялось смещение объекта, вызвавшее нерезкость? Видимое увеличение микроскопа  $\Gamma_{м}$ , видимое увеличение окуляра  $\Gamma_{ок}$ :
- а)**  $\Gamma_{м} = 100^{\times}$ ,  $\Gamma_{ок} = 10^{\times}$ ;
- б)**  $\Gamma_{м} = 200^{\times}$ ,  $\Gamma_{ок} = 12,5^{\times}$ ;
- в)**  $\Gamma_{м} = 400^{\times}$ ,  $\Gamma_{ок} = 20^{\times}$ .
8. Резкость изображения в микроскопе была восстановлена за счет увеличения длины тубуса на 1 мм. Чему равнялось смещение объекта, вызвавшее нерезкость? Видимое увеличение окуляра равно  $10^{\times}$ , видимое увеличение микроскопа  $\Gamma$ :
- а)**  $\Gamma = 100^{\times}$ ;
- б)**  $\Gamma = 200^{\times}$ ;
- в)**  $\Gamma = 400^{\times}$ .

9. Погрешность измерения продольных отрезков в пространстве предметов с помощью микроскопа  $\Delta z$ . Чему равна погрешность в пространстве сетки и за окуляром, если видимое увеличение микроскопа  $\Gamma_m$ , увеличение объектива  $V_{об}$ ?
- а)  $\Delta z = 0,0005 \text{ мм}$ ,  $\Gamma_m = 400^\times$ ,  $V_{об} = 40^\times$ ;  
 б)  $\Delta z = 0,001 \text{ мм}$ ,  $\Gamma_m = 200^\times$ ,  $V_{об} = 40^\times$ ;  
 в)  $\Delta z = 0,005 \text{ мм}$ ,  $\Gamma_m = 100^\times$ ,  $V_{об} = 10^\times$ .
10. Чему равна погрешность измерения продольных отрезков в пространстве сетки и за окуляром? Увеличение объектива равно  $(-8^\times)$ , видимое увеличение микроскопа  $\Gamma$ :
- а)  $\Gamma = -80^\times$ ;  
 б)  $\Gamma = -120^\times$ ;  
 в)  $\Gamma = -160^\times$ .
- Погрешность измерения продольных отрезков в пространстве предметов с помощью микроскопа равна  $0,01 \text{ мм}$ .
11. Микроскоп отодвинули от объектива на  $0,2 \text{ мм}$ . Насколько сместится изображение по отношению к сетке микроскопа и изменится сходимость пучков за окуляром? Фокусное расстояние окуляра  $f'_{ок}$ , увеличение объектива  $V_{об}$ :
- а)  $f'_{ок} = 10 \text{ мм}$ ,  $V_{об} = -8^\times$ ;  
 б)  $f'_{ок} = 12,5 \text{ мм}$ ,  $V_{об} = -10^\times$ ;  
 в)  $f'_{ок} = 25 \text{ мм}$ ,  $V_{об} = -20^\times$ .
12. Погрешность измерения сходимости пучков с помощью диоптрийной трубки равна  $\Delta z$ . Определить соответствующую погрешность продольной шкалы зрительной трубы, связанной со смещением объектива, если фокусное расстояние объектива диоптрийной трубки  $f'_{об}$ .
- а)  $\Delta z = 0,005 \text{ дптр}$ ,  $f'_{об} = 100 \text{ мм}$ ;  
 б)  $\Delta z = 0,05 \text{ дптр}$ ,  $f'_{об} = 80 \text{ мм}$ ;  
 в)  $\Delta z = 0,01 \text{ дптр}$ ,  $f'_{об} = 70 \text{ мм}$ .

13. Определить расстояние между штрихами продольной шкалы диоптрийной трубки, если измерение производится путем смещения объектива, а цена деления шкалы в два раза больше величины погрешности. Фокусное расстояние объектива диоптрийной трубки  $f'$  :
- а)  $f' = 70$  мм;
  - б)  $f' = 80$  мм;
  - в)  $f' = 100$  мм.
- Погрешность измерения сходимости пучков с помощью диоптрийной трубки равна 0,05 дптр.
14. Насколько сместиться изображение на сетке зрительной трубы с фокусным расстоянием объектива  $f'_{об}$  и видимым увеличением окуляра  $\Gamma_{ок}$ , если объект, находящийся на расстоянии 50 м, сместиться на расстояние  $\Delta y$  в поперечном направлении? Чему равно смещение за окуляром зрительной трубы?
- а)  $f'_{об} = 1000$  мм,  $\Gamma_{ок} = 15^\times$ ,  $\Delta y = 2$  м;
  - б)  $f'_{об} = 500$  мм,  $\Gamma_{ок} = 10^\times$ ,  $\Delta y = 2$  м;
  - в)  $f'_{об} = 250$  мм,  $\Gamma_{ок} = 7^\times$ ,  $\Delta y = 1$  м.
15. Насколько сместиться изображение на сетке зрительной трубы с фокусным расстоянием объектива  $f'$  и видимым увеличением окуляра  $10^\times$ , если объект, находящийся на расстоянии 100 м, сместиться на величину 2 м в поперечном направлении? Чему равно смещение за окуляром зрительной трубы?
- а)  $f' = 500$  мм;
  - б)  $f' = 250$  мм;
  - в)  $f' = 150$  мм.
16. Погрешность измерения поперечных отрезков равна  $\Delta y$  в пространстве предметов микроскопа. Чему равна погрешность в пространстве сетки и за окуляром, если увеличение объектива  $V_{об}$ , а видимое увеличение окуляра  $\Gamma_{ок}$  ?
- а)  $\Delta y = 0,1$  мкм,  $V_{об} = -20^\times$ ,  $\Gamma_{ок} = 12,5^\times$ ;
  - б)  $\Delta y = 1$  мкм,  $V_{об} = -5^\times$ ,  $\Gamma_{ок} = 20^\times$ ;
  - в)  $\Delta y = 0,5$  мкм,  $V_{об} = -10^\times$ ,  $\Gamma_{ок} = 10^\times$ .

17. Чему равна погрешность измерения поперечных отрезков в пространстве сетки и за окуляром? Видимое увеличение окуляра равно  $10^{\times}$ , увеличение объектива  $V_{об}$ :
- $V_{об} = -8^{\times}$ ;
  - $V_{об} = -10^{\times}$ ;
  - $V_{об} = -20^{\times}$ .
- Погрешность измерения поперечных отрезков в пространстве предметов микроскопа равна 1 мкм.
18. Погрешность измерения углов с помощью теодолита равна  $\Delta\omega$ . Чему равна погрешность в пространстве сетки и после окуляра, если фокусное расстояние объектива  $f'_{об}$ , а видимое увеличение окуляра  $\Gamma_{ок}$ ?
- $\Delta\omega = 1''$ ,  $f'_{об} = 250$  мм,  $\Gamma_{ок} = 10^{\times}$ ;
  - $\Delta\omega = 0,5''$ ,  $f'_{об} = 300$  мм,  $\Gamma_{ок} = 20^{\times}$ ;
  - $\Delta\omega = 2''$ ,  $f'_{об} = 500$  мм,  $\Gamma_{ок} = 15^{\times}$ .
19. Погрешность измерения углов с помощью теодолита равна  $\Delta\omega$ . Чему равна погрешность в пространстве сетки и после окуляра, если фокусное расстояние объектива  $f'_{об}$ , а видимое увеличение окуляра равно  $10^{\times}$ ?
- $\Delta\omega = 5''$ ,  $f'_{об} = 250$  мм;
  - $\Delta\omega = 2''$ ,  $f'_{об} = 300$  мм;
  - $\Delta\omega = 10''$ ,  $f'_{об} = 200$  мм.
20. Рассчитать, насколько сместится изображение в пространстве сетки зрительной трубы с фокусным расстоянием объектива  $f'_{об}$  и фокусным расстоянием окуляра  $f'_{ок}$ , если объект переместился из бесконечности на расстояние  $t$  от объектива. Насколько сместится изображение за окуляром?
- $f'_{об} = 250$  мм,  $f'_{ок} = 10$  мм,  $t = 20$  м;
  - $f'_{об} = 300$  мм,  $f'_{ок} = 15$  мм,  $t = 40$  м;
  - $f'_{об} = 500$  мм,  $f'_{ок} = 20$  мм,  $t = 50$  м.

21. Рассчитать, насколько сместится изображение в пространстве сетки зрительной трубы с фокусным расстоянием объектива  $f'_{об}$  и фокусным расстоянием окуляра равным  $10^{\times}$ , если объект переместился из бесконечности на расстояние  $t$  от объектива. Чему равно смещение изображения за окуляром?
- а)  $f'_{об} = 150$  мм,  $t = 10$  м;  
 б)  $f'_{об} = 200$  мм,  $t = 20$  м;  
 в)  $f'_{об} = 250$  мм,  $t = 30$  м.
22. На каком расстоянии от зрительной трубы находился объект, если сетку вместе с окуляром пришлось отодвинуть на 1 мм? Чему равнялась сходимости пучков за окуляром до фокусировки? Фокусное расстояние объектива  $f'_{об}$ , фокусное расстояние окуляра  $f'_{ок}$ :
- а)  $f'_{об} = 300$  мм,  $f'_{ок} = 15$  мм;  
 б)  $f'_{об} = 250$  мм,  $f'_{ок} = 10$  мм;  
 в)  $f'_{об} = 500$  мм,  $f'_{ок} = 20$  мм.
23. На каком расстоянии от зрительной трубы находился объект, если, для фокусировки на него сетку вместе с окуляром пришлось отодвинуть от объектива на 1 мм по отношению к их положению при настройке на бесконечность? Чему равнялась сходимости пучков за окуляром, вызванная расфокусировкой? Фокусное расстояние объектива  $f'$ , видимое увеличение окуляра  $\Gamma$ :
- а)  $f' = 100$  мм,  $\Gamma = 15^{\times}$ ;  
 б)  $f' = 150$  мм,  $\Gamma = 10^{\times}$ ;  
 в)  $f' = 200$  мм,  $\Gamma = 20^{\times}$ .
24. Чему равна погрешность измерения продольных отрезков в пространстве предметов и изображений? Фокусное расстояние объектива  $f'_{об}$ , фокусное расстояние окуляра  $f'_{ок}$ :
- а)  $f'_{об} = 250$  мм,  $f'_{ок} = 10$  мм;  
 б)  $f'_{об} = 300$  мм,  $f'_{ок} = 15$  мм;  
 в)  $f'_{об} = 500$  мм,  $f'_{ок} = 20$  мм.
- Погрешность измерения продольных отрезков в пространстве сетки зрительной трубы равна 0,1 мм.

25. Чему равна погрешность измерения продольных отрезков в пространстве предметов и изображений? Видимое увеличение зрительной трубы  $\Gamma$ , фокусное расстояние объектива  $f'$ :

а)  $\Gamma = 10^\times$ ,  $f' = 150$  мм;

б)  $\Gamma = 20^\times$ ,  $f' = 200$  мм;

в)  $\Gamma = 25^\times$ ,  $f' = 250$  мм.

Погрешность измерения продольных отрезков в пространстве сетки равна 0,1 мм.

26. Расстояние от зрительной трубы до объекта можно измерить с помощью диоптрийной шкалы окуляра. Чему равно это расстояние? Отсчет по шкале  $\Delta z'$ , фокусное расстояние объектива  $f'_{об}$ , фокусное расстояние окуляра  $f'_{ок}$ :

а)  $\Delta z' = -2$  дптр,  $f'_{об} = 250$  мм,  $f'_{ок} = 20$  мм;

б)  $\Delta z' = -3$  дптр,  $f'_{об} = 300$  мм,  $f'_{ок} = 15$  мм;

в)  $\Delta z' = -5$  дптр,  $f'_{об} = 500$  мм,  $f'_{ок} = 10$  мм.

27. Расстояние от зрительной трубы до объекта можно измерить с помощью диоптрийной шкалы окуляра. Чему равно это расстояние? Отсчет по шкале  $\Delta z'$ , фокусное расстояние объектива  $f'_{об}$ :

а)  $\Delta z' = -6$  дптр,  $f'_{об} = 300$  мм;

б)  $\Delta z' = -4$  дптр,  $f'_{об} = 250$  мм;

в)  $\Delta z' = -3$  дптр,  $f'_{об} = 200$  мм.

Фокусное расстояние окуляра равно 25 мм.

28. Насколько изменится фокусное расстояние объектива зрительной трубы  $f'$ , при смещении изображения на величину  $\Delta z'$ ? Зрачки совпадают с главными плоскостями.

а)  $f' = 1000$  мм,  $\Delta z' = 0,5$  мм;

б)  $f' = 500$  мм,  $\Delta z' = 0,1$  мм;

в)  $f' = 200$  мм,  $\Delta z' = 0,1$  мм.



29. Как изменится масштаб изображения аэрофотосъемочного объектива с фокусным расстоянием  $f'$ , если пленку поместить на расстоянии  $\Delta z'$  от фокальной плоскости? Зрачки совпадают с главными плоскостями.
- а)  $f' = 100$  мм,  $\Delta z' = 0,05$  мм;
  - б)  $f' = 50$  мм,  $\Delta z' = 0,02$  мм;
  - в)  $f' = 200$  мм,  $\Delta z' = 0,1$  мм.
30. Как изменится масштаб изображения, создаваемого аэрофотосъемочным объективом с фокусным расстоянием  $f'$ , если пленку поместить на расстоянии  $\Delta z'$  от фокальной плоскости? Выходной зрачок удален на расстояние 30 мм от задней главной плоскости.
- а)  $f' = 150$  мм,  $\Delta z' = 0,5$  мм;
  - б)  $f' = 75$  мм,  $\Delta z' = 1$  мм;
  - в)  $f' = 100$  мм,  $\Delta z' = 0,1$  мм.
31. Как изменится увеличение  $V_{об}$  репродукционного объектива, если экран смещен на величину  $\Delta z'$  по отношению к расчетному положению? Фокусное расстояние объектива  $f'_{об}$ .
- а)  $V_{об} = -20^{\times}$ ,  $f'_{об} = 50$  мм,  $\Delta z' = -20$  мм;
  - б)  $V_{об} = -10^{\times}$ ,  $f'_{об} = 100$  мм,  $\Delta z' = -50$  мм;
  - в)  $V_{об} = -30^{\times}$ ,  $f'_{об} = 30$  мм,  $\Delta z' = -20$  мм.
- Зрачки расположены в главных плоскостях объектива.
32. Измеряется угловой размер планеты с помощью объектива телескопа по величине изображения. Найти относительную погрешность измерения вследствие дефокусировки объектива. Погрешность фокусировки составляет величину  $\Delta z'$ , фокусное расстояние объектива  $f'$ :
- а)  $f' = 1000$  мм,  $\Delta z' = 0,5$  мм;
  - б)  $f' = 500$  мм,  $\Delta z' = 0,5$  мм;
  - в)  $f' = 5000$  мм,  $\Delta z' = 1$  мм.
- Зрачки совпадают с главными плоскостями.

33. Угловой размер планеты измеряется с помощью объектива телескопа по величине изображения. Найти относительную погрешность измерения вследствие дефокусировки объектива. Величина фокусировки составляет  $\Delta z'$ , фокусное расстояние объектива  $f'$ :

а)  $f' = 1500$  мм,  $\Delta z' = 0,2$  мм;

б)  $f' = 1000$  мм,  $\Delta z' = 0,2$  мм;

в)  $f' = 6000$  мм,  $\Delta z' = 0,5$  мм.

Зрачки расположены в главных плоскостях объектива.

### Примеры решения задач

**Пример 1.** Погрешность измерения углов с помощью теодолита равна  $0,5''$ . Чему равна погрешность в пространстве сетки и после окуляра, если фокусное расстояние объектива  $f'_{об} = 250$  мм, а видимое увеличение окуляра  $\Gamma_{ок} = 20^\times$ ?

Решение:

Найдем видимое увеличение зрительной трубы теодолита.

$$\Gamma_{зТ} = \frac{f'_{об}}{f'_{ок}}, \quad \text{отсюда} \quad \frac{1}{f'_{ок}} = \frac{\Gamma_{ок}}{250} = \frac{20}{250} = 0,08 \left( \frac{1}{\text{мм}} \right);$$

$\Gamma_{зТ} = 250 \cdot 0,08 = 20^\times$ . Перенесем погрешность из пространства предметов в пространство изображений. Поскольку величина погрешности выражается в одних и тех же единицах (в пространстве предметов и в пространстве изображений), можно вести расчеты непосредственно в секундах

$$\Gamma_{зТ} = \frac{\Delta\omega'}{\Delta\omega}, \quad \text{отсюда} \quad \Delta\omega' = \Delta\omega \cdot \Gamma_{зТ} = 0,5'' \cdot 20^\times = 10''.$$

Погрешность на сетке теодолита найдем по погрешности в пространстве предметов и увеличению объектива. Здесь величину погрешности надо подставлять в формулу в радианах

$$f'_{об} = \frac{\Delta y'_c}{\Delta\omega}, \quad \text{отсюда} \quad \Delta y'_c = \Delta\omega \cdot f'_{об} = 0,5 \cdot 5 \cdot 10^{-6} \cdot 250 = \\ = 0,000625 \text{ мм} = 0,625 \text{ мкм}.$$

Ответ:  $\Delta\omega' = 10''$ ,  $\Delta y'_c = 0,625$  мкм.

**Пример 2.** На каком расстоянии от зрительной трубы находился объект, если сетку вместе с окуляром пришлось отодвинуть на 1 мм для получения резкого изображения на сетке? Чему равнялась сходимости пучков за окуляром до фокусировки? Фокусное расстояние объектива  $f'_{об} = 300$  мм, фокусное расстояние окуляра  $f'_{ок} = 15$  мм.

Решение:

Для того, чтобы пользоваться формулами, большие продольные отрезки необходимо выражать в миллиметрах в минус первой степени или в килодиоптриях. Найдем смещение в пространстве предметов по смещению в пространстве сетки и увеличению объектива:  $f'_{об} = \frac{\Delta z'_c}{\Delta z}$ ,

отсюда  $\Delta z = \frac{\Delta z'_c}{f'^2_{об}} = \frac{1}{300^2} = 0,111 \cdot 10^{-4} \left( \frac{1}{\text{мм}} \right) = 0,0111 \text{ дптр}$ . Смещение в

пространстве изображений можно найти по смещению в пространстве предметов и увеличению зрительной трубы. Расчеты удобно вести непосредственно в диоптриях, так как единицы измерения продольных отрезков одинаковы для пространства предметов и изображений зрительной трубы.  $\Gamma_{зТ} = \frac{f'_{об}}{f'_{ок}} = \frac{300}{15} = 20^\times$ ;  $\frac{\Delta z'}{\Delta z} = \Gamma_{зТ}^2$ ,

отсюда  $\Delta z' = \Delta z \cdot \Gamma_{зТ}^2 = 0,0111 \cdot 400 = 4,44 \text{ дптр}$ .

Ответ:  $\Delta z = 0,0111 \text{ дптр}$ ,  $\Delta z' = 4,44 \text{ дптр}$ .

## Анализ случайных погрешностей наведения. Сравнение методов наведения. Расчет случайной погрешности наведения при заданном методе наведения. Выбор оптики устройств наведения по случайной погрешности наведения. Расчет допусков на механические перемещения по случайной погрешности наведения

Случайная погрешность наведения определяется экспериментально, путем многократных наведений выбранным методом. Группа результатов наблюдений обрабатывается в предположении, что случайная погрешность наведения распределена нормально. Окончательно случайная погрешность наведения представляется либо в виде среднеквадратического значения случайной погрешности наведения, либо в интервальном виде. Далее считаем, что случайная погрешность наведения выражена в интервальном виде при доверительной вероятности  $\alpha = 95\%$ :

$$\pm \Delta y_n = \pm 2\sigma_y, \alpha = 95\%.$$

Для сравнения отдельных методов наведения случайную погрешность наведения удобно выразить в канонических единицах. В этом случае случайная погрешность наведения не зависит: от типа системы; спектрального интервала; от пространства, в котором она определена, а зависит только от метода совмещения (от вида объекта, анализатора, приемника). Для наиболее распространенных методов наведения случайная погрешность известна (табл. 3–5), и эти известные значения случайной погрешности могут использоваться как опорные, при выборе и сравнении методов наведения.

Таблица 3. Данные экспериментального исследования случайной погрешности визуальных методов поперечного наведения

п/п	Вид объекта и анализатора, метод совмещения	Случайная погрешность наведения		
		$\Delta\eta_n$ , к.ед.	для приборов дальнего действия, сек.	для приборов ближнего действия, мкм
1.	Край объекта совмещается с перекрестием	$\frac{1}{4} - \frac{1}{2}$	$\frac{60'' - 120''}{D}$	$\frac{0,15 - 0,3}{A}$
2.	Штрих и биссектор	$\frac{1}{20} - \frac{1}{15}$	$\frac{12'' - 16''}{D}$	$\frac{0,03 - 0,04}{A}$
3.	Точка и перекрестие	$\frac{1}{40} - \frac{1}{20}$	$\frac{6'' - 12''}{D}$	$\frac{0,015 - 0,03}{A}$

п/п	Вид объекта и анализатора, метод совмещения	Случайная погрешность наведения		
		$\Delta\eta_n$ , к.ед.	для приборов дальнего действия, сек.	для приборов ближнего действия, мкм
4.	Нониальное совмещение: изображение половины штриха перевернуто и смещается относительно другой половины	$\frac{1}{10}$	$\frac{24''}{D}$	$\frac{0,06}{A}$
5.	Растровая поперечная наводка: анализатор в виде растра накладывается на изображение объекта в виде такого же растра	$\frac{1}{60} - \frac{1}{40}$	$\frac{4'' - 6''}{D}$	$\frac{0,01 - 0,015}{A}$

Таблица 4. Данные экспериментального исследования случайной погрешности простейших фотоэлектрических методов поперечного наведения

п/п	Вид объекта и анализатора	Случайная погрешность наведения		
		$\Delta\eta_n$ , к.ед.	для приборов дальнего действия, сек.	для приборов ближнего действия, мкм
1.	Наведение на точку с помощью механической сканирующей щели	$\frac{1}{40} - \frac{1}{100}$	$\frac{6'' - 2,4''}{D}$	$\frac{0,015 - 0,006}{A}$
2.	Наведение на точку или линию с помощью полудискового модулятора	$\frac{1}{10} - \frac{1}{100}$	$\frac{24'' - 2,4''}{D}$	$\frac{0,06 - 0,006}{A}$

п/п	Вид объекта и анализатора	Случайная погрешность наведения		
		$\Delta\eta_n$ , к.ед.	для приборов дальнего действия, сек.	для приборов ближнего действия, мкм
3.	Совмещение изображения растра с аналогичным приемным растром	$\frac{1}{100}$	$\frac{2,4''}{D}$	$\frac{0,06}{A}$

Таблица 5. Данные экспериментального исследования случайной погрешности продольного наведения

п/п	Вид объекта и анализатора	Случайная погрешность наведения $\Delta\chi_n$	
		визуальное наведение	фотоэлектрическое наведение
1.	По резкости изображения точки или линии	$\frac{1}{2} - \frac{1}{8}$ среднее $\frac{1}{3}$	—
2.	Фокусировка на светящуюся точку с помощью фотоэлектрического устройства и малой диафрагмы	—	$\frac{1}{10}$
3.	Метод сдвинутых по глубине марок	$\frac{1}{40}$	$\frac{1}{65}$
4.	Теневой метод продольной наводки	$\frac{1}{50}$	$\frac{1}{400}$
5.	Растровый метод фокусировки	—	до $\frac{1}{400}$

Расчет случайной погрешности наведения сводится к переводу известной из опыта величины случайной погрешности от действительных единиц в канонические единицы и наоборот.

Задачи на выбор оптических систем наведения по случайной погрешности наведения также основываются на формулах перехода от канонических единиц к действительным. Если известен способ наведения,  $a$ , следовательно, и величина случайной погрешности наведения в канонических единицах, а также известна требуемая для данного прибора величина погрешности наведения, т.е. случайная погрешность наведения в действительных единицах, то можно найти апертуру искомой оптической системы по формулам:

$$\Delta y_n = \Delta \eta_n \frac{\lambda}{A}, \text{ откуда } A = \frac{\Delta \eta_n \cdot \lambda}{\Delta y_n};$$

$$\Delta z_n = \Delta \chi_n \frac{\lambda}{A^2}, \text{ откуда } A = \sqrt{\frac{\Delta \chi_n \cdot \lambda}{\Delta z_n}}.$$

Случайная погрешность наведения в действительных единицах задается при проектировании прибора, например, находится как доля ожидаемой суммарной погрешности прибора. Случайная погрешность может достигать 100% от всей погрешности, если измерительный прибор предназначен для многократных измерений или может составлять величину, меньшую или равную  $\frac{1}{3}$  от суммарной погрешности и если прибор предназначен для однократных измерений.

Необходимо также помнить, что при измерении любой величины выполняют наведение дважды (на один и на другой край объекта, на «0» и на объект и т.п.).

Например, суммарная погрешность измерения равна  $\Delta y_\Sigma$ . Случайная погрешность может составить  $\frac{1}{3}$  ( $\frac{1}{2}$  или 1) от нее:

$$\Delta y_{\text{слп}} = \frac{1}{3} \Delta y_\Sigma, \text{ а случайная погрешность одного наведения будет в } \sqrt{2} \text{ раз меньше } \Delta y_n = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 3} \Delta y_\Sigma.$$

При использовании автоколлимационных измерительных схем надо учесть тот факт, что случайная погрешность наведения для автоколлимационных систем меньше, чем для обычных, в два раза.

$$\text{Тогда } \Delta \eta_{\text{НАК}} = \frac{1}{2} \Delta \eta_n; \Delta \chi_{\text{НАК}} = \frac{1}{2} \Delta \chi_n.$$

## Задачи

34. Определить случайную погрешность наведения зрительной трубы теодолита с диаметром объектива  $D$ :
- а)  $D = 20$  мм;
  - б)  $D = 30$  мм;
  - в)  $D = 40$  мм.
- Объект – треугольная марка, а окулярная сетка – косое перекрестие.
35. Определить в угловых секундах случайную погрешность наведения зрительной трубы теодолита с диаметром объектива  $D$ :
- а)  $D = 30$  мм;
  - б)  $D = 20$  мм;
  - в)  $D = 50$  мм.
- Объект – Т-образная марка, если окулярная сетка имеет вид прямого перекрестия.
36. Определить случайную погрешность наведения зрительной трубы рефрактометра на границу полного внутреннего отражения, если окулярная сетка – косое перекрестие. Диаметр объектива зрительной трубы  $D$ :
- а)  $D = 20$  мм;
  - б)  $D = 25$  мм;
  - в)  $D = 30$  мм.
37. Определить случайную погрешность наведения зрительной трубы рефрактометра на границу полного внутреннего отражения, если окулярная сетка представляет собой косое перекрестие. Диаметр объектива зрительной трубы  $D$ :
- а)  $D = 10$  мм;
  - б)  $D = 15$  мм;
  - в)  $D = 30$  мм.
38. Определить случайную погрешность наведения зрительной трубы с диаметром объектива  $D$  на изображение миры, если контролируется диоптрийная шкала предшествующей системы.
- а)  $D = 20$  мм;
  - б)  $D = 40$  мм;
  - в)  $D = 50$  мм.



39. С помощью зрительной трубы контролируется диоптрийная шкала окуляра, имеющего диаметр выходного зрачка  $D$ :
- а)  $D = 2$  мм;
  - б)  $D = 5$  мм;
  - в)  $D = 4$  мм.
- Рассчитать случайную погрешность одного наведения.
40. Определить случайную погрешность поперечного наведения на границу полного внутреннего отражения в фотоэлектрическом рефрактометре, если анализатор – сканирующая щель. Диаметр объектива  $D$ :
- а)  $D = 15$  мм;
  - б)  $D = 30$  мм;
  - в)  $D = 40$  мм.
41. В фотоэлектрическом рефрактометре объектом наведения является граница полного внутреннего отражения, а анализатором – сканирующая щель. Определить случайную погрешность поперечного наведения, если в системе наведения используется объектив с диаметром  $D$ :
- а)  $D = 15$  мм;
  - б)  $D = 10$  мм;
  - в)  $D = 25$  мм.
42. Определить случайную погрешность фотоэлектрического наведения на резкость объектива зрительной трубы с диаметром  $D$ :
- а)  $D = 30$  мм;
  - б)  $D = 40$  мм;
  - в)  $D = 50$  мм.
- Используется простейший метод наведения – по максимальной освещенности в плоскости малой диафрагмы.
43. Определить случайную погрешность фотоэлектрического наведения на резкость объектива диаметром  $D$ , фокусное расстояние объектива  $f'$ :
- а)  $D = 50$  мм,  $f' = 200$  мм;
  - б)  $D = 30$  мм,  $f' = 100$  мм;
  - в)  $D = 60$  мм,  $f' = 300$  мм.
- Объектом является светящаяся щель и используется простейший метод фотоэлектрической фокусировки – по максимальной

освещенности в плоскости малой диафрагмы, стоящей поблизости от заднего фокуса объектива.

44. Случайная погрешность поперечного наведения зрительной трубы диаметром  $D$  равна  $\Delta\omega_n$ . Насколько сложный метод наведения использовался?
- а)  $D = 20$  мм,  $\Delta\omega_n = 0,5''$ ;
  - б)  $D = 30$  мм,  $\Delta\omega_n = 0,2''$ ;
  - в)  $D = 40$  мм,  $\Delta\omega_n = 0,2''$ .
45. Определить случайную погрешность наведения двухкоординатного микроскопа на изображение звезды при измерении фотографии звездного неба. Апертура микроскопа  $A$ :
- а)  $A = 0,2$ ;
  - б)  $A = 0,5$ ;
  - в)  $A = 0,8$ .
46. Определить случайную погрешность наведения отсчетного микроскопа с апертурой  $A$  на штрих основной шкалы. Используется спиральный окулярный микрометр.
- а)  $A = 0,2$ ;
  - б)  $A = 0,3$ ;
  - в)  $A = 0,5$ .
47. Определить случайную погрешность наведения отсчетного микроскопа компаратора на штрих основной шкалы, если анализатором служит сетка-биссектор. Апертура микроскопа  $A$ :
- а)  $A = 0,2$ ;
  - б)  $A = 0,5$ ;
  - в)  $A = 0,65$ .
48. Определить случайную погрешность продольного наведения на резкое изображение граней плоскопараллельной пластинки. Наведение производится с помощью микроскопа с апертурой  $A$ :
- а)  $A = 0,2$ ;
  - б)  $A = 0,5$ ;
  - в)  $A = 0,8$ .

49. Определить случайную погрешность наведения отсчетного микроскопа компаратора на штрих основной шкалы, если анализатор – биссектор. Апертура микроскопа  $A$  :
- а)**  $A = 0,25$ ;
  - б)**  $A = 0,65$ ;
  - в)**  $A = 0,8$ .
50. Определить случайную погрешность наведения микроскопа компаратора при измерении расстояния между центрами малых отверстий, если сетка микроскопа – перекрестие. Апертура микроскопа  $A$  :
- а)**  $A = 0,2$ ;
  - б)**  $A = 0,4$ ;
  - в)**  $A = 0,5$ .
51. На оптическом компараторе измеряется расстояние между центрами малых отверстий. Определить случайную погрешность наведения, если сетка микроскопа имеет вид концентрических колец. Используется микроскоп с апертурой  $A$  :
- а)**  $A = 0,2$ ;
  - б)**  $A = 0,5$ ;
  - в)**  $A = 0,7$ .
52. Определить случайную погрешность наведения микроскопа с апертурой  $A$  при измерении толщины линзы, если сетка микроскопа – перекрестие.
- а)**  $A = 0,2$ ;
  - б)**  $A = 0,3$ ;
  - в)**  $A = 0,5$ .
53. Определить случайную погрешность наведения фотоэлектрического микроскопа на светящуюся точку, если оно производится с помощью полудискового модулятора и фотоэлектрического устройства. Апертура микроскопа  $A$  :
- а)**  $A = 0,3$ ;
  - б)**  $A = 0,5$ ;
  - в)**  $A = 0,65$ .

54. Определить случайную погрешность наведения фотоэлектрического микроскопа на светящуюся точку, если оно производится с помощью полудискового модулятора и фотоэлектрического устройства. Апертура микроскопа  $A$  :
- $A = 0,2$ ;
  - $A = 0,5$ ;
  - $A = 0,7$ .
55. Случайная погрешность поперечного наведения для микроскопа с апертурой  $A$  равна  $0,5$  мкм. Какой метод наведения использовался?
- $A = 0,2$ ;
  - $A = 0,5$ ;
  - $A = 0,8$ .
56. Случайная погрешность наведения зрительной трубы с диаметром объектива  $D$  равна  $\Delta\omega_n$ . Насколько сложный метод наведения использовался?
- $D = 30$  мм,  $\Delta\omega_n = 1''$ ;
  - $D = 40$  мм,  $\Delta\omega_n = 1''$ ;
  - $D = 50$  мм,  $\Delta\omega_n = 2''$ .
57. Имеется объектив микроскопа с апертурой  $A$  :
- $A = 0,1$ ;
  - $A = 0,2$ ;
  - $A = 0,5$ .
- Случайная погрешность продольного неведения должна быть равна  $10$  мкм. Можно ли получить такую погрешность с имеющимся объективом микроскопа; если можно, то каким способом?
58. Измерительный микроскоп имеет сменные объективы с апертурами  $0,1$ ;  $0,2$ ;  $0,3$ . Погрешность измерения координат не должна превышать величину  $\Delta y$  :
- $\Delta y = 0,1$  мкм;
  - $\Delta y = 0,5$  мкм;
  - $\Delta y = 1$  мкм.
- Можно ли получить требуемую точность с указанными объективами; если можно, то каким способом?

59. Погрешность измерения углов с помощью теодолита равна  $1''$ . Какой метод наведения использовался, если наведения многократные? Диаметр объектива  $D$ :
- а)  $D = 20$  мм;
  - б)  $D = 30$  мм;
  - в)  $D = 40$  мм.
60. Подобрать зрительную трубу к рефрактометру, если погрешность измерения углов не должна превышать величину  $\Delta\omega$ :
- а)  $\Delta\omega = 30''$ ;
  - б)  $\Delta\omega = 1'$ ;
  - в)  $\Delta\omega = 20''$ .
61. Подобрать зрительную трубу к гониометру, если погрешность измерения углов не должна превышать величину  $\Delta\omega$ :
- а)  $\Delta\omega = 2''$ ;
  - б)  $\Delta\omega = 5''$ ;
  - в)  $\Delta\omega = 10''$ .
62. Подобрать зрительную трубу для измерения сходимости пучков, если погрешность измерения не должна превышать величину  $\Delta z$ :
- а)  $\Delta z = 0,005$  дптр;
  - б)  $\Delta z = 0,01$  дптр;
  - в)  $\Delta z = 0,02$  дптр.
63. Подобрать микроскоп для продольных измерений, если погрешность измерения не должна превышать величину  $\Delta y$ :
- а)  $\Delta y = 0,5$  мкм;
  - б)  $\Delta y = 1$  мкм;
  - в)  $\Delta y = 2$  мкм.
64. Подобрать зрительную трубу для измерения силы линзы, если погрешность измерения не должна превышать величину  $\Delta\Phi$ :
- а)  $\Delta\Phi = 0,05$  дптр;
  - б)  $\Delta\Phi = 0,01$  дптр;
  - в)  $\Delta\Phi = 0,005$  дптр.

65. Подобрать микроскоп к двухкоординатному измерительному микроскопу, если погрешность измерения не должна превышать величину  $\Delta y$  :
- а)**  $\Delta y = 0,5$  мкм;
  - б)**  $\Delta y = 1$  мкм;
  - в)**  $\Delta y = 2$  мкм.
66. Какие характеристики должен иметь объектив двухкоординатного измерительного микроскопа для того, чтобы погрешность измерения не превышала величину  $\Delta y$  :
- а)**  $\Delta y = 1$  мкм;
  - б)**  $\Delta y = 1,5$  мкм;
  - в)**  $\Delta y = 2,5$  мкм.
67. Подобрать микроскоп для продольных измерений, если погрешность измерений не должна превышать величину  $\Delta z$  :
- а)**  $\Delta z = 0,005$  мм;
  - б)**  $\Delta z = 0,01$  мм;
  - в)**  $\Delta z = 0,02$  мм.
68. Подобрать отсчетный микроскоп к сферометру, если погрешность одного отсчета не должна превышать величину  $\Delta y$  :
- а)**  $\Delta y = 0,1$  мкм;
  - б)**  $\Delta y = 0,2$  мкм;
  - в)**  $\Delta y = 0,5$  мкм.
69. Какие характеристики должна иметь автоколлимационная зрительная труба, если требуется измерять радиус кривизны 40000 мм с погрешностью  $\Delta R$  ?
- а)**  $\Delta R = 5$  мм;
  - б)**  $\Delta R = 10$  мм;
  - в)**  $\Delta R = 20$  мм.
70. Подобрать отсчетный микроскоп к гониометру, если погрешность одного отсчета не должна превышать величину  $\Delta \omega$  :
- а)**  $\Delta \omega = 0,2''$  ;
  - б)**  $\Delta \omega = 0,5''$  ;
  - в)**  $\Delta \omega = 1''$  .
- Диаметр лимба равен 140 мм.

71. Подобрать автоколлимационную зрительную трубу к гониометру, если погрешность измерения не должна превышать величину  $\Delta\omega$  :
- $\Delta\omega = 1''$  ;
  - $\Delta\omega = 2''$  ;
  - $\Delta\omega = 5''$  .
72. Подобрать автоколлимационный микроскоп для измерения радиуса кривизны  $R$  поверхности с погрешностью не более  $\Delta R$  .
- $R = -100$  мм,  $\Delta R = 0,05$  мм;
  - $R = 20$  мм,  $\Delta R = 0,05$  мм;
  - $R = -50$  мм,  $\Delta R = 0,02$  мм.
73. Подобрать отсчетный микроскоп к рефрактометру, если погрешность одного отсчета не должна превышать величину  $\Delta\omega$  :
- $\Delta\omega = 0,5''$  ;
  - $\Delta\omega = 1''$  ;
  - $\Delta\omega = 2''$  .
- Диаметр лимба равен 100 мм.
74. Подобрать автоколлимационную зрительную трубу к гониометру, если погрешность измерения не должна превышать величину  $\Delta\omega$  :
- $\Delta\omega = 5''$  ;
  - $\Delta\omega = 2''$  ;
  - $\Delta\omega = 0,2''$  .
75. Рассчитать точность фокусирующей подвижки в зрительной трубе, предназначенной для визуальных угловых измерений. Фокусное расстояние объектива  $f'$  , диаметр объектива  $D$  :
- $f' = 250$  мм,  $D = 50$  мм;
  - $f' = 500$  мм,  $D = 50$  мм;
  - $f' = 2000$  мм,  $D = 100$  мм.
76. Рассчитать точность фокусирующей подвижки в микроскопе, служащим для визуальных измерений координат на плоскости, если апертура микроскопа  $A$  :
- $A = 0,2$  ;
  - $A = 0,3$  ;
  - $A = 0,5$  .

77. Рассчитать погрешность механизма диоптрийной наводки окуляра микроскопа, если апертура в пространстве сетки  $A$ :

**а)**  $A = 0,05$ ;

**б)**  $A = 0,1$ ;

**в)**  $A = 0,15$ .

Микроскоп используется для поперечных измерений.

78. Рассчитать погрешность механизма диоптрийной наводки окуляра зрительной трубы, используемой для поперечных измерений. Апертура зрительной трубы в пространстве сетки  $A$ :

**а)**  $A = 0,1$ ;

**б)**  $A = 0,2$ ;

**в)**  $A = 0,25$ .

79. Пользуясь понятием случайной погрешности наведения, рассчитать допуск на изготовление тестового объекта в виде щели, расположенной в коллиматоре с диаметром объектива  $D$  и фокусным расстоянием  $f'$ :

**а)**  $D = 50$  мм,  $f' = 500$  мм;

**б)**  $D = 80$  мм,  $f' = 1000$  мм;

**в)**  $D = 30$  мм,  $f' = 600$  мм.

Коллиматор используется в установке для визуальных поперечных измерений.

80. Пользуясь понятием чувствительности наведения, рассчитать допуск на высоту микронеровностей краев щели, используемой в качестве тест-объекта в коллиматоре. Диаметр коллиматора  $D$ , фокусное расстояние объектива  $f'$ :

**а)**  $D = 50$  мм,  $f' = 300$  мм;

**б)**  $D = 60$  мм,  $f' = 800$  мм;

**в)**  $D = 40$  мм,  $f' = 400$  мм.

Коллиматор используется в установке для визуальных поперечных измерений.



81. Пользуясь понятием случайной погрешности наведения, рассчитать допуск на изготовление сканирующей щели, стоящей в фотоэлектрическом микроскопе. Объектив микроскопа имеет апертуру  $A$  и увеличение  $V$  :
- а)**  $A = 0,2$ ,  $V = -8^{\times}$ ;
  - б)**  $A = 0,3$ ,  $V = -10^{\times}$ ;
  - в)**  $A = 0,5$ ,  $V = -40^{\times}$ .
82. Пользуясь понятием случайной погрешности наведения, рассчитать допуск на высоту микронеровностей сканирующей щели, стоящей в фотоэлектрическом микроскопе. Объектив микроскопа имеет апертуру  $A$  и увеличение  $V$  :
- а)**  $A = 0,1$ ,  $V = -10^{\times}$ ;
  - б)**  $A = 0,3$ ,  $V = -15^{\times}$ ;
  - в)**  $A = 0,65$ ,  $V = -25^{\times}$ .
83. Опираясь на величину случайной погрешности поперечного наведения, найти погрешность изготовления перекрестия сетки в автоколлимационном окуляре Гаусса. Апертура в пространстве сетки  $A$  :
- а)**  $A = 0,1$ ;
  - б)**  $A = 0,05$ ;
  - в)**  $A = 0,15$ .

## Примеры решения задач

**Пример 3.** Имеются два объектива микроскопа, со следующими характеристиками:  $A_1 = 0,5$  и  $\lambda_1 = 0,55$  мкм;  $A_2 = 0,8$  и  $\lambda_2 = 0,80$  мкм. Для какого из объективов требуется более сложный метод наведения, если погрешность поперечного наведения не должна превышать 0,2 мкм?

Решение:

Найдем случайную погрешность поперечного наведения для одного и другого объектива микроскопа в канонических единицах:

$$\Delta\eta_{н1} = \frac{\Delta y \cdot A_1}{\lambda_1} = \frac{0,2 \cdot 0,5}{0,55} = 0,18 \text{ к.ед.}; \quad \Delta\eta_{н2} = \frac{\Delta y \cdot A_2}{\lambda_2} = \frac{0,2 \cdot 0,8}{0,80} = 0,2 \text{ к.ед.}$$

Ответ: требуются одинаковые по сложности методы совмещения.

**Пример 4.** Необходимо измерить сходимость пучков с погрешностью не более 0,005 дптр. Диаметр имеющейся диоптрийной трубки равен 20 мм. Годится ли данная трубка для подобных измерений?

Решение:

Определим погрешность измерения в канонических единицах:

$$\Delta\chi = \frac{\Delta z \cdot (D/2)}{\lambda} = \frac{0,05 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2}{0,55 \cdot 10^{-3}} = 0,91 \text{ к.ед.}$$
 Простейшие методы

продольного наведения по резкости изображения дают случайную погрешность одного наведения  $\Delta\chi = \frac{1}{3}$  к.ед., для двух наведений

случайная погрешность будет в  $\sqrt{2}$  раз больше:

$$\Delta\chi_{слп} = \sqrt{2} \cdot \frac{1}{3} = 0,47 \text{ к.ед.}$$

Ответ: данная диоптрийная трубка годится для измерений с требуемой точностью.

**Пример 5.** Подобрать автоколлимационный микроскоп для измерения радиусов кривизны вогнутых поверхностей, если погрешность измерения не должна превышать 0,05 мм.

Решение:

Дана суммарная погрешность продольных измерений  $\Delta z_{\Sigma} = 0,05$  мм. Пусть проектируемый прибор служит для однократных измерений. Тогда доля случайной погрешности в суммарной должна быть менее  $\frac{1}{3}$ :  $\Delta z_{\text{СлП}} = \frac{1}{3} \Delta z_{\Sigma} = \frac{0,05}{3} = 0,017$  мм. Для одного наведения

случайная погрешность наведения составит величину, в  $\sqrt{2}$  раз меньшую:  $\Delta z_{\text{н}} = \frac{\Delta z_{\text{СлП}}}{\sqrt{2}} = \frac{0,017}{1,41} = 0,012$  мм. О методе наведения

ничего не сказано. Зададимся простейшим методом – совмещением по резкости изображения. Для неавтоколлимационных визуальных приборов этот метод дает погрешность  $\Delta \chi_{\text{н}} \approx \frac{1}{3}$  к.ед., для автоколлимационных – в два раза меньшую  $\Delta \chi_{\text{н}} \approx \frac{1}{6}$  к.ед.

Определим апертуру искомого автоколлимационного микроскопа:

$$A = \sqrt{\frac{\Delta \chi_{\text{НАК}} \cdot \lambda}{\Delta z_{\text{НАК}}}} = \sqrt{\frac{(1/6) \cdot 0,55 \cdot 10^{-3}}{0,012}} = \sqrt{0,00763} = 0,0879. \text{ Округляем до}$$

$A = 0,1$ . Далее можно найти  $\Gamma_{\text{м}}$  по формуле полезного увеличения микроскопа:  $250A < \Gamma_{\text{м}} < 1000A$ , т.е.  $25^{\times} < \Gamma_{\text{м}} < 100^{\times}$ . Затем можно подобрать  $V_{\text{об}}$  и  $\Gamma_{\text{ок}}$ , задаться величиной линейного поля и найти таким образом все силовые характеристики автоколлимационного микроскопа.

## Размеры дифракционных изображений точки и линии. Использование канонических единиц для измерения малых отрезков (смещений). Расчет тестовых объектов

Малые поперечные и продольные отрезки (смещения) принято помимо действительных единиц измерять в канонических единицах (к.ед.). Формулы перехода от действительных единиц к каноническим имеют вид:

$$\eta = \Delta y \frac{A}{\lambda} = \Delta y' \frac{A'}{\lambda}, \quad \chi = \Delta z \frac{A^2}{\lambda} = \Delta z' \frac{A'^2}{\lambda},$$

где  $\eta$  – поперечный отрезок в канонических единицах;  $\Delta y$  или  $\Delta y'$  – обобщенные величины малых поперечных отрезков на предмете или изображении;  $\chi$  – продольный отрезок в канонических единицах;  $\Delta z$  или  $\Delta z'$  – обобщенные величины малых продольных отрезков в пространстве предметов или изображений;  $A$  или  $A'$  – обобщенные апертуры оптической системы в пространстве предметов или изображений;  $\lambda$  – основная длина волны.

Отрезки, выраженные в канонических единицах, безразмерны, одинаковы в пространстве предметов, сетки и изображений. Малые отрезки (смещения) для оптических систем разного типа различных апертур, а также для систем, работающих в разных спектральных областях, удобно сравнивать, если они определены в канонических единицах.

За размер дифракционного изображения точки или линии принимают размер центральной фигуры в этом изображении. Согласно дифракционной теории размер центрального пятна (диска Эри) в изображении точки идеальной оптической системы с круглым зрачком равен 1,22 к.ед. Дифракционный размер изображения линии идеальной оптической системы приблизительно равен 1 к.ед. В действительных единицах соответствующие размеры равны

$$d_{\text{т}} = 1,22 \frac{\lambda}{A}, \quad d_{\text{л}} = \frac{\lambda}{A},$$

где  $d_{\text{т}}$  ( $d_{\text{л}}$ ) – обобщенные размеры дифракционного изображения точки (линии) в том пространстве, в котором действует апертура  $A$ . Для конечного расстояния до предмета (изображения) единицы измерения рассматриваемых величин – миллиметры, для бесконечно удаленного – радианы (в расчетах) и секунды (в окончательных выражениях). В последнем случае их можно обозначить не  $d_{\text{т}}$  ( $d_{\text{л}}$ ), а  $\omega_{\text{т}}$  ( $\omega_{\text{л}}$ ).

Для конечного расстояния до предмета (изображения) размерность малых продольных отрезков – миллиметры, для бесконечно удаленного – килодиоптрии (в расчетах) и диоптрии (в окончательных выражениях).

### Задачи

84. Изображение точки создается оптической системой с выходным зрачком диаметром  $D'$  на расстоянии 100 мм. Определить размер центральной фигуры дифракционного изображения.
- а)  $D' = 20$  мм;
  - б)  $D' = 50$  мм;
  - в)  $D' = 10$  мм.
85. Дифракционное изображение точки создается оптической системой на расстоянии 250 мм от ее выходного зрачка. Радиус диска Эри равен  $r'$ :
- а)  $r' = 0,125$  мм;
  - б)  $r' = 0,25$  мм;
  - в)  $r' = 0,5$  мм.
- Найти диаметр выходного зрачка.
86. Микроскопом создается изображение светящейся точки на оси. Определить диаметр центрального дифракционного максимума в пространстве предметов, в пространстве сетки и в пространстве изображений. Увеличение объектива  $\beta$ , апертура объектива  $A$ , видимое увеличение окуляра  $\Gamma$ :
- а)  $\beta = -40^\times$ ,  $A = 0,6$ ,  $\Gamma = 15^\times$ ;
  - б)  $\beta = -30^\times$ ,  $A = 0,4$ ,  $\Gamma = 7^\times$ ;
  - в)  $\beta = -60^\times$ ,  $A = 0,8$ ,  $\Gamma = 10^\times$ .
87. Объектив микроскопа  $\beta \times A$  создает изображение светящейся точки на оси. Определить продольный размер центрального дифракционного максимума в пространстве предметов и в пространстве изображений.
- а)  $\beta = -10^\times$ ,  $A = 0,3$ ;
  - б)  $\beta = -8^\times$ ,  $A = 0,2$ ;
  - в)  $\beta = -5^\times$ ,  $A = 0,1$ .

88. Штрих сетки микроскопа имеет ширину 0,05 мм. Сравнить этот размер с размером центрального дифракционного максимума в изображении линии, если объектив микроскопа имеет характеристики  $\beta \times A$  :
- а)  $\beta = -60^\times$ ,  $A = 0,8$ ;
  - б)  $\beta = -40^\times$ ,  $A = 0,6$ ;
  - в)  $\beta = -8^\times$ ,  $A = 0,2$ .
89. Требуемая погрешность продольных измерений с помощью микроскопа равна 0,005 мм. Какую долю продольного размера дифракционного изображения точки составляет указанная величина? Используется объектив с апертурой  $A$  :
- а)  $A = 0,5$ ;
  - б)  $A = 0,2$ ;
  - в)  $A = 0,8$ .
90. Окуляр с фокусным расстоянием  $f'$  и диаметром выходного зрачка  $D'$  создает дифракционное изображение точки. Определить диаметр диска Эри в плоскости предметов и в пространстве изображений.
- а)  $f' = 10$  мм,  $D' = 2$  мм;
  - б)  $f' = 15$  мм,  $D' = 2$  мм;
  - в)  $f' = 25$  мм,  $D' = 4$  мм.
91. Окуляр с фокусным расстоянием  $f'$  и диаметром выходного зрачка  $D'$  создает дифракционное изображение точки. Определить продольный размер центрального дифракционного максимума в пространстве предметов и в пространстве изображений.
- а)  $f' = 10$  мм,  $D' = 2$  мм;
  - б)  $f' = 15$  мм,  $D' = 2$  мм;
  - в)  $f' = 25$  мм,  $D' = 4$  мм.
92. Зрительная труба имеет объектив с диаметром  $D$ , фокусным расстоянием  $f'$  и окуляр с видимым увеличением  $\Gamma$  :
- а)  $f' = 500$  мм,  $D = 40$  мм,  $\Gamma = 15^\times$ ;
  - б)  $f' = 500$  мм,  $D = 40$  мм,  $\Gamma = 10^\times$ ;
  - в)  $f' = 300$  мм,  $D = 30$  мм,  $\Gamma = 20^\times$ .
- Определить продольный размер дифракционного изображения точки в пространстве предметов, сетки и изображений.

93. Штрих сетки зрительной трубы имеет ширину 0,05 мм. Сравнить этот размер с дифракционным размером изображения сетки. Фокусное расстояние объектива равно  $f'$ , относительное отверстие 1:К:
- а)  $f' = 1000$  мм, К = 8;
  - б)  $f' = 500$  мм, К = 5;
  - в)  $f' = 200$  мм, К = 4.
94. Определить продольный размер дифракционного изображения точки для объектива зрительной трубы в пространстве изображений. Фокусное расстояние объектива  $f'$ , относительное отверстие 1:К:
- а)  $f' = 500$  мм, К = 5;
  - б)  $f' = 300$  мм, К = 4;
  - в)  $f' = 2000$  мм, К = 10.
95. Погрешность фокусирующего перемещения объектива зрительной трубы составляет 0,05 мм. Найти эту величину в канонических единицах. Фокусное расстояние объектива  $f'$ , относительное отверстие 1:К:
- а)  $f' = 600$  мм, К = 8;
  - б)  $f' = 500$  мм, К = 5;
  - в)  $f' = 300$  мм, К = 4.
96. Определить размер дифракционного изображения точки в пространстве изображений объектива микроскопа. Увеличение объектива  $V$ , апертура  $A$ :
- а)  $V = -10^{\times}$ ,  $A = 0,3$ ;
  - б)  $V = -8^{\times}$ ,  $A = 0,2$ ;
  - в)  $V = -5^{\times}$ ,  $A = 0,5$ .
97. Определить размер дифракционного изображения линии в пространстве изображений объектива микроскопа. Увеличение объектива  $V$ , апертура  $A$ :
- а)  $V = -10^{\times}$ ,  $A = 0,4$ ;
  - б)  $V = -5^{\times}$ ,  $A = 0,1$ ;
  - в)  $V = -20^{\times}$ ,  $A = 0,4$ .

98. Определить продольный размер дифракционного изображения точки для объектива микроскопа в пространстве изображений. Увеличение объектива  $V$ , апертура  $A$ :
- а)  $V = -60^\times$ ,  $A = 0,8$ ;
  - б)  $V = -50^\times$ ,  $A = 0,7$ ;
  - в)  $V = -40^\times$ ,  $A = 0,5$ .
99. Штрих сетки микроскопа имеет ширину 0,05 мм. Сравнить этот размер с дифракционным. Увеличение объектива  $V$ , апертура  $A$ :
- а)  $V = -40^\times$ ,  $A = 0,6$ ;
  - б)  $V = -20^\times$ ,  $A = 0,3$ ;
  - в)  $V = -10^\times$ ,  $A = 0,3$ .
100. После объектива микроскопа изображение не совпало с сеткой на величину  $\Delta z = 1$  мм (расфокусировано). Выразить эту величину в канонических единицах. Увеличение объектива  $V$ , апертура  $A$ :
- а)  $V = -20^\times$ ,  $A = 0,4$ ;
  - б)  $V = -5^\times$ ,  $A = 0,1$ ;
  - в)  $V = -10^\times$ ,  $A = 0,3$ .
101. Определить размер дифракционного изображения точки для окуляра в пространстве предметов. Фокусное расстояние окуляра  $f'$ , диаметр входного зрачка  $D$ :
- а)  $f' = 10$  мм,  $D = 2$  мм;
  - б)  $f' = 15$  мм,  $D = 5$  мм;
  - в)  $f' = 8$  мм,  $D = 1$  мм.
102. Определить размер дифракционного изображения точки для микроскопа, у которого апертура  $A$ :
- а)  $A = 0,1$ ; б)  $A = 0,4$ ; в)  $A = 0,6$ .
103. Определить размер дифракционного изображения линии для микроскопа, у которого апертура  $A$ :
- а)  $A = 0,05$ ; б)  $A = 0,2$ ; в)  $A = 0,8$ .



104. Объект, наблюдаемый в микроскоп, у которого апертура  $A$ , имеет размер  $\Delta y$ :
- а)**  $A = 0,5$ ,  $\Delta y = 0,1$  мкм;
  - б)**  $A = 0,3$ ,  $\Delta y = 0,2$  мкм;
  - в)**  $A = 0,1$ ,  $\Delta y = 0,1$  мкм.
- Найти этот размер в канонических единицах.
105. Погрешность измерения с помощью микроскопа, у которого апертура  $A$ , составляет величину  $\Delta y = 0,005$  мм. Найти эту величину в канонических единицах.
- а)**  $A = 0,2$ ; **б)**  $A = 0,5$ ; **в)**  $A = 0,8$ .
106. Погрешность продольных измерений с помощью микроскопа, у которого апертура  $A$ , составляет величину  $\Delta z = 0,05$  мм. Найти эту величину в канонических единицах.
- а)**  $A = 0,3$ ; **б)**  $A = 0,5$ ; **в)**  $A = 0,8$ .
107. Определить продольный размер дифракционного изображения точки для микроскопа, у которого апертура  $A$ :
- а)**  $A = 0,3$ ; **б)**  $A = 0,5$ ; **в)**  $A = 0,7$ .
108. Погрешность механизма грубой фокусировки микроскопа, у которого апертура  $A$ , составляет величину  $0,1$  мм. Найти ее в канонических единицах.
- а)**  $A = 0,5$ ; **б)**  $A = 0,3$ ; **в)**  $A = 0,5$ .
109. Погрешность механизма тонкой фокусировки микроскопа, у которого апертура  $A$ , составляет величину  $0,002$  мм. Найти ее в канонических единицах.
- а)**  $A = 0,25$ ; **б)**  $A = 0,4$ ; **в)**  $A = 0,5$ .
110. Определить размер дифракционного изображения точки на сетке объектива зрительной трубы. Фокусное расстояние объектива  $f'$ , относительное отверстие  $1:K$ :
- а)**  $f' = 250$  мм,  $K = 5$ ;
  - б)**  $f' = 500$  мм,  $K = 8$ ;
  - в)**  $f' = 1000$  мм,  $K = 10$ .

111. Определить размер дифракционного изображения линии на сетке объектива зрительной трубы. Фокусное расстояние объектива  $f'$ , диаметр объектива  $D$ :
- а)  $f' = 300$  мм,  $D = 60$  мм;
  - б)  $f' = 500$  мм,  $D = 40$  мм;
  - в)  $f' = 800$  мм,  $D = 80$  мм.
112. Определить размер дифракционного изображения линии для окуляра в пространстве предметов. Фокусное расстояние окуляра  $f'$ , диаметр выходного зрачка  $D'$ :
- а)  $f' = 20$  мм,  $D' = 5$  мм;
  - б)  $f' = 5$  мм,  $D' = 3$  мм;
  - в)  $f' = 2$  мм,  $D' = 2$  мм.
113. Определить продольный размер дифракционного изображения точки для окуляра в пространстве предметов. Фокусное расстояние окуляра  $f'$ , диаметр выходного зрачка  $D'$ :
- а)  $f' = 25$  мм,  $D' = 5$  мм;
  - б)  $f' = 20$  мм,  $D' = 5$  мм;
  - в)  $f' = 2$  мм,  $D' = 2$  мм.
114. Штрих сетки окуляра имеет ширину 0,1 мм. Сравнить эту величину с дифракционным размером изображения линии. Фокусное расстояние окуляра  $f'$ , диаметр выходного зрачка  $D'$ :
- а)  $f' = 10$  мм,  $D' = 4$  мм;
  - б)  $f' = 5$  мм,  $D' = 3$  мм;
  - в)  $f' = 20$  мм,  $D' = 5$  мм.
115. Сетка окуляра выполнена сдвоенной с зазором 0,05 мм. Правильно ли выбрана величина зазора, если она должна составлять 0,5 к.ед.? Фокусное расстояние окуляра  $f'$ , диаметр выходного зрачка  $D'$ :
- а)  $f' = 8$  мм,  $D' = 2$  мм;
  - б)  $f' = 2$  мм,  $D' = 3$  мм;
  - в)  $f' = 30$  мм,  $D' = 5$  мм.

116. Какого размера точечную диафрагму надо поставить в коллиматор, имеющий диаметр  $D$ , фокусное расстояние  $f'$ , для получения дифракционного изображения?
- $D = 100$  мм,  $f' = 1000$  мм;
  - $D = 200$  мм,  $f' = 2000$  мм;
  - $D = 50$  мм,  $f' = 400$  мм.
117. Какого размера точечную диафрагму надо поставить в автоколлиматор, имеющий диаметр  $D$ , фокусное расстояние  $f'$ , для получения дифракционного изображения?
- $D = 250$  мм,  $f' = 2000$  мм;
  - $D = 100$  мм,  $f' = 500$  мм;
  - $D = 40$  мм,  $f' = 400$  мм.
118. Какого размера точечную диафрагму надо поставить в коллиматор на конечное расстояние, имеющий увеличение  $V$ , апертуру  $A'$ , для получения ее дифракционного изображения?
- $V = -5^{\times}$ ,  $A' = 0,1$ ;
  - $V = -8^{\times}$ ,  $A' = 0,2$ ;
  - $V = -10^{\times}$ ,  $A' = 0,3$ .
119. Будет ли видно перекрестие из нитей толщиной  $t = 5$  мкм, изображаемое оптической системой «коллиматор + зрительная труба»? Диаметр коллиматора  $D_{\text{к}}$ , фокусное расстояние коллиматора  $f'_{\text{к}}$ ; диаметр зрительной трубы  $D_{\text{зт}}$ , фокусное расстояние объектива зрительной трубы  $f'_{\text{обзт}}$ :
- $D_{\text{к}} = 100$  мм,  $f'_{\text{к}} = 1000$  мм;  $D_{\text{зт}} = 80$  мм;  $f'_{\text{обзт}} = 800$  мм;
  - $D_{\text{к}} = 200$  мм,  $f'_{\text{к}} = 1000$  мм;  $D_{\text{зт}} = 100$  мм;  $f'_{\text{обзт}} = 1000$  мм;
  - $D_{\text{к}} = 200$  мм,  $f'_{\text{к}} = 2000$  мм;  $D_{\text{зт}} = 50$  мм;  $f'_{\text{обзт}} = 1000$  мм.
120. Рассчитать контраст в изображении темного штриха шириной  $t$ , используемого в качестве тест-объекта в коллиматоре, имеющем диаметр  $D$  и фокусное расстояние объектива  $f'$ .
- $t = 5$  мкм,  $D = 50$  мм,  $f' = 500$  мм;
  - $t = 10$  мкм,  $D = 100$  мм,  $f' = 500$  мм;
  - $t = 5$  мкм,  $D = 100$  мм,  $f' = 800$  мм.

121. Рассчитать контраст в изображении темного штриха, используемого в качестве тест-объекта в автоколлиматоре, имеющем диаметр объектива  $D$  и фокусное расстояние объектива  $f'$ , если ширина штриха составляет величину  $t$ .
- а)  $D = 40$  мм,  $f' = 300$  мм,  $t = 2$  мкм;
  - б)  $D = 50$  мм,  $f' = 500$  мм,  $t = 10$  мкм;
  - в)  $D = 100$  мм,  $f' = 800$  мм,  $t = 5$  мкм.
122. Какого размера точечную диафрагму надо поставить в автоколлимационный микроскоп для получения ее дифракционного изображения, если используется объектив с характеристиками  $\beta \times A$ :
- а)  $\beta \times A = 5 \times 0,1$ ;
  - б)  $\beta \times A = 8 \times 0,2$ ;
  - в)  $\beta \times A = 10 \times 0,3$ .
123. Какого размера точечную диафрагму надо поставить на расстоянии  $L$  при контроле объектива с диаметром 50 мм, чтобы получить дифракционное изображение точки?
- а)  $L = 1$  м;
  - б)  $L = 5$  м;
  - в)  $L = 10$  м.
124. Рассчитать ширину щели, используемой в качестве тест-объекта в двойном микроскопе Линника, если применены одинаковые объективы с характеристиками  $\beta \times A$ :
- а)  $\beta \times A = 5 \times 0,1$ ;
  - б)  $\beta \times A = 8 \times 0,2$ ;
  - в)  $\beta \times A = 10 \times 0,3$ .
125. Какой ширины должны быть штрихи сетки окулярного микрометра. Видимое увеличение окуляра  $\Gamma$ , диаметр выходного зрачка  $D'$ :
- а)  $\Gamma = 10^\times$ ,  $D' = 5$  мм;
  - б)  $\Gamma = 20^\times$ ,  $D' = 2$  мм;
  - в)  $\Gamma = 15^\times$ ,  $D' = 2$  мм.

126. Рассчитать ширину штрихов сетки, стоящей в коллиматоре в качестве тест-объекта. Фокусное расстояние объектива коллиматора  $f'$ , диаметр входного зрачка  $D$ :

а)  $f' = 1000$  мм,  $D = 100$  мм;

б)  $f' = 500$  мм,  $D = 60$  мм;

в)  $f' = 300$  мм,  $D = 40$  мм.

Контролируемые объекты имеют диаметр не менее 10 мм.

127. Какой ширины штрихи может иметь сетка окуляра зрительной трубы? Фокусное расстояние окуляра  $f'$ , диаметр выходного зрачка  $D'$ :

а)  $f' = 20$  мм,  $D' = 5$  мм;

б)  $f' = 40$  мм,  $D' = 5$  мм;

в)  $f' = 50$  мм,  $D' = 8$  мм.

128. Какой ширины штрихи можно нанести на измерительную линейку, наблюдаемую невооруженным глазом? Диаметр зрачка глаза  $D$ :

а)  $D = 2$  мм;

б)  $D = 5$  мм;

в)  $D = 8$  мм.

129. Будет ли видно перекрестие из нитей толщиной 7 мкм через оптическую систему «коллиматор + зрительная труба»? Коллиматор имеет диаметр 100 мм, фокусное расстояние объектива 1000 мм. Зрительная труба имеет диаметр  $D$  и видимое увеличение  $\Gamma$ :

а)  $D = 80$  мм,  $\Gamma = 20^\times$ ;

б)  $D = 50$  мм,  $\Gamma = 20^\times$ ;

в)  $D = 30$  мм,  $\Gamma = 10^\times$ .

Диаметр зрачка глаза равен 2 мм.

130. Определить ширину первого минимума ФРЛ для микроскопа. Увеличение объектива микроскопа  $V$ , апертура  $A$ :

а)  $V = 60^\times$ ,  $A = 0,2$ ;

б)  $V = 40^\times$ ,  $A = 0,4$ ;

в)  $V = 45^\times$ ,  $A = 0,65$ .

131. Определить пороговое разрешение по Рэлею для пары светящихся точек в пространстве предметов. Апертура  $A$  :  
а)  $A = 0,65$ ; б)  $A = 0,3$ ; в)  $A = 0,25$ .
132. Определить пороговое разрешение по Рэлею для пары светящихся точек в угловой мере. Диаметр  $D$  :  
а)  $D = 50$ ; б)  $D = 90$ ; в)  $D = 120$ .
133. Определить линейное разрешение для пары светящихся линий в пространстве предметов. Апертура  $A$  :  
а)  $A = 0,1$ ; б)  $A = 0,2$ ; в)  $A = 0,3$ .
134. Определить угловое разрешение для пары светящихся линий в пространстве предметов. Диаметр  $D_p$  :  
а)  $D_p = 60$ ; б)  $D_p = 40$ ; в)  $D_p = 20$ .
135. Определить чувствительность поперечных наводок прибора, при угловом разрешении  $\varphi$  :  
а)  $\varphi = 6''$ ; б)  $\varphi = 10''$ ; в)  $\varphi = 20''$ .
136. Определить радиус дифракционного кольца. Расстояние от центрального максимума в плоскости изображения точки  $r'$ , задняя апертура объектива  $A'$  :  
а)  $r' = 36$  мкм,  $A' = 0,65$ ;  
б)  $r' = 60$  мкм,  $A' = 0,3$ ;  
в)  $r' = 75$  мкм,  $A' = 0,2$ .
137. Определить разрешающую способность по предельному числу линий. Задняя апертура  $A'$  :  
а)  $A' = 0,2$ ; б)  $A' = 0,4$ ; в)  $A' = 0,7$ .
138. Определить диаметр первого темного кольца изображения дифракционного кружка с идеальным дифракционным распределением при изофотометрии с изменяющимся временем накопления. Диаметр точечной диафрагмы  $d_r$ , расстояние от диафрагмы до экрана  $l$  :  
а)  $d_r = 10$  мкм,  $l = 0,5$  м;  
б)  $d_r = 40$  мкм,  $l = 1$  м;  
в)  $d_r = 60$  мкм,  $l = 1,5$  м.

139. Определить величину ошибки исследуемой оптической поверхности. Стрелка прогиба интерференционной полосы  $l$ , шаг полосы  $h$ :
- а)  $l = 0,1$  мкм,  $h = 1$  мкм;
  - б)  $l = 0,3$  мкм,  $h = 1,5$  мкм;
  - в)  $l = 0,5$  мкм,  $h = 2$  мкм.
140. Определить диаметр первого темного кольца изображения дифракционного кружка с идеальным дифракционным распределением при изофотометрии с изменяющимся временем накопления. Диаметр точечной диафрагмы  $d_r$ , расстояние от диафрагмы до экрана  $l$ :
- а)  $d_r = 150$  мкм,  $l = 0,5$  м;
  - б)  $d_r = 400$  мкм,  $l = 2$  м;
  - в)  $d_r = 650$  мкм,  $l = 3$  м.

### Примеры решения задач

**Пример 6.** Погрешность продольных измерений с помощью зрительной трубы диаметром  $D = 40$  мм равна  $0,002$  дптр. Найти ее в канонических единицах.

Решение:

Апертура зрительной трубы в пространстве предметов равна  $A = \frac{D}{2} = \frac{40}{2} = 20$  мм. Переведем величину погрешности в килодиоптрии:  $\Delta z = 0,002$  дптр  $= 0,002 \cdot 10^{-3}$  кдптр. Погрешность продольных измерений в канонических единицах равна:

$$\Delta \chi = \Delta z \frac{A^2}{\lambda} = \Delta z \frac{\left(\frac{D}{2}\right)^2}{\lambda} = 0,002 \cdot 10^{-3} \frac{20^2}{0,55 \cdot 10^{-3}} = 1,4 \text{ к.ед.}$$

Ответ:  $\Delta \chi = 1,4$  к.ед.

**Пример 7.** Определить размер дифракционного изображения линии для зрительной трубы в пространстве предметов, сетки и изображений, если увеличение зрительной трубы равно  $10^{\times}$ , фокусное расстояние объектива  $f'_{об} = 200$  мм, а диаметр объектива  $D = 40$  мм.

Решение:

Размер дифракционного изображения линии в пространстве предметов находим по заданной апертуре в этом пространстве:

$$A = \frac{D}{2} = \frac{40}{2} = 20 \text{ мм}; \quad d_{л} = \omega_{л} = \frac{\lambda}{D/2} = \frac{0,55 \cdot 10^{-3}}{20} = 0,275 \cdot 10^{-4} \text{ рад} = 5,7''.$$

Для пространства сетки находим сначала апертуру, затем искомый

размер дифракционного изображения линии  $V_{об} = \frac{A}{A'_{об}}; \quad f'_{об} = \frac{D/2}{A'_{об}};$

$$A'_{об} = \frac{D/2}{f'_{об}} = \frac{20}{200} = 0,1; \quad d'_{л} = \frac{\lambda}{A'_{об}} = 0,55 \cdot 10^{-2} \text{ мм} = 5,5 \text{ мкм}. \quad \text{Размер}$$

дифракционного изображения линии в пространстве изображений связан с размером дифракционного изображения линии в пространстве предметов через увеличение всей системы. Поскольку размерность малых отрезков в данном случае одинакова для обоих пространств, можно вести расчеты непосредственно в секундах:

$$\Gamma = \frac{d'_{л}}{d_{л}} = \frac{\omega'_{л}}{\omega_{л}}; \quad \omega'_{л} = \omega_{л} \cdot \Gamma = 5,7'' \cdot 10 = 57''.$$

$$\text{Ответ: } d_{л} = \omega_{л} = 5,7'', \quad d'_{л} = 5,5 \text{ мкм}, \quad \omega'_{л} = 57''.$$

**Пример 8.** Изображение точки создается оптической системой с выходным зрачком диаметром 20 мм на расстоянии 100 мм. Определить размер центральной фигуры дифракционного изображения.

Решение:

Определим заднюю апертуру:

$$A' = \frac{D'}{2f'} = \frac{20}{2 \cdot 100} = 0,1.$$

Теперь определим размер центральной фигуры дифракционного изображения:

$$d_{\text{дифр}} = \frac{1,22\lambda}{A'} = \frac{1,22 \cdot 0,555 \cdot 10^{-3}}{0,1} = 6,7 \text{ мкм}.$$

$$\text{Ответ: } d_{\text{дифр}} = 6,7 \text{ мкм}.$$



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ к разделу 6

1. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Кирилловский В.К. и др. Оптические измерения: учебное пособие. – М.: Университетская книга; ЛОГОС, 2008. – 416 с.
2. Еськова Л.М. Задачи по дисциплине «Оптические измерения и исследования оптических систем». – Л.: ЛИТМО, 1987. – 36 с.
3. Еськова Л.М. Оптические измерения: учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1984. – 90 с.
4. Еськова Л.М., Кривоустова Е.В. Оптические измерения: задачник. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2005. – 111 с.
5. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 1: учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 43 с.
6. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Ч. 2: учебное пособие. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2003. – 60 с.
7. Кирилловский В.К. Современные оптические исследования и измерения. – СПб: ЛАНЬ, 2010. – 304 с.

## Содержание

<b>Раздел 1. ТОЧНОСТЬ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>3</b>
Роль измерений в различных областях жизни.....	3
Соотношение между метрологией и наукой о технических измерениях .....	4
Совокупные измерения .....	5
Метод совпадений.....	6
Средства измерений. Эталоны. Образцовые и рабочие средства измерений.....	7
Погрешности оптических измерений .....	7
Список литературы к разделу 1 .....	8
<b>Раздел 2. ТЕОРИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ НАВОДОК.....</b>	<b>9</b>
Основы теории чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения .....	9
Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований.....	11
Прямые и косвенные методы оценки качества изображения.....	13
Тест-объект типа «светящаяся точка».....	14
Тест-объект типа «светящаяся линия».....	15
Тест-объект типа «полуплоскость».....	16
Тест-объект типа «линейная решетка» .....	17
Оптические измерительные изображения второго рода .....	19
Оптические измерительные наводки .....	27
Разрешающая способность и чувствительность поперечных и продольных наводок отсчетных труб и микроскопов .....	28
Светящаяся точка.....	31
Структура изображения светящейся линии, ее поперечный размер .....	37
Разрешающая способность .....	39
Практическая чувствительность поперечных наводок.....	42
Список литературы к разделу 2 .....	45
<b>Раздел 3. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ЕГО ХАРАКТЕРИСТИК .....</b>	<b>46</b>
Понятие качества изображения оптической системы.....	48
Способы оценки оптических систем .....	49
Передача изображения через оптическую систему .....	54
Критерии оценки качества оптического изображения .....	59
Задача исследования структуры пятна рассеяния.....	62

Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния .....	63
Фотографическая фотометрия .....	64
Изофотометрия с изменяющимся временем накопления .....	68
Изофотометрия с изменяющимся световым потоком .....	72
Метод изофотометрии ФРЛ .....	76
Список литературы к разделу 3 .....	80
<b>Раздел 4. АБЕРРАЦИИ И КАЧЕСТВО ИЗОБРАЖЕНИЯ.....</b>	<b>81</b>
Интерферометрия – механизм формирования интерференционной картины .....	81
Интерферометр Физо .....	84
Список литературы к разделу 4 .....	91
<b>Раздел 5. ВОПРОСЫ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКОМУ МАТЕРИАЛУ .....</b>	<b>93</b>
Требования к оформлению отчетов по ответам на вопросы.....	112
<b>Раздел 6. ЗАДАЧИ. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ.....</b>	<b>113</b>
Расчет продольных и поперечных смещений.....	113
Анализ случайных погрешностей наведения. Сравнение методов наведения. Расчет случайной погрешности наведения при заданном методе наведения. Выбор оптики устройств наведения по случайной погрешности наведения. Расчет допусков на механические перемещения по случайной погрешности наведения. ....	124
Размеры дифракционных изображений точки и линии. Использование канонических единиц для измерения малых отрезков (смещений). Расчет тестовых объектов.....	140
Список литературы к разделу 6 .....	153



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

---

## **КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

- теория и методы оптимальной компьютерной юстировки;

- моделирование процессов ближнепольной оптики.

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

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

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

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

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

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

**Владимир Константинович Кирилловский  
Татьяна Вячеславовна Точилина**

**Оптические измерения.  
Сборник вопросов и задач**

**Часть 2. Оценка качества оптического изображения**  
**Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму  
по дисциплине «Оптические измерения»**

В авторской редакции

Дизайн

Верстка

Редакционно-издательский отдел НИУ ИТМО

Зав. РИО

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99

Подписано к печати 17.10.11

Заказ № 2405

Тираж 200 экз.

Отпечатано на ризографе

Т.В. Точилина

Т.В. Точилина

Н.Ф. Гусарова



