

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ,
МЕХАНИКИ И ОПТИКИ

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

В.К.Кирилловский

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 4

Оценка качества оптического изображения и измерение его
характеристик

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2005

УДК 535.317.2.

В.К.Кирилловский. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик.

СПб ГУ ИТМО. 2005.- 67с.

Цель пособия - ознакомить студентов с теоретическими основами и методами оптических измерений как с позиций оптика-конструктора и исследователя, так и с общеметрологических позиций, связанных с задачами и спецификой классических и современных оптических измерений. Пособие состоит из серии выпусков.

В Части 4 рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры оценки качества оптического изображения и измерения его характеристик, предпосылки компьютерного моделирования этих процессов, типовые узлы приборов, методы и схемы для измерения и оценки параметров и характеристик качества изображения, даваемого оптическими системами и элементами. Указаны пути применения компьютеров в оптическом приборостроении, при измерениях и контроле качества изображения.

Одобрено на заседании кафедры Прикладной и компьютерной оптики 12 мая 2005 г., протокол N 8.

Рекомендовано УМО по образованию в области приборостроения и оптотехники в качестве учебного пособия для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров, магистров и дипломированных специалистов 200200 – Оптотехника.

© Санкт-Петербургский государственный университет
информационных технологий, механики и оптики

2005

©В.К.Кирилловский

2005

ВВЕДЕНИЕ

Успешная работа исследователя в оптической измерительной лаборатории зависит не только от хорошей оснащенности современными приборами, но и от знания и применения теоретических и технических аспектов современных оптических измерений, их возможностей и перспектив.

Дисциплина "Оптические измерения" относится к базисным дисциплинам содержания образовательных программ по направлению подготовки "Оптехника". Цель изучения дисциплины – освоение обучающимися теоретических, практических и метрологических основ классических и современных оптических измерений.

В Части 4 рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры оценки качества оптического изображения и измерения его характеристик, предпосылки компьютерного моделирования этих процессов, типовые узлы приборов, методы и схемы для измерения и оценки параметров и характеристик качества изображения, даваемого оптическими системами и элементами.

Область применения объективов, строящих оптическое изображение в плоскости некоторого приемника, за последние годы значительно расширилась, несмотря на то, что до сего дня наиболее распространенным приемником изображения остается фотографический материал (далее располагаются фотоэлектрические системы, телевизионные и матричные приемники, приемники излучения невидимой области и т.д.).

Таким образом, большинство оптических систем, строящих действительное изображение, можно отнести к фотографическим объективам. Помимо объективов кино- и видеокамер, фотоаппаратов и цифровых фотокамер, в этот ряд попадают и системы телескопов, микроскопов, спектральных приборов, аэрофотокамер, наблюдательные космические системы, системы записи и считывания информации, такие как компьютерный CD-ROM, поскольку все они предназначены для построения оптического изображения на фотографическом, электронном или ином приемнике изображения. Требования к качеству и информативности регистрируемых изображений непрерывно возрастают, поэтому совершенствуются разрабатываемые и выпускаемые объективы различного назначения.

Ошибки изготовленной оптической системы сегодня становятся соизмеримыми с погрешностями методов контроля характеристик

оптики. Поэтому дальнейшее совершенствование качества современных оптических систем связано с проблемой совершенствования методов их контроля.

Традиционные методы контроля оптических характеристик объективов [5, 6], 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 скамье с помощью штриховой линейной миры (рис.1).

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 фона, без раздвоения, окрашивания и искажения рисунка миры.

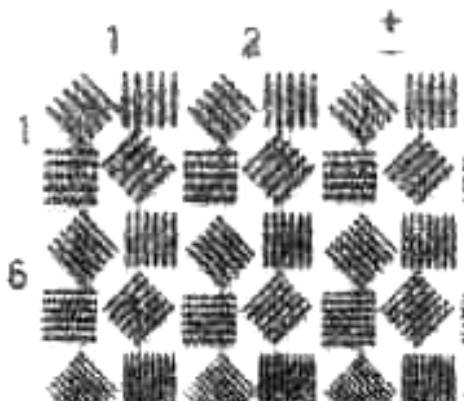


Рис.1. Фрагмент изображения миры

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 центровки 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.

Рассмотренные 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.

Поэтому 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 аберраций системы, например, известным методом Гартмана [3, 8].

Исследование оптической системы теневым методом Фуко также позволяет измерять геометрические аберрации, например - путем измерения фокусных расстояний для различных зон зрачка, что соответствует измерению сферической аберрации. Хроматизм оценивают, производя эти измерения в ряде длин волн [7, 8].

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

Одновременно развиваются и средства контроля оптических параметров. Все более широко применяются методы, позволяющие получить полную топограмму формы волнового фронта. ЭВМ дают возможность путем расчета предсказать большинство параметров системы [9], а также (путем интегрирования) составить представление о структуре изображения. Но в условиях производства нормой являются некоторые отклонения параметров системы и качества построенного ею изображения в рамках заданных допусков. Контроль соответствия действительных параметров системы расчетным и является задачей, требующей для своего выполнения развитых средств контроля. Они должны позволять исследовать действительную форму волнового фронта, сформированного реальной оптической системой. Эта форма содержит в себе неизбежные ошибки изготовления.

Еще более 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 ЭВМ, 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 [8]. 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.

Интерес к оценке качества изображения не является случайным ввиду важности и сложности этого вопроса.

Итак, эту оценку можно, в принципе, произвести по расчетным данным оптической системы до того, как изготовлен ее опытный образец. Исходные данные содержатся в оптическом выпуске объектива, содержащем радиусы кривизны, толщины, воздушные промежутки, показатели преломления и т.д. Расчетные методы позволяют просчитать путь лучей, проходящих объектив.

Далее возможны три способа оценки:

1) чисто геометрическая интерпретация, основанная на распределении следов лучей вокруг точки изображения для параксиальных лучей;

2) расчет можно выполнить так, что получатся очертания волнового фронта, определяющие в длинах волн расстояние между полученным фронтом волны в пространстве изображений и необходимым, который обычно бывает плоским или сферическим;

3) можно рассчитать распределение освещенности в изображении светящейся точки.

Расчетное определение распределения освещенности в изображении светящейся точки обычно основывается на численном интегрировании, выполняемом на ЭВМ.

По распределению освещенности в дифракционном изображении точки можно судить о разрешающей силе. В то же время, по указанным выше причинам, всегда сохраняется необходимость экспериментальных оценок качества изображения исследуемой системы, которые могут быть выполнены, например, следующими способами [3, 7, 8]:

1) метод Гартмана и его модификации, а также теневой метод Фуко являются экспериментальными реализациями геометрической интерпретации;

2) интерферометр позволяет экспериментально получить информацию о топограмме волнового фронта системы и сравнить ее с расчетными результатами [7, 8, 9];

3) изображение светящейся точки, сформированное исследуемой системой, анализируется по распределению освещенности в нем, после чего полученный результат сопоставляется с расчетными данными [6].

Так исследуемая оптическая система анализируется на соответствие расчету. Однако, помимо этого, найденные таким образом характеристики изображающей оптической системы необходимо сопоставить с желаемыми, которые, в свою очередь, определяются назначением оптической системы. Как известно, различные оптические приборы рассчитаны на использование разных приемников изображения. Приборы могут быть визуальными, фотографическими, проекционными, телевизионными и т.д. Требования к структуре изображения, в зависимости от области применения, также значительно варьируются. Например, в аэрофотографии необходимо передать мало контрастный объект с максимальным контрастом мелких деталей. В то же время телевидение, наоборот, требует искусственного ограничения высоких частот, так как их передача не только бесполезна, но и вредна вследствие ограничений, налагаемых растровым способом построения телевизионного изображения. В частности, передача высоких частот в телевизионной оптике может приводить к возникновению муаровых эффектов.

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, обычно, на порядок меньше диаметра дифракционного кружка, который способна построить исследуемая система в обратном ходе лучей, что можно выразить соотношением:

$$d = \frac{0,122\lambda}{A}, \quad (1)$$

где A - передняя апертура оптической системы в схеме контроля,

$$A = \sin \sigma,$$

λ - длина волны света в схеме контроля; A - передняя апертура оптической системы (в случае исследования фотообъектива A - апертура коллиматора).

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.

При испытании оптической системы, имеющей значительные остаточные aberrации и изображающей точку в виде пятна рассеяния без отчетливой дифракционной структуры, часто пользуются способом измерения видимого диаметра пятна рассеяния с помощью окуляр-микрометра микроскопа, через который наблюдают увеличенное изображение точки. Далее измеренный диаметр реального кружка сопоставляют с диаметром кружка, заключенного внутри первого темного кольца идеального дифракционного кружка изображения точки. Такой способ оценки нередко используется при технологических испытаниях объективов телескопов, в частности - для оценки качества изображения астрономического зеркала на промежуточных этапах его обработки. Следует отметить, что диаметр кружка рассеяния, измеренный таким образом, зависит не только от формы распределения освещенности, но и от светового потока в схеме контроля. Поэтому полученные результаты, несмотря на их численную форму, пригодны лишь для сравнительной качественной оценки в сопоставимых условиях, чаще всего для наблюдения изменений структуры изображения в ходе обработки данной поверхности.

Другой способ оценки качества изображения состоит в наблюдении формы дифракционного пятна и применяется при исследовании оптических систем, дающих изображение точки в виде пятна, имеющего различимую дифракционную структуру и более или менее близкого к идеальному дифракционному изображению. К таким системам можно отнести объективы микроскопов и высококачественные астрономические системы.

Оценивая форму центрального максимума и дифракционных колец, судят о характере aberrаций системы. Дифракционный кружок системы, удовлетворяющей критерию Релея, т.е. имеющей отклонение волнового фронта от сферической формы не более чем на $\lambda/4$, содержит центральный максимум и одно различимое дифракционное кольцо правильной круглой формы, без искривлений и разрывов,

Сферическая аберрация проявляется в виде увеличения числа дифракционных колец и ослабления центрального максимума. Кома обнаруживается как появление у дифракционной точки "хвоста" из фрагментов нескольких колец, направленных в одну сторону. Слабая кома выражается в разрыве дифракционного кольца с одной стороны и утолщения с противоположной. Астигматизм проявляется в крестообразной форме дифракционного изображения точки.

На практике встречаются промежуточные типы аберраций, например, искажение точки в форме треугольника [6], что свидетельствует о наличии одновременно нескольких аберраций.

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.

Показано использование при контроле и аттестации оптики таких технических средств, как фотографическая регистрация, телевизионная аппаратура, когерентные источники света – лазеры, электронно-вычислительная техника.

Рассмотрев очень обобщенно [3] весь комплекс известных на сегодняшний день многообразных методов исследования и контроля оптических систем, можно убедиться в том, что эти методы сводятся, в основном, к регистрации структуры волнового фронта, сформированного системой в схеме контроля, и исследованию этой структуры. Структура визуализируется в форме изображения того или иного вида, например, в виде интерференционных полос, теневой картины, совокупности пятен, составляющих диаграмму Гартмана и т.д.

Оптические системы исследуются, главным образом, в двух зонах:

- 1) в плоскости зрачка системы, где объектом исследования являются отклонения волнового фронта от формы, соответствующей требуемому качеству изображения;
- 2) в плоскости изображения, где объектом исследования служит двумерное распределение освещенности в плоскости изображения, характеризующее концентрацию энергии оптической системой и ее свойство полной передачи информации о структуре объекта, поступающей на ее вход в виде оптического сигнала.

Структура волнового фронта, характеризующая качество исследуемой системы, может быть представлена функцией пространственных координат на зрачке и на предмете, зависящей (при наличии хроматизма) от длины волны излучения. Волновой фронт может также испытывать изменение во времени, например, под влиянием неоднородностей атмосферы. Многомерность характерна и для функции, описывающей структуру изображения.

Для регистрации такого многомерного сообщения на носителе, имеющем меньшее число измерений, например, на двумерном графике, приходится дискретизировать аргументы сообщения. При этом само сообщение преобразуется в более простое, с меньшим числом измерений. Так, при исследовании качества изображения реальной оптической системы по изображению светящейся точки видно, что это оптическое изображение окружено цветной каймой из-за влияния хроматизма и дифракции и непрерывно меняет свою форму под действием атмосферных флуктуаций. Такое сложное, многомерное сообщение должно быть дискретизировано на приемнике изображения. Многоцветная картина преобразуется в монохромную - получается ряд изображений, зарегистрированных в различных длинах волн. Плавное изменение освещенности по плоскости изображения преобразуется в ряд изолиний, каждая из которых соответствует определенному уровню освещенности, а вместе они образуют топограмму уровней освещенности. Наконец, изменение формы изображения во времени фиксируется на ряде последовательных снимков (аналог киносъемки или телевизионной регистрации).

Комплекс средств формирования, регистрации, преобразования и анализа оптической измерительной информации, включающий в себя исследуемую оптическую систему, оптическую измерительную установку, формирующую требуемое изображение, и регистрирующую часть, целесообразно рассматривать в совокупности как оптико-измерительную регистрирующую систему. В такой системе значение процессов регистрации постоянно растет, причем функции приемника изображения отнюдь не ограничиваются ролью запоминающего устройства. Напротив, в современных условиях приемник изображения все в большей степени берет на себя функции трансформации, анализа и первичной обработки информации и подготовки ее к вводу в компьютер.

Основными направлениями развития средств контроля и аттестации оптических систем и элементов являются:

1. Замена качественных (субъективных) методов количественными (объективными) методами измерений.
2. Все более широкое внедрение средств автоматизации

операций контроля.

3. Повышение точности измерений.
4. Механизация и автоматизация представления результатов измерений в форме, необходимой для автоматической обработки (например, в цифровой).
5. Автоматизация окончательной обработки данных и получение результатов контроля и аттестации с помощью компьютера.
6. Получение измерительной информации об оптических характеристиках в необходимом количестве и в сроки, достаточные для реализации автоматических систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) изготовления оптических деталей и систем. Эти задачи успешно решаются благодаря все более широкому применению средств, рожденных современными научно-техническими достижениями: лазеров, научной и прикладной фотографии, телевизионной техники, устройствам связи с ЭВМ, средств компьютерных технологий.

Таким образом, речь идет о постепенной замене существующих отдельных контрольных операций, часто дающих субъективные и недостаточно полные данные, на сквозной канал контроля при помощи специализированной оптико-измерительной системы, автоматизированной на большинстве стадий получения и переработки данных.

Решение указанных задач достигается внедрением высоких технологий в процесс развития методов и средств оптических измерений.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

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

Эти величины могут быть получены при необходимости и косвенным путем - при математической обработке данных о форме волнового фронта, сформированного в зрачке исследуемой системы [7, 8]. 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 ЭВМ (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. Поэтому 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.

Функция, описывающая двумерное распределение освещенности в изображении точки, называется функцией рассеяния точки (ФРТ) данной системы [1, 2, 4, 9].

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

Понятие функции рассеяния распространяют и на изображение линии [1]. 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, функция рассеяния линии (ФРЛ) может быть получена как результат интегрирования ФРТ по одному из направлений:

$$h_L(x') = \int_{-\infty}^{\infty} h(x'; y') dy' \quad (2)$$

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

$$L_n(y) = I \quad \text{при } y \leq y_0$$

$$L_n(y) = 0 \quad \text{при } y > y_0.$$

График функции распределения освещенности в изображении пограничного теста $h_K(y')$ называют пограничной кривой.

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. Если полуплоскость изображается системой с функцией рассеяния линии $h_L(y')$ то пограничная функция выражается зависимостью (считая увеличение $V = 1$):

$$h_K(y') = \int_{-\infty}^{\infty} h_L(y'-y) dy. \quad (3)$$

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.

Частотной характеристикой качества изображения служит также модуляционная передаточная функция, называемая иногда частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ), которая будет рассмотрена далее.

С другой стороны, возникли и развиваются методы исследований, характеризующие форму волнового фронта а зрачке оптической системы [1, 2, 8]. Первым из них был теневой метод, предложенный Фуко в 1859 г., при котором визуализация ошибок волновой поверхности производится наблюдением зрачка системы из зоны, лежащей вблизи плоскости изображения точки, пересеченного экраном. При наличии отклонений формы фронта волны изображение точки окружается светящимся ореолом, образованным аберрационными лучами. Если место правильного изображения пересечь экраном (ножом Фуко), часть аберрационных лучей перекроется им. При этом на зрачке образуются темные участки, указывающие на неправильный наклон поверхности.

Более ста лет теневой метод считался чисто качественным. Однако, а последние годы появилось много работ, направленных на получение количественных оценок ошибок системы по данным испытанию теньвым методом.

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. Исходя из геометрической постановки вопроса Гартман изолировал диафрагмами отдельные узкие пучки лучей, которые формировались исследуемой системой, и с помощью экстрафокальных фотографий определял точки, в которых эти пучки пересекали ось. Ограничение метода Гартмана состоит в следующем: следы отверстий диафрагмы на фотопластинке являются дифракционными изображениями, которые тем больше по диаметру и тем сильнее размыты, чем меньше диаметры самих диафрагм. Поэтому существует некоторый оптимальный диаметр диафрагмы, который, согласно Гартману, лежит в пределах между $1/200$ и $1/400$ фокусного расстояния. Этот минимум не только ограничивает размеры определяемых зон зрачка, но и их число.

В 1918 г, Твайман сообщил о своем методе. Суть его состояла в сравнений плоского волнового фронта с фронтом волны от исследуемой системы, форма которой приведена к плоской для случая отсутствия ошибок и аберраций. Т.е. речь шла об интерферометрическом методе, когда 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 (горизонтالي) представлены в виде полос с разностью хода, кратной длине волны.

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 ЭВМ, Например, каждая интерференционная полоса синусоидальной структуры трансформируется в пару четких контуров.

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 $O(x,y)$ [1, 4].

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 $O = C_1 O_1 + C_2 O_2 \rightarrow I = C_1 I_1 + C_2 I_2$;

- 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:

$$I(x', y') = \iint_O O(x; y) \cdot h(x'-x, y'-y) dx dy. \quad (4)$$

Этот интеграл называется сверткой. Сокращенно операция свертки обозначается как

$$I = O \otimes h, \quad (5)$$

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

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

Изображение сложного объекта получается суммированием изображений синусоидальных составляющих.

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

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

$$\text{где } F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) e^{-i\omega y} dy, \quad \omega = 2\pi\nu - \text{круговая частота;}$$

ν - пространственная частота, мм^{-1} .

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

Найдем преобразование Фурье двумерного объекта:

$$O(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} o(x, y) e^{-2\pi i(\mu x + \nu y)} dx dy. \quad (6)$$

Эту операцию можно записать сокращенно:

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

Аналогично для функции двумерного изображения и для

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

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

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

$$i(\mu, \nu) = o(\mu, \nu) D(\mu, \nu), \quad (7)$$

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 оптической передаточной функцией (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:

$$h(x', y') = \left[\frac{2J_1(Z)}{Z} \right]^2, \quad (8)$$

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

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

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

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

где σ' - апертурный угол в пространстве изображений.

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

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

Значения функции рассеяния для идеального оптического прибора используются в виде таблицы. Радиусы дифракционных колец, выраженные в значениях Z , составляют для светлых

максимумов дифракционного кружка: $Z_{max} = 0; 5,14; 8,46; 11,62$ и т.д.

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

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

Представляют также интерес величины освещенности при различных значениях величины Z :

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:

$$r_0 = \frac{0.61\lambda}{A'} \quad (9)$$

В частности, эта величина связана с так называемым критерием Релея, согласно которому предельное разрешение оптического прибора при изображении им двух близко расположенных светящихся точек достигается при попадании центрального максимума одного дифракционного кружка на первый минимум второго кружка. Эту величину называют также линейным пределом разрешения по Релею [1, 3].

Теперь рассмотрим более подробно оптическую передаточную функцию. Из уравнения (7) 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 назван оптической передаточной функцией (ОПФ) и является преобразованием Фурье от ФРТ. Таким образом, ОПФ может быть представлена в виде:

$$D(\mu; \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} h(x; y) e^{-2\pi i(\mu x + \nu y)} dx dy \quad (10)$$

Для одномерного тест-объекта (освещенной щели) имеем:

$$D(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} h(y) e^{-2\pi i \mu y} dy \quad (11)$$

Пользуясь формулой Эйлера

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

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

$$d_{\text{л}}(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{\text{л}}(y) \cos \pi \mu y dy - i \int_{-\infty}^{\infty} h_{\text{л}}(y) \sin \pi \mu y dy = T_c(\mu) - iT_s(\mu) \quad (12)$$

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

$$D_{\text{л}}(\mu) = T(\mu) e^{i\varphi(\mu)} \quad (13)$$

Модуль ОПФ характеризует способность системы передавать контраст объекта при изображении структур различной частоты и называется модуляционной передаточной функцией (МПФ) или частотно-контрастной характеристикой (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:

$$O(y) = b_0 + b_1 \cos 2\pi \mu y, \quad (14)$$

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

Распределение освещенности в изображении объекта

$$I(y) = b_0 + b_1 T_{\mu} \cos(2\pi \mu y - \varphi). \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) отличаются появлением фазового угла φ , показывающего смещение изображения – фазовый сдвиг, и изменением амплитуды b_1 в T_{μ} раз.

Используем формулу для определения контраста синусоидального объекта:

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} = \frac{b_1}{b_0}, \quad (16)$$

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

$$T_\mu = \frac{K_I}{K_o} \quad (17)$$

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 крупно-серийного производства показывает, что характеризовать качество изображения функциональной зависимостью недостаточно удобно и излишне трудоемко. Требуется охарактеризовать качество изображения одним числом. Такое число, называемое критерием качества изображения, получают при анализе выбранной характеристики качества изображения либо непосредственно из самого изображения выбранного тест-объекта.

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

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

Определим линейный предел разрешения с помощью ФРТ и ОПФ. Если $h_1(x, y)$ и $h_2(x, y)$ - 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 ε , определим контраст в изображении пары точек:

$$K = \frac{I(y=0) - I(y = \frac{\varepsilon}{2})}{I(y=0)} \geq K_{\Pi} \quad (18)$$

где K_{Π} - пороговый контраст приемника изображения.

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

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

$$R = \frac{1,64 A'}{\lambda} \quad (19)$$

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 функцией передачи модуляции. 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 $\mu = 0 \div 40$ мм.

Критерий вычисляется по формуле

$$J = \frac{1}{\mu_{np}} \int_0^{\mu_{np}} T(\mu) d\mu \quad (20)$$

где μ_{np} - частота, принятая в качестве предельной на сюжетно важном интервале.

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

При оценке оптических систем для телевидения используется соотношение

$$\mu_{кр} = \frac{n}{2h_r} \quad (21)$$

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

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:

$$L_K = \frac{F_d}{F} \quad (22)$$

$$F_d = \int_0^{\frac{d}{2}=r} h(r) r dr \quad (23)$$

где $D(r)$ – ФРТ.

С другой стороны, вся энергия в пятне рассеяния:

$$F = \int_0^{\frac{d}{2}=r} h(r) r dr \quad (24)$$

Величины F_d и F в ряде случаев могут быть непосредственно измерены фотометром. Кроме того, их можно определить математической обработкой функции рассеяния точки, методика измерения которой рассмотрена ниже.

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:

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

- качества изображения;
- аберраций системы;
- формы оптических поверхностей;

2) указанные характеристики связаны между собой одно-значными математическими зависимостями, которые позволяют, при известных волновых аберрациях, 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 ЭВМ;

3) 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;

4) ФРТ, являясь первичной характеристикой качества изображения, позволяет перейти к требуемым характеристикам качества изображения, таким, как ФРЛ, ЧКХ, краевая функция, концентрация энергии и другие.

Измерение частотно-контрастных характеристик объективов

Контроль качества изображения объективов по ЧКХ представляет значительный интерес для исследователей, в частности применительно к высококачественным кино- и фотообъективам [4, 8].

Подавляющее большинство способов измерения ЧКХ основано на измерении распределения освещенности в оптическом изображении фотоэлектрическим способом. По виду и характеру кривых составляют представление об эксплуатационных свойствах исследуемых объективов при их использовании для изображения протяженных объектов с более или менее мелкими структурными элементами

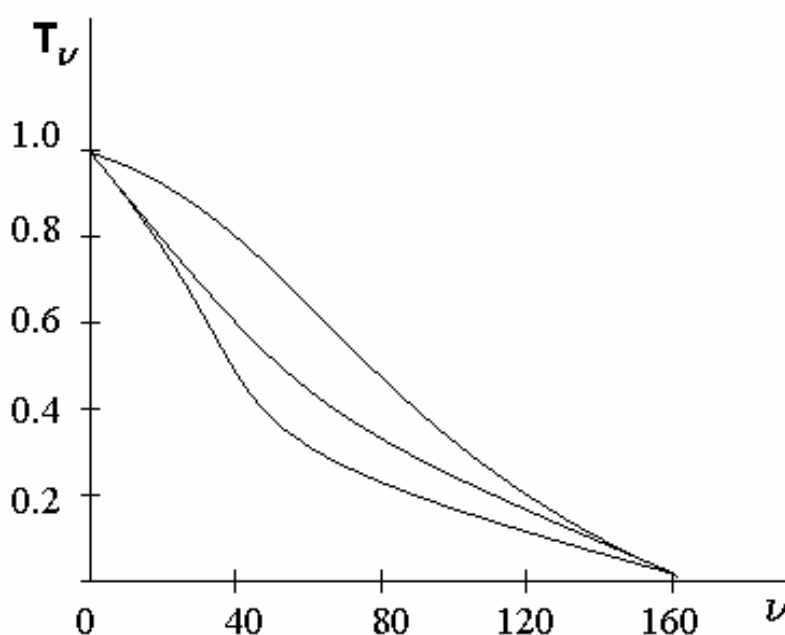


Рис.2

Изображенные на рис.2 графики ЧКХ трех различных объективов показывают, что у всех этих объективов одинаковый предел разрешения ($\eta = 200 \text{ мм}^{-1}$), где η - значения пространственной частоты, отложенные по оси абсцисс графика, по оси ординат отложен относительный контраст или коэффициент передачи контраста (КПК):

$$T = \frac{K'}{K}$$

где K и K' - контрасты объекта и изображения: соответственно.

В то же время объектив A дает наиболее контрастное из всех трех изображений на средних частотах, которое при обычном рассмотрении воспринимается как лучшее из трех.

ЧКХ можно измерить как:

$$T(\nu) = \frac{K'}{K} = \frac{\frac{E'_{\max} - E'_{\min}}{E'_{\max} + E'_{\min}}}{\frac{B_{\max} - B_{\min}}{B_{\max} + B_{\min}}},$$

где $E'_{\max}$ и $E'_{\min}$ - максимальная и минимальная освещенности в изображении, $B_{\max}$ и $B_{\min}$ - максимальная и минимальная яркости объекта.

На результаты измерений ЧКХ объективов влияет ряд факторов, связанных с расчетом их оптических систем: остаточные монохроматические и хроматические aberrации, светорассеяние, качество центрировки и т.д. Все эти недостатки приводят к снижению коэффициента передачи контраста (КПК) и ухудшают передачу в изображении структурных элементов объекта.

При контроле объективов серийного производства для снижения объема измерений определяют значения ЧКХ лишь на одной или двух пространственных частотах, например, для кинообъективов $\nu = 20\text{мм}^{-1}$ и $\nu = 40\text{мм}^{-1}$. Измерения производятся в центре поля, по полю и на краю кадра в меридиональном и сагиттальном направлениях. Качество объективов оценивается по наименьшему значению контраста.

ЧКХ можно измерять в белом или монохроматическом свете для линии e ($\lambda = 546,1\text{нм}$) при полностью открытой диафрагме, а также при диафрагмировании до 1:4,... 1:5,6.

Едва заметное изменение качества изображения соответствует 20% изменения КПК на данной частоте. Это значение принято в качестве допустимого отклонения при оценке качества объективов по критерию КПК.

Прямой отсчет ЧКХ при измерениях предусматривает использование синусоидальных тест-объектов, изготовление которых связано со значительными трудностями. Поэтому на практике используются тест-объект в виде П-образной миры, причем выделяют гармоники в электронной части измерительной аппаратуры путем пропускания сигнала через узкополосный частотный фильтр, что, естественно, порождает дополнительные

погрешности. Для контроля необходимы сложные по конструкции электронно-оптические установки, требующие высококвалифицированного обслуживания и часто нестабильные в эксплуатации, что тормозит широкое внедрение контроля объективов по ЧКХ.

Начиная с 1955 г., предложены многочисленные методы и установки для измерения ЧКХ. Наибольшее распространение получили установки для измерения передаточной функции кино-фотообъективов, основанные на методах непосредственного сканирования и гармонического анализа, так как соответствующие установки проще в изготовлении и в эксплуатации. Разработка новых конструкций установок для измерения ЧКХ направлена по пути повышения точности, универсальности и автоматизации.

Рассмотрим отдельные приборы для измерения ЧКХ кино-фотообъективов.

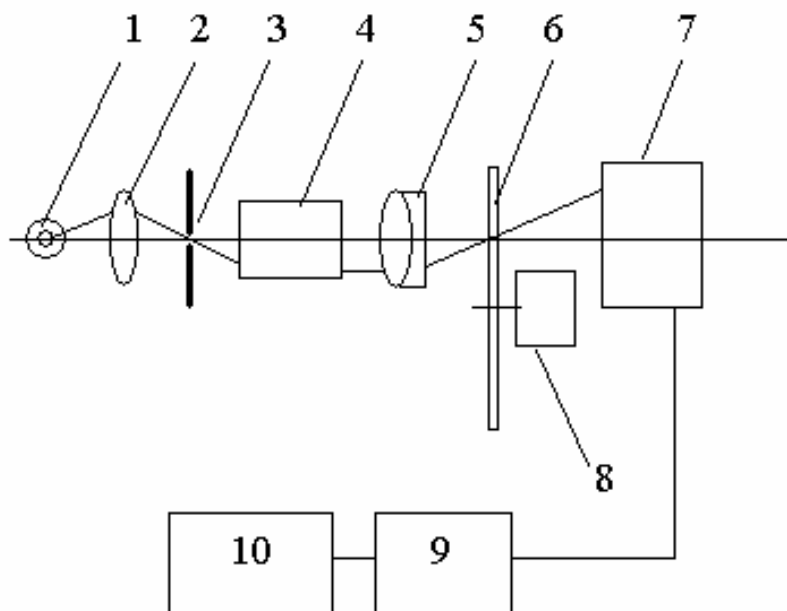


Рис.3

Так, был разработан и изготовлен отечественный фотоэлектрический микрофотометр, позволивший измерять ЧКХ кино-фотообъективов. Он состоит из двух основных частей: оптической скамьи и измерительной фотоэлектрической установки. В оптическую скамью входят осветитель, коллиматор, объективодержатель и микрообъектив. Измерительная установка включает в себя щель с фотоэлементом, электронный усилитель и электронный самопишущий прибор.

На рис.3 приведена принципиальная схема установки для контроля объективов профессиональных кинокамер.

От источника света 1 пучок лучей, пройдя через конденсор 2, освещает точечную диафрагму 3 диаметром 7 мкм, расположенную в фокальной плоскости исследуемого объектива 4.

Объектив, укрепленный в объективодержателе, работает в обратном ходе лучей, образуя при помощи длиннофокусного коллиматора 5 ($f = 1600$ мм) изображение точечной диафрагмы в плоскости радиальной миры 6, служащей модулятором.

При помощи электродвигателя 8 радиальная мира вращается вокруг оси, параллельной оптической, и перемещается перпендикулярно оптической оси системы. Таким образом, световой пучок, формирующий изображение точечной диафрагмы, модулируется системой секторов, последовательно перемещаясь от одного края миры до другого.

Датчиком электрического сигнала служит фотоэлектрический умножитель 7 (ФЭУ-7). На выходе последнего появляются импульсы, амплитуда и форма которых зависят от положения центра вращающейся миры относительно оси установки.

Импульсы напряжения подаются на вход избирательного усилителя 9, который выделяет первую гармоническую составляющую импульсов. Эта составляющая детектируется и, после сглаживания пульсаций, записывается на пленку с помощью шлейфного осциллографа 10.

Таким образом, на пленке автоматически получается график зависимости КПК от положения изображения отверстия относительно центра миры; это расстояние однозначно связано с Π .

В 1965 г. под руководством Н.А.Березина, Л.М. Кривовяза и Е.И.Диканя разработана и изготовлена установка УПОБ для измерения ЧКХ серийно выпускаемых кинофотообъективов с $f' = 20...200$ мм как в центре, так и по полю.

В установке использован метод гармонического анализа оптического изображения, позволяющий измерять контраст для разных пространственных частот.

Оптическая схема и конструкция установки УПОБ приведены на рис.4. Пучок света от ленточной лампы 1, пройдя через нейтральный ступенчатый светофильтр 2, конденсор 3, интерференционный светофильтр 4 и, отразившись от зеркала 5, равномерно освещает тест-объект 6, представляющий собой цилиндр из оптического стекла, на поверхности которого нанесены две дорожки узких прозрачных штрихов.

Участок тест-объекта, находящийся в фокальной плоскости коллиматора, при помощи зеркала 8 изображается объективом коллиматора 9 и испытуемым объективом 12 в плоскости сканирующей щели 13. Зеркало 11 служит для установки углов поля

зрения при испытании объективов по полю, в установке используются сменные коллиматоры 9 для возможности измерения ЧКХ объективов с $f' = 20...300\text{мм}$.

Общий световой поток, попадающий на катод ФЭУ может быть изменен с помощью нейтрального клина переменной плотности 14, расположенного между сканирующей щелью и ФЭУ-15, за которым находятся микроамперметр 16, усилитель 17, ламповый вольтметр 18 и осциллограф 19. Пучок света проходит через защитные стекла 7 и 10.

Установка ОЦ-25, в основу которой положена схема Мурата, действующая по оптико-электронному методу, разработана и изготовлена под руководством А.И.Гана и Л.Н.Крома.

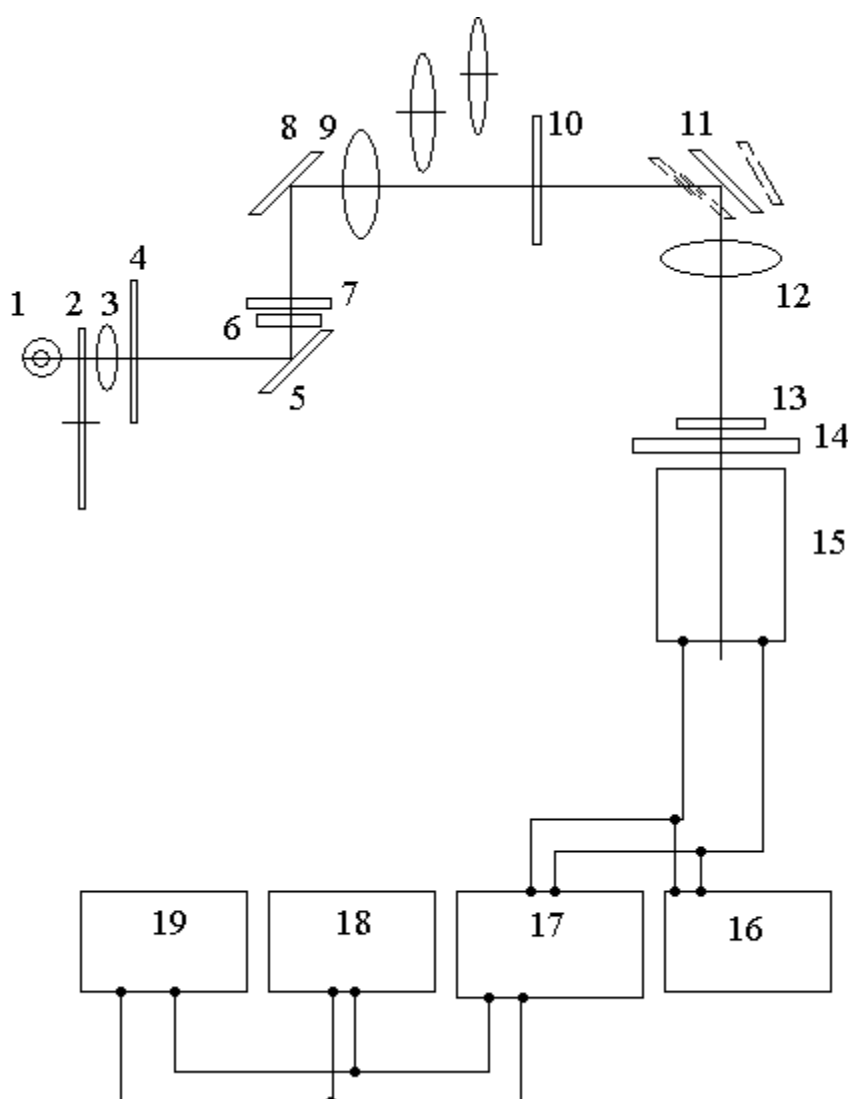


Рис. 4

В этой установке анализатор оптического изображения построен на основе прямоугольной миры с непрерывно

увеличивающейся ν , перемещаемой с определенной скоростью по закону, обратному изменению ν .

Установка позволяет производить измерения ЧКХ киносъёмочных объективов с $f' = 10...200\text{мм}$ путем смены объективов коллиматора.

Измерения ЧКХ объективов могут быть произведены в сагиттальном и меридиональном направлениях в центре поля и полю кадра как при полном открытии диафрагмы так и при диафрагмировании исследуемых объективов.

Для того чтобы получить ЧКХ, необходима фильтрация первой гармонической составляющей, которая осуществляется применением узкополосного фильтра в электронном блоке. В этом случае на выходе электронного блока получаются ЧКХ в виде огибающей сигналов. Установка позволяет, также, производить измерения ФЧХ.

В 1965 г. под руководством Г.Л.Гордона, О.Л.Герасимовой, А.А.Нилова была модернизирована установка ЭОС-1 и изготовлена новая электронно-оптическая скамья ЭОС-2, обеспечивающая проведение исследований оптических систем объективов с $f' = 12...1500\text{ мм}$ и относительным отверстием не больше 1:2 в диапазоне $\nu = 7...120\text{ мм}^{-1}$.

Принцип действия ЭОС-2 аналогичен принципу действия ЭОС-1. В основу работы ЭОС-2 положено непосредственное сканирование изображения тест-объекта - решетки с прямоугольными штрихами.

Для получения ЧКХ объектива отфильтровываются все гармоники прямоугольных импульсов, кроме основной. Это достигается путем включения в цепь одного резонансного фильтра, если частота этих импульсов постоянна и не зависит от ν штрихов решетки.

В ЭОС-2 тест-объект находится в 30-кратном f' объектива от изображения, что практически соответствует "бесконечности". Исследование объективов производится с одинаковым увеличением, а измерение ЧКХ по полю зрения осуществляется поворотом объектива относительно задней узловой точки.

За последующие годы разработан ряд приборов для измерения ЧКХ кино-фотообъективов. Рассмотрим принципиальную схему универсального прибора типа ЮС-105, разработанного и изготовленного в 1972 г.

Установка представляет собой оптическую скамью с шестью сменными коллиматорами с $f' = 200, 400, 600, 1000, 1650\text{ и }4000\text{мм}$. Действие прибора основано на методе гармонического анализа изображения П-образной решетки, образованного испытуемым

объективом, так как позволяет имитировать синусоидальную решетку переменной частоты.

От источника света (ленточная лампа СМ6-100) пучок света падает на конденсор, освещающий при помощи зеркала узкие щели одинаковой ширины, что является тест-объектом. Эти щели нанесены на посеребренном стеклянном цилиндре, цилиндры сменные, с $\nu = 0,55, 1,1$ и $2,2\text{мм}^{-1}$, с количеством штрихов 180, 360. Между конденсором и зеркалом помещен светофильтр.

Тест-объект с зеркалом находятся в фокальной плоскости объектива коллиматора. Испытуемый объектив изображает штрихи цилиндра в своей фокальной плоскости, где расположена сменная сканирующая щель различной ширины (0,002, 0,004 и 0,010 мм), за которой находится фото-умножитель типа ФЭУ-27, ФЭУ-28, ФЭУ-6. Далее сигнал проходит через анализатор гармоник С5-3, с помощью которого измеряется амплитуда гармоник или КПК.

Измерение ЧКХ в сагиттальном сечении производится путем поворота тест-объекта вокруг вертикальной оси на 90° .

Рассмотренная схема конструкции прибора ЮС-105 имеет некоторые преимущества по сравнению с ранее разработанными и изготовленными приборами для измерения ЧКХ объективов, так как благодаря большому набору сменных коллиматоров позволяет проводить испытание объективов с $f' = 10 \dots 1000$ мм с углом поля зрения $2\beta = 70^\circ$, а также объективов с переменным фокусным расстоянием, имеющих большой диапазон изменения фокусных расстояний.

Испытания прибора показали, что абсолютная погрешность измерения КПК не превышает 0,05. Прибор используется для измерения ЧКХ опытных образцов объективов.

Особый интерес для кинотехники представляет прибор, разработанный и изготовленный для измерения ЧКХ объективов, работающих с небольшим линейным увеличением. В кинотехнике подобные объективы находят применение в кинокопировальных аппаратах.

Принципиальная схема прибора отличается от схемы описанного прибора ЮС-105 тем, что вместо объектива коллиматора применена микронасадка для увеличения частоты решетка тест-объекта. Она состоит из ахроматической линзы и сменных микрообъективов с $f' = 4,3, 8,4, 15,7$ и $23,2\text{мм}$ с апертурой, равной соответственно 0,95, 0,65, 0,3 и 0,17. Измерения производятся в меридиональном и сагиттальном сечениях путем поворота тест-объекта на 90° . Пространственные частоты тест-объекта и его изображения определяются по формулам:

$$\nu = \frac{f_{mo}}{f'_l} \nu_y \quad (25)$$

$$\text{и } \nu' = \frac{\nu_y}{\beta}, \quad (26)$$

где f_l и f_m - фокусное расстояние ахроматической линзы и микрообъектива соответственно; ν - частота штрихов, нанесенных на цилиндрическую поверхность теста 10, 55, 1,1, 2,2мм; β - увеличение испытуемого объектива.

Известно большое количество конструкций установок для измерения ЧКХ. Применение находят наиболее простые в изготовлении и эксплуатации установки.

Вместе с тем на сегодняшний день не выработан единый критерий, позволяющий по ЧКХ однозначно характеризовать качество объектива, согласующиеся с визуальным восприятием изображения.

Несмотря на более чем 40-летнюю историю развития техники измерения ЧКХ, отмечается несовпадение результатов измерения ЧКХ одних и тех же объективов на установках различных конструкций.

В то же время, как показывает опыт, измерение ФРТ и ФРЛ, особенно при использовании изофотометрической техники, дает результаты воспроизводимостью не хуже 3%, что позволяет рассчитать ЧКХ достаточно точно, а главное - однозначно.

Таким образом, в качестве перспективного направления развития техники контроля и аттестации качества изображения объективов представляет интерес развитие методов и аппаратуры изофотометрического измерения ФРТ и ФРЛ с выводом данных на ЭВМ для получения требуемых характеристик качества изображения.

Экспериментальные исследование структуры пятна рассеяния

Метод контроля оптических систем и поверхностей по виду дифракционного изображения точки [6] в условиях крупносерийного и массового производства позволяет быстро установить факт отклонения контролируемого волнового фронта от идеальной сферической формы и характер аберраций.

Для контроля качества сферических и плоских поверхностей используется автоколлимационный микроскоп. Предметная точка микроскопа, в которой находится действительное изображение

точечной диафрагмы, совмещается с центром кривизны вогнутой сферической поверхности.

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

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

Если не преследуется цель измерения распределения освещенности в изображении точки, то диаметр диафрагмы, используемой при контроле системы по виду дифракционного кружка, может быть вдвое больше величины, определенной из выражения (1). При этом чувствительность оценки практически не снижается, но повышается световой поток в схеме контроля.

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

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

Поскольку диаметр дифракционного кружка зависит от длины волны, то при использовании источника белого света наблюдается радужное окрашивание дифракционных колец и снижается контраст дифракционной картины. Поэтому при аттестации высокоточных систем полезно пользоваться в схеме контроля зональным светофильтром.

Контроль линзовых систем производится в проходящем свете (рис. 5).

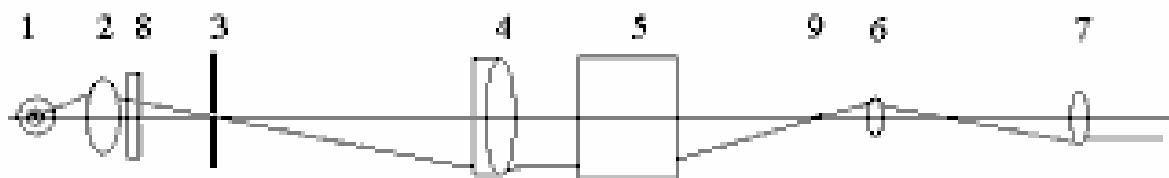


Рис.5

Свет от источника 1 проходит конденсор 2, светофильтр 8 и собирается в точечную диафрагму 3, расположенную в фокальной плоскости коллиматора 4. Параллельный пучок лучей, входящий из

коллиматора в контролируемый объектив 5, фокусируется в его фокальной плоскости 9; изображение точки рассматривается в микроскоп 6 - 7. Отверстие диафрагмы, которая устанавливается в фокальной плоскости коллиматора, должно удовлетворять соотношению (1). При этом достигается максимальная чувствительность контроля.

При контроле качества изображения по полю апертура микрообъектива определяется из соотношения

$$\sin \sigma_m = \sin(\sigma'_0 + \beta') \quad (27)$$

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

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

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 (необходимо указать, что большинство приводимых возможностей сегодня успешно реализуются в быстро развивающейся цифровой фотографии):

- 1) двумерное воспроизведение исследуемой картины весьма доступным 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 ЭВМ;
- 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 фотопроецесса 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 ЭВМ.

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 не 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:

$$H = Et \quad (28)$$

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

$$D_{\Pi} = \lg \frac{I_0}{I} = \lg \frac{1}{\tau} \quad (29)$$

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:

$$D_{\Pi} = f[\lg(Et)] \quad (30)$$

Кривая взаимосвязи между измеренным почернением и наложенной экспозицией называется характеристической кривой фотоматериала. Этот график строится в осях D_{Π} и $\lg(Et)$ (рис.6).

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

$$D_{\Pi} = \gamma \lg(Et) \quad (31)$$

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

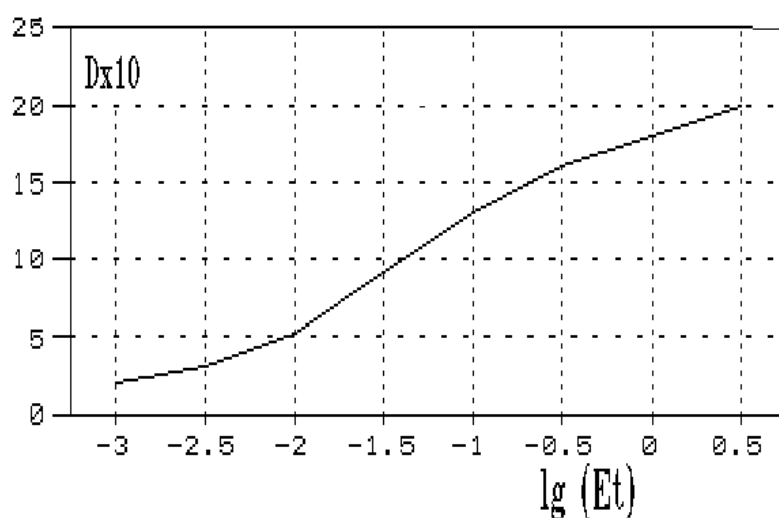


Рис.6. Характеристическая кривая фотографического материала

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

На практике, как правило, в выражении (30) значение $t = \text{const}$, т.е. экспонируется все изображение целиком и время экспозиции всех его участков одинаково. В этом случае характеристическая кривая отражает зависимость:

$$D_{\Pi} = f(\lg E) \quad (32)$$

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 функцией преобразования 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 [6].

Методика фотографической фотометрии пятна рассеяния

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

1) на фотоматериале наряду с исследуемым оптическим изображением объекта должен быть зарегистрирован фотометрический клин;

2) время экспозиции изображения объекта и клина должно быть равно;

3) необходимо учитывать непостоянство свойств фотоматериала внутри партии, поэтому изображения объекта и клина желательно иметь на одном куске фотоматериала;

4) режимы проявления обоих изображений должны быть строго одинаковы;

5) должна быть нормирована и методика измерения оптической плотности, так как в зависимости от направленности светового пучка при измерении подученные значения плотности могут различаться.

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

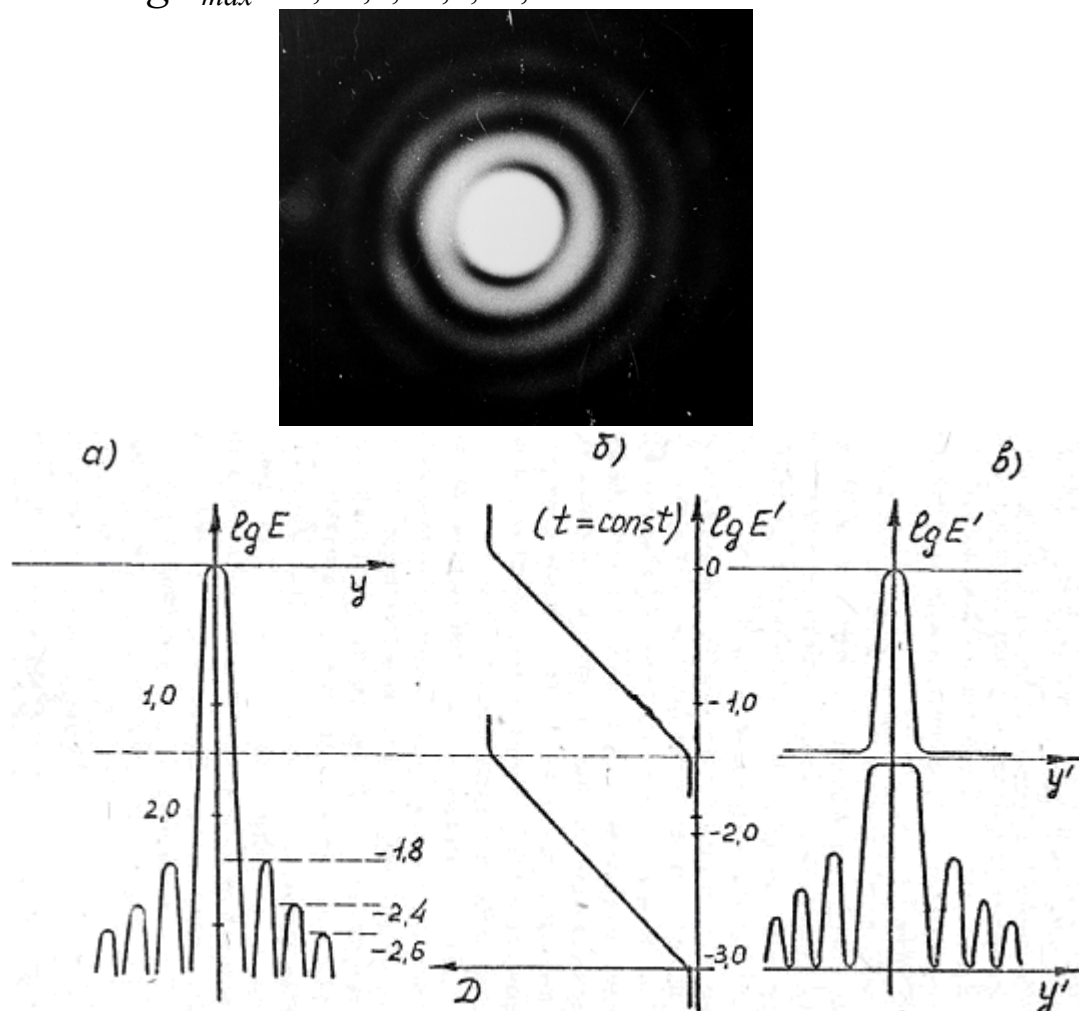


Рис. 7. Дифракционный кружок, близкий к идеальному, и схема его фотографической фотометрии

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

Спроецируем линейный участок на ось $\lg E$ графика распределения освещенности. Как видно из рис.7, диапазон пропорционального воспроизведения не позволяет произвести регистрацию распределения освещенности в идеальном дифракционном кружке. В этот диапазон $\Delta \lg E$, называемый фотографической шириной фотоматериала, укладывается лишь часть центрального максимума без дифракционных колец. Либо, наоборот, могут быть зарегистрированы дифракционные кольца, при этом

пик центрального максимума оказывается на участке нечувствительности (в области передержек - рис.7,в). Таким образом, требуется не менее двух снимков для того, чтобы воспроизвести распределение освещенности идеальной дифракционной точки на фотоматериале.

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 функцию рассеяния точки.

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 $D_{\Pi}=f(\lg E)$.

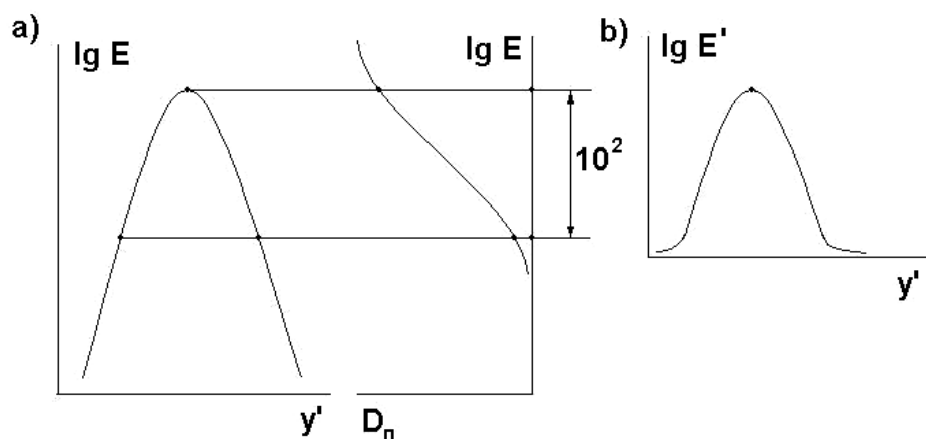


Рис. 8. Схема метода фотографической фотометрии пятна рассеяния для определения ФРТ.

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. 8). Эта величина для реальных фотоматериалов соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую 10^2 .

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

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

Итак, функцией преобразования метода фотографической фотометрии может быть названо выражение линейной зависимости, описывающее прямолинейный участок характеристической кривой. Подобная ФП характеризует и методы фотоэлектрического сканирования.

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

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

$$E(x') = \int_{-\infty}^{\infty} h(x'; y') dy'$$

Результатом такого интегрирования будет функция рассеяния линии (ФРЛ) исследуемой системы. ЧКХ для данного направления:

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

Фотографические методы обработки изображения при контроле оптических систем

Изображений тест-объектов, получаемые при испытаниях оптических систем, характеризуются чаще всего плавным изме-

нением освещенности. В то же время при проведении измерений, таких изображений получают лишь ограниченное число дискретных значений функции в ряде характерных точек. Например, распределение плотности в фотографическом изображении пятна рассеяния можно охарактеризовать конечным числом замкнутых кривых - эквиденсит, проходящих через точки $D_{Pi} = \text{const}$ [4]. Соответствующие значения освещенности находят, пользуясь характеристической кривой данного снимка. При этом эквиденситы становятся изофотами; их совокупность дает топограмму двумерной ФРТ,

Эквиденситы фотоизображения пятна рассеяния могут быть получены с помощью сканера.

Нашел применение способ получения эквиденсит с использованием эффекта соляризации (например, в ADOBE PHOTOSHOP имеется опция SOLARIZ), состоящего в частичном обращении изображения.

Полученные отдельные эквиденситы совмещаются в единую топограмму двумерного распределения освещенности в изображении точки.

Методы определения ФРТ путем анализа распределения оптической плотности в фотографическом изображении пятна рассеяния (в том числе и с цифровой фотокамеры) позволяют решать поставленную задачу, однако имеют следующие ограничения:

1) диапазон исследуемых освещенностей ограничивается лишь диапазоном полезных экспозиций негативного фотоматериала (или матрицы), что, как было показано, недостаточно для полного количественного анализа ФРТ и использования ее в целях определения других критериев количественной оценки качества изображения;

2) метод эквиденсит требует проведения сенситометрического испытания фотоматериала (или матрицы) с получением характеристической кривой, что является довольно трудоемкой работой и требует использования дорогостоящей аппаратуры.

Поэтому метод эквиденсит нашел применение главным образом в целях качественных структурных исследований распределения яркости различных объектов типа комет, туманностей и т.п.

Методы фотоэлектрического сканирования изображения светящейся точки

Результаты визуальных оценок не позволяют определить в количественной форме распределение освещенности в пятне рассеяния $h(y; z)$. Следовательно, они не дают возможности

перейти к однозначным количественным критериям оценки качества изображения. Это в свою очередь не дает возможности точно количественно аттестовать систему и исключает автоматизацию контроля.

В современных условиях, при повышении требований к качеству изображения оптических систем, быстро развиваются методы количественной оценки структуры пятна рассеяния, которые можно разбить на три основные группы:

- 1) методы, фотоэлектрического сканирования;
- 2) методы фотографической фотометрии;
- 3) изофотометрические методы.

Фотоэлектрические методы измерения распределения освещенности в пятне рассеяния [5, 7, 8] осуществляются с помощью сканирующих диафрагм. Увеличенное оптическое изображение пятна рассеяния сканируется диафрагмой, диаметр которой в 40-50 раз меньше исследуемого поля. Обычно сканирование производится по ряду параллельных прямо линейных строк. Выводя на осциллограф сигнал строки, наблюдают график изменения напряжения видеосигнала по этому сечению, которое в определенных пределах, зависящих от формы световой характеристики фотоприемника, пропорционально освещенности в каждой точке строки сканирования.

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

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

Микрофотометр по этому методу был разработан Креопаловой и Пуряевым для наблюдения структуры пятна рассеяния системы, работающей в ИК-области спектра. Прибор состоит из оптической скамьи, сканирующего устройства и регистрирующей электронной схемы (рис.9).

Лампа 1 через конденсор 2 освещает диафрагму 4 в фокальной плоскости коллиматорного объектива 5. Перед диафрагмой размещен модулятор 3 в виде вращающегося диска с отверстиями. Исследуемый объектив 6, установленный за коллиматором, изображает диафрагму 4 в виде пятна рассеяния, которое увеличи-

вается вспомогательным микрообъективом 7. Сканирующее устройство выполнено в виде диска 10 с диафрагмой 8 диаметром 0,02 мм, за которым помещен ФЭУ 9; за один оборот диска его ось смещается по вертикали на величину диаметра сканирующей диафрагмы.

Второе отверстие диска 10 с находящимся за ним фотоприемником 11 служит для синхронизации механической и электронной разверток. Регистрирующая электронная система 12 с блоком питания 13 выводит график ФРТ на осциллограф 14.

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

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

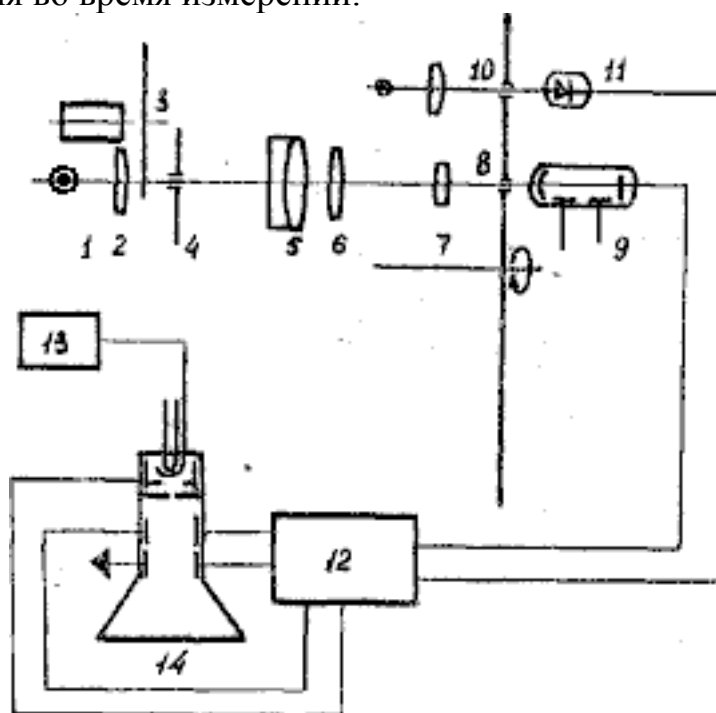


Рис.9

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

за который пятно рассеяния смещается на расстояние, превышающее 5-10% его диаметра.

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

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

МЕТОД ИЗОФОТОМЕТРИИ

Для устранения указанных недостатков традиционных методов 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-метрового зеркала крупнейшего в мире телескопа БТА и ряда других крупных астрономических систем [2, 6]. Эти методы нашли применение для контроля (по функции концентрации энергии 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.

Рассмотрим принципиальное отличие в механизме оценки структурных характеристик по методу изофот по сравнению с методом эквиденсит. Изобразим в логарифмическом масштабе распределение относительной освещенности, полученное многократно при различных световых потоках от объекта (рис.4). Наложим на изображенную совокупность распределений шкалу равномерно и достаточно часто расположенных фотометрических

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

Построим характеристическую кривую высококонтрастного материала в виде функции $D_H = f(\lg E)$ при $H = Et = \text{const}$, где t - время.

В этих координатных осях каждому времени экспозиции соответствует своя характеристическая кривая, смещенная вдоль оси $\lg E$.

Равномерная шкала логарифмов времени экспозиции позволяет последовательно "наводиться" характеристической кривой высококонтрастного фотоматериала на равномерный ряд фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону. Таким образом, исследуемое распределение освещенности отображается в виде совокупности равномерно расположенных сечений независимо от общего (среднего) уровня освещенности, с одинаковой степенью подробности передачи фотометрической структуры.

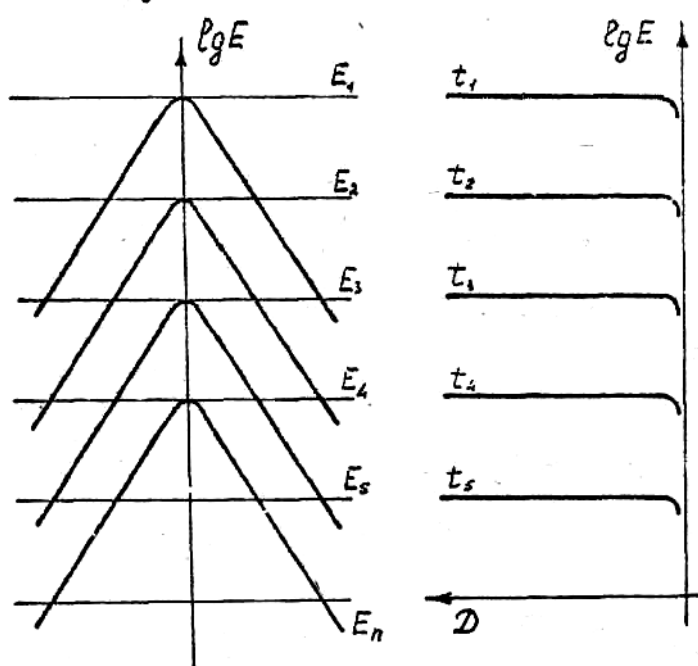


Рис.10

При исследовании структуры пятна рассеяния, в частности - измерения ФРТ, исследуемая оптическая система устанавливается в положение наименьших aberrаций. Так, исследуемый объектив для фото- или видеокамеры, рассчитанный для работы из бесконечности на конечное расстояние, устанавливается в схему контроля на базе коллиматорной установки.

Схема установки для контроля ФРТ фото - видео-объектива в положении наименьших aberrаций показана на рис.10.

Принцип метода изофотометрии с переменным временем накопления удобно объяснить на основе фотографического варианта.

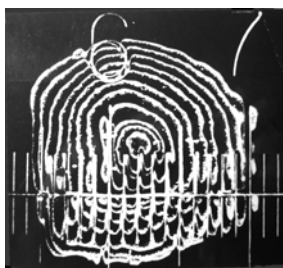
Метод фотографической изофотометрии основан на получении серии фотоснимков пятна рассеяния с переменным временем экспозиции. На одном куске фотоматериала экспонируются изображения фотометрических сечений оптического изображения точки вместе с изображением эталонного дифракционного кружка.

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 есть 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".

Изофотометрия с изменяющимся временем накопления

Как показывают проведенные исследования, для получения системы изофот (изофотограммы) исследуемого распределения освещенности необходимо использовать ФУНКЦИЮ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (ФП) типа "гребенка" (по латински - СОМВ) (рис. 11). Эта функция имеет вид ряда равномерно расположенных импульсов.

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



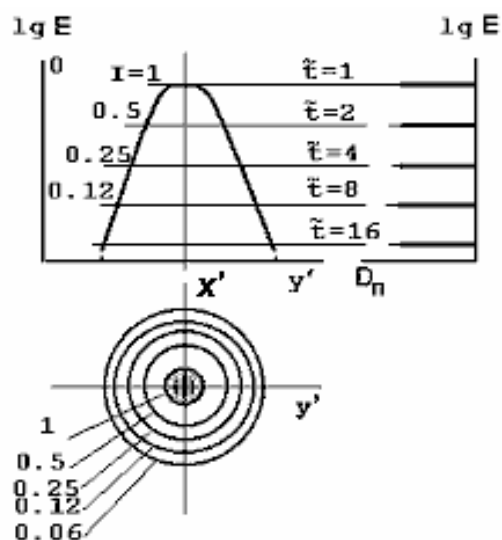


Рис. 11. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления и вид изофотограммы

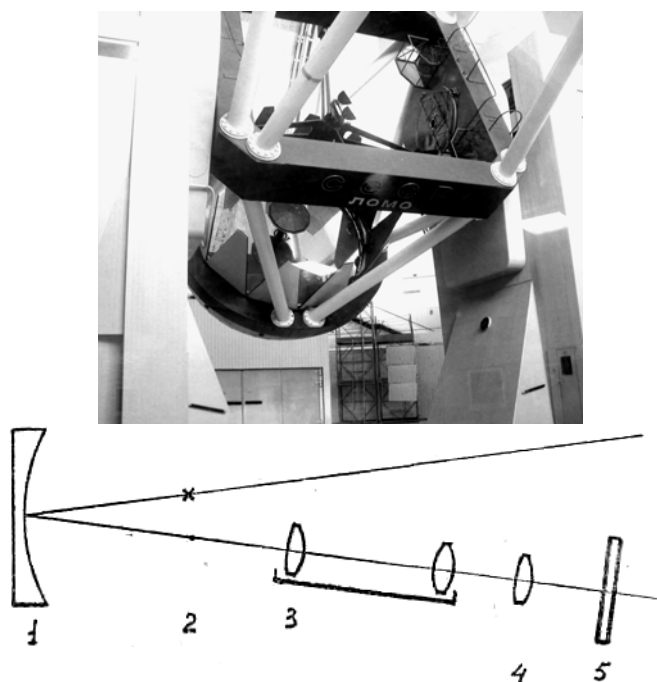


Рис.12. Астрономическое зеркало диаметром 6 метров и принципиальная схема его технологического контроля методом фотографической изофотометрии

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

$$E_1 = H/t_1; \quad E_2 = H/t_2 \dots \quad E_n = H/t_n \quad (34)$$

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

$$E_{отн} = H/t_{отн}; \quad (35)$$

или, в логарифмической форме

$$-lg E_{отн} = lgt_{отн}$$

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 регистрации.

Таким образом, при использовании приемника изображения с импульсной функцией преобразования, изменяя время накопления на приемнике изображения, достигаем эффекта перемещения импульсной функции преобразования 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 фотоприемник высокой контрастности при различных длительностях экспозиции. Изофоты различных уровней, расположенные на отдельных снимках, после оконтуривания совмещают в топограмму распределения освещенности (изофотограмму).

Для учета фотографического эффекта невзаимозаменяемости, который описывается формулой

$$(Et^p)_{D_{II}=const} = const \quad (36)$$

(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

$$d = \frac{2.44 \lambda l}{d_r} \quad (37)$$

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

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

Таким образом получают графическое выражение исследуемой ФРТ, градуированное в точных значениях E_{OTH} , не искаженных влиянием невзаимозаместимости 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.

Аппаратура фотографической изофотометрии

Рассмотрим применение фотографической изофотометрии на примере контроля крупногабаритного сферического зеркала из центра кривизны. Схема контроля показана на рис.12.

Источник света, близкий к точечному и лежащий вблизи центра кривизны, изображается исследуемым зеркалом 1 в точку 2. Это изображение проецируется оптической системой, состоящей из микроскопа 3 и фотообъектива 4, в плоскость фотоматериала 5 совместно с изображением окулярной сетки микроскопа. При фоторегистрации принимаются меры для устранения рассеянного света от осветителя.

Для получения необходимого сочетания фотометрических сечений и обеспечения последующего совмещения изофот на изофотограмме аппаратура фотографической изофотометрии строится комплексно. В изофотометрическую съемочную установку

(рис.13) входят микроскоп, строящий изображение пятна рассеяния 1, состоящий из объектива 2 и окуляра с сеткой 3, объектив регистрирующей фотокамеры 4, грейфер 5, контргрейфер 6, лентопротяжный тракт 7 и микроскоп сквозного визирования 8-9. В камере используется перфорированная пленка. После съемки и обработки фотоснимков с оконтуриванием получают серию негативов, на каждом из которых имеется одна изофота, зарегистрированная с привязкой ее положения к системе координат, связанной с перфорациями. Такая привязка позволяет при печати с данного негатива, содержащего серию изображений отдельных изофот, получить совмещенную изофотограмму в автоматическом режиме.

Устройство для автоматической печати совмещенных изофотограмм построено по следующей схеме (рис.14). Проекционная лампа 1 через конденсор 2 и поворотную призму 3 освещает кадровое окно 4, в котором последовательно перемещаются кадры серии изофот с помощью лентопротяжного механизма, в который входят грейфер 5 и контргрейфер 6. Негатив серии изофот заряжен в лентопротяжный тракт 7. Освещенный кадр проецируется объективом 8 в плоскость экрана 9, на который помещается фотобумага.

Изофоты экспонируются последовательно с соблюдением их взаимного расположения, что достигается автоматически благодаря работе грейфера. По окончании печати и фотографической обработки получают топограмму двумерной ФРТ исследуемого зеркала.

Установки для съемки и печати изофотограмм построены на базе серийной регистрирующей фотокамеры типа РФК-5. Обработка снимков производится следующим образом.

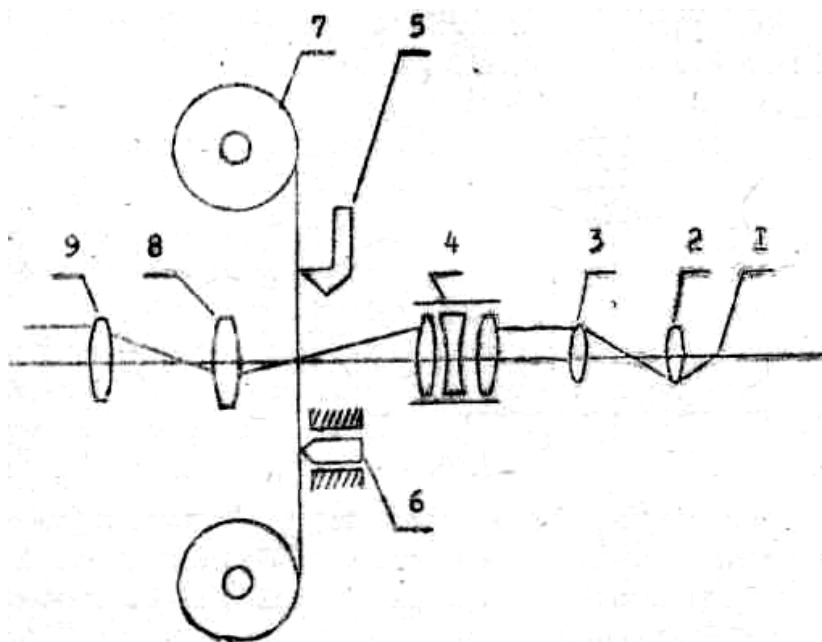


Рис.13

Исходные негативы, полученные при съемке и проявленные до высокого контраста, печатаются контактно за одну серию равных экспозиций на один кусок фотоматериала высокого контраста. Проявление ведется в контрастно работающем проявителе при интенсивном перемешивании.

С полученных отпечатков производится повторная печать на том же материале. Для выделения контуров фотометрических сечений проявление этой копии производится в соответствии с режимом:

1-е проявление –

2 мин, 21°C, проявитель УП-2, ополаскивание - 1 мин в проточной воде, равномерная засветка в черной кювете с водой при положении фотоматериала эмульсионным слоем вверх - освещенность в плоскости фотослоя 30 лк, время засветки определяется по пробам;

2-е проявление –

5 мин, 21°C, фиксирование.

Приведенные режимы дают хорошие результаты при использовании фотопленки типа *FU-5*, *ORWO*.

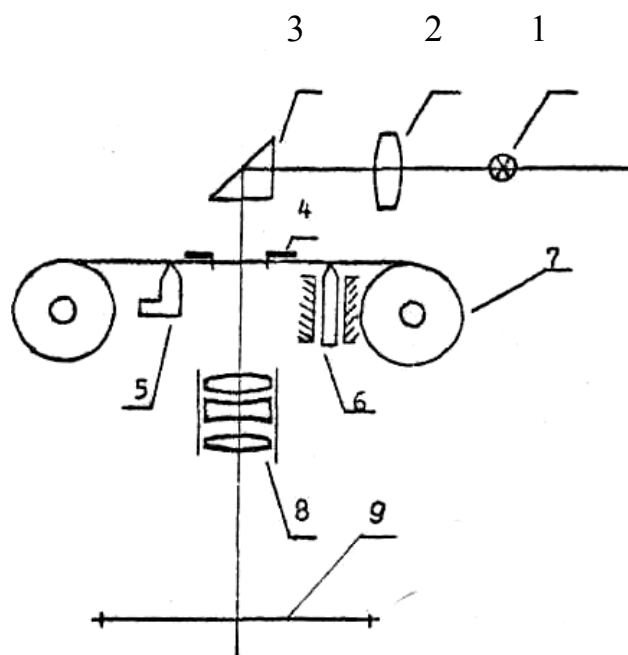


Рис.14

По полученной изофотограмме ФРТ определяются радиусы фотометрических сечений в соответствии с их порядковыми номерами. Если фотометрические сечения асимметричны, радиусы измеряются по нескольким направлениям для каждого фотометрического сечения. Зная для фотометрических сечений соотношение времен экспонирования, а следовательно, и значения $E_{отн}$, по градуировочной кривой находят значения действительных уровней освещенности для соответствующих изофот. При использовании ЭВМ значения радиусов сечений и калибровочная кривая вводятся в компьютер в качестве исходных данных для расчета характеристик качества изображения.

Телевизионная изофотометрия

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

- 1) возможность управления контрастом, яркостью и структурой изображения;
- 2) возможность устранения влияния вибраций на качество изображения;
- 3) комфортные условия наблюдения и оценки изображений;
- 4) возможность сплошного выборочного сканирования с визуализацией графика фотометрической структуры;

5) возможность автоматического считывания координат элементов изображений, полученных при оптических измерениях и вывода их для обработки на ЭВМ;

6) возможность дистанционного наблюдения изображений и управления аппаратурой контроля, находящейся в замкнутом объеме, лишенном воздушных потоков (например, в вакууме);

7) возможность контроля и регистрации параметров исследуемой системы в ходе технологических операций (юстировки, регулировки) и непрерывного проведения этих операций до достижения оптимальных характеристик оптической системы.

Современные телевизионные системы имеют приемлемые габариты и оснащены автоматическими схемами поддержания необходимых рабочих режимов приемника изображения. В оптических измерительных установках нашли применение промышленные телевизионные установки и устройства видеозаписи.

Телевизионная система позволяет изменением коэффициента усиления видеоусилителя изменять контраст изображения на телеэкране. Для получения максимального контраста применяется пороговый усилитель. Использование на его выходе дифференциальной цепочки позволяет выделять импульсы, формирующие на экране контуры изображения. Подобный результат достигается и применением компьютерной обработки изображения.

Техника телевизионно-фотографической изофотометрии, применяемая взамен фотографического оконтуривания, позволяет существенно снизить трудоемкость получения изофотограммы, описывающей двумерную ФРТ исследуемой системы.

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

К создаваемому методу телевизионной изофотометрии предъявляются следующие требования:

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

2) наглядность результатов и возможность качественной оценки формы кружка рассеяния и его фотометрической структуры.

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

$$E_{OTH}=2^{-i} \quad (38)$$

где i - порядковый номер изофоты.

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

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

$$E_t=const \quad (39)$$

Так например, у видикона с кадмиевой мишенью это соотношение сохраняет силу при времени накопления до 1000 с, что соответствует 25000 кадров, и, задавая время накопления по закону удвоения, можно получить свыше 10 уровней фотометрических сечений. На выходе телевизионной системы подключаются вычислительные устройства для расчета площадей сечений, расчета концентрации энергии или Фурье-преобразования ФРТ.

Принцип и аппаратура телевизионной изофотометрии нашли успешное применение при контроле и аттестации второго главного зеркала шестиметрового телескопа БТА.

Рассмотрим принципиальную схему установки для телевизионной изофотометрии с накоплением (рис.15). Она содержит точечный источник света 1, полученный фокусированием расширенного лазерного пучка. Изображение 3 светящейся точки строится исследуемой оптической системой 2. Это изображение переносится с увеличением при помощи микроскопа 4-5 и объектива телевизионной камеры 6 на чувствительную площадку приемника изображения 7. В цепь приемника включен блок записи электронного луча 8. Его управляющий вход соединен с выходом реле времени 9. К выходу телевизионной системы подключается блок выделения контура 10, выход которого подается на запоминающее устройство 11.

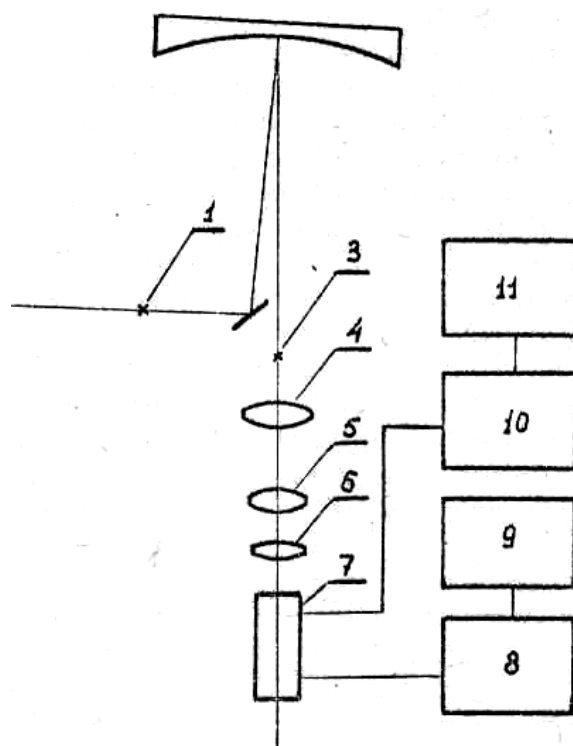


Рис.15

Установка работает следующим образом. В исходном состоянии электронный луч передающей трубки сканирует мишень и снимает с нее электрический заряд. По приходе сигнала с реле времени происходит записывание электронного луча трубки, и на ее фотокатод накапливается электрический заряд, соответствующий величине экспозиции и формирующий изображение фотометрического сечения. По окончании сигнала с таймерного

устройства видикон открывается; и электронный луч считывает заряд, накопленный на фотокатоде. При этом образуется телевизионный сигнал, который проходит блоки выделения контура и регистрируется устройством памяти.

Использование аналого-цифрового преобразователя видеосигнала дает возможность автоматизировать считывание координат изофот и вводить результат измерений для обработки в ЭВМ.

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. 11) под действием переменного накопления изменяет свое положение относительно ФРТ, выделяя изофоты различных уровней освещенности, то во втором случае (рис. 16) 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.

Схема установки для исследования качества изображения фотообъектива методом изофотометрии с изменяющимся световым потоком показана на рис.6.

В новом изофотометре экспрессность измерений достигнута за счет формирования всех фотометрических сечений при одинаковых временах экспозиции, составляющих 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. 5 это 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. 5) на уровне освещенности, вдвое меньше, чем первоначальный, и на экране 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:

$$E_i = \tau_0 / \tau_i ,$$

где τ_0 - коэффициент пропускания клина, при котором выделяется изофота максимума освещенности в пятне рассеяния (определяется экспериментально);

τ_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:

$$\lg E_i = D_{Pi} - D_{P0}. \quad (40)$$

Видеосигналы всех изофот последовательно подаются на устройство памяти.

В результате запоминания ряда фотометрических сечений и воспроизведения на экране их исходного взаимного расположения формируется изофотограмма, т.е. топограмма распределения освещенности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой. 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.

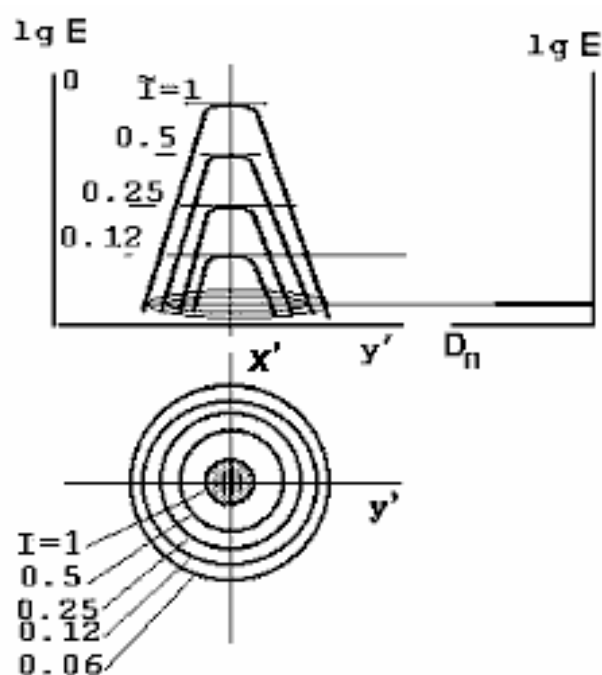


Рис. 16. Схема метода изофотометрии с изменяющимся световым потоком и изофотограмма дифракционного кружка

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

Телевизионный изофотометр с изменяющимся световым потоком

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

Ограничением данного устройства является то, что из-за необходимости получения серии кадров накопления с удлиняющимся рядом времен экспозиции накопления, один цикл измерения может длиться десятки минут. Это не позволяет следить за изменениями качества изображения в течение времени измерения, а эти изменения недопустимы, так как, измерительная система чувствительна к вибрациям и осредняет влияние воздушных потоков и других искажающих факторов. Кроме того, фотометрические сечения регистрируются лишь на отдельных уровнях освещенности, увеличение числа которых затруднено, потому что влечет за собой увеличение затрат времени на измерение. Поэтому 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 $1/25$ 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.17 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 видеоконтрольным устройством 16. Выход датчика угла поворота клина, соединен с входом вертикальной развертки регистратора.

В исходном состоянии фотометрический клин введен полностью, и чувствительность телевизионной системы установлена таким образом, что исходный световой поток в схеме контроля формирует изображение линий разного уровня освещенности (изофот) в изображении точечного источника, соответствующей максимуму освещенности E_1 , которое принимается равным единице.

При перемещении фотометрического клина на расстояние, соответствующее повышению светового потока вдвое, кривая распределения освещенности сместится в новое положение, а крутая световая характеристика телевизионной системы с дискриминатором выделит из распределения освещенности изофоту, соответствующую уровню освещенности, вдвое меньшему, чем первоначальный, и на экране ВКУ будет сформировано изображение изофоты для уровня освещенности $E_2 = 0,5$.

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

Видеосигналы всех изофот 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, построенном исследуемой оптической системой.

Далее с помощью построчного 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.

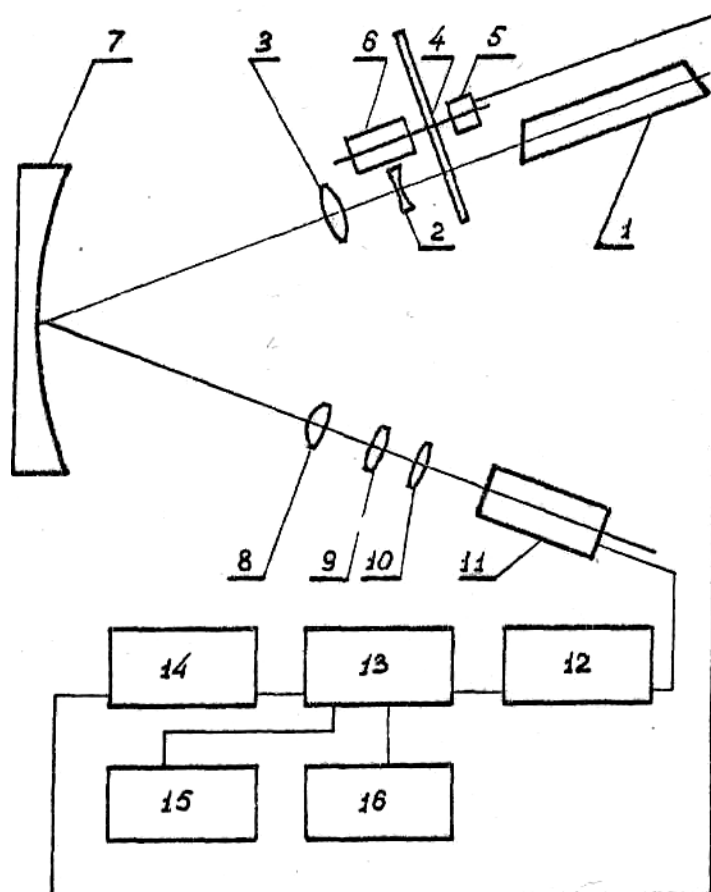


Рис.17

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 сечения. 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.

Компьютерная изофотометрия ФРТ

Схема установки для контроля ФРТ фото - видео-объектива в положении наименьших aberrаций показана на рис.18.

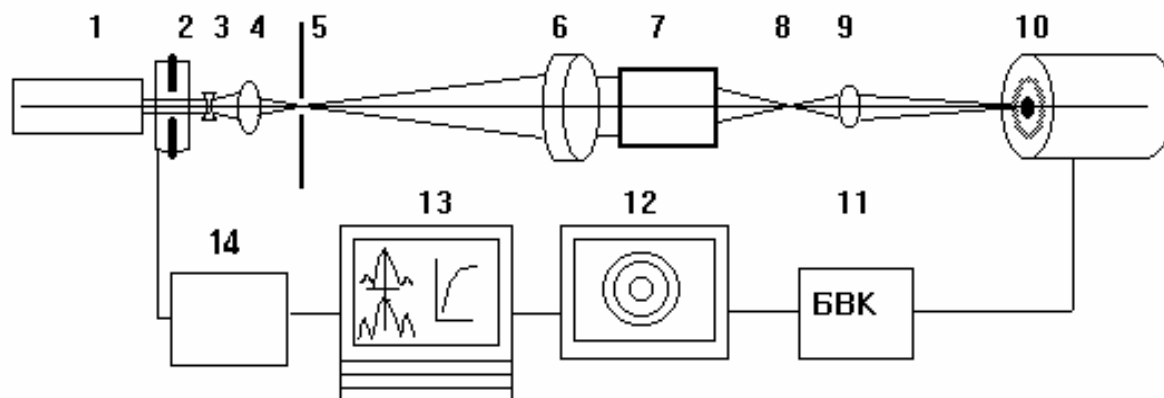


Рис. 18. Установка для измерения ФРТ объектива фото-видеокамеры в положении наименьших aberrаций методом изофотометрии с накоплением
 1 - лазер, 2 - световой затвор, 3 и 4 - объектив для фокусировки лазерного пучка, 5 - точечная диафрагма, 6 - объектив of коллиматор, 7- исследуемый объектив, 8 - изображение точечного тест - объекта (пятно рассеяния), 9 - проекционный микро-объектив, 10 - приемник изображения (телевизионная камера), 11 - электронный блок обработки видеосигнала, 12 - телевизионный монитор, 13 - компьютер, 14 - электронный блок управления регистрацией.

ФРТ характеризуется плавным распределением освещенности. В то же время, при проведении изофотометрия 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 есть геометрическое место точек, имеющих различные пространственные координаты и равное значение координаты относительной освещенности. Формирование изофот исследуемого оптического изображения осуществляется благодаря применению приемника изображения, обладающего функцией преобразования типа "импульс".

Как показывают проведенные исследования, для получения системы изофот исследуемого распределения освещенности необходимо использовать функции преобразования типа "гребенка" (по латински - СОМВ) (рис. 16). Эта функция имеет вид ряда равномерно расположенных импульсов.

Схема установки для исследования качества изображения фотообъектива методом изофотометрии с изменяющимся световым потоком показана на рис.19. Здесь же показан общий вид установки и ряд полученных изофот.

В изофотометре с изменяющимся световым потоком оперативность измерений достигнута за счет формирования всех

фотометрических сечений при одинаковых временах экспозиции, составляющих 1/50 с.

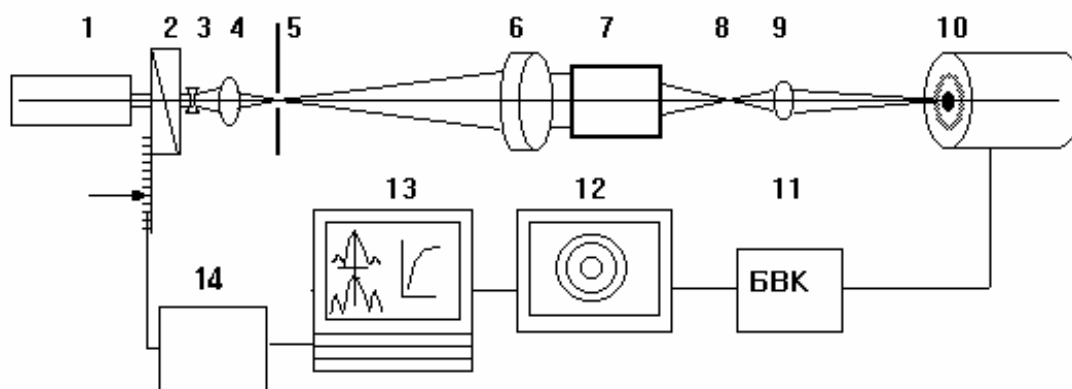
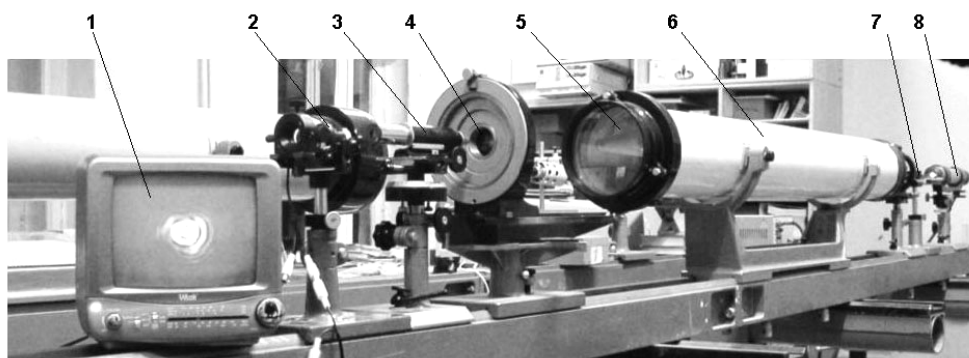


Рис. 19. Установка для изофотометрии с изменяющимся световым потоком ФРТ объектива фото-видеокамеры: схема, общий вид, серия изофот

Схема: 1 --лазер, 2 - фотометрический клин с устройством отсчета действующей оптической плотности; 3 и 4 - объектив для фокусировки лазерного пучка, 5 - точечная диафрагма, 6 - объектив коллиматора, 7- исследуемый объектив, 8 - изображение точечного тест - объекта (пятно рассеяния), 9 - проекционный микро-объектив, 10 - приемник изображения (телевизионная камера), 11 - электронный блок обработки видеосигнала, 12 - телевизионный монитор, 13 - компьютер, 14 - электронный блок управления регистрацией.

Общий вид: 1 – TV- монитор, 2 – TV- камера , 3 – микроскоп, 4 – держатель с исследуемым объективом, 5 – объектив коллиматора, 6 - коллиматор , 7 - тест - объект, 8 - осветитель

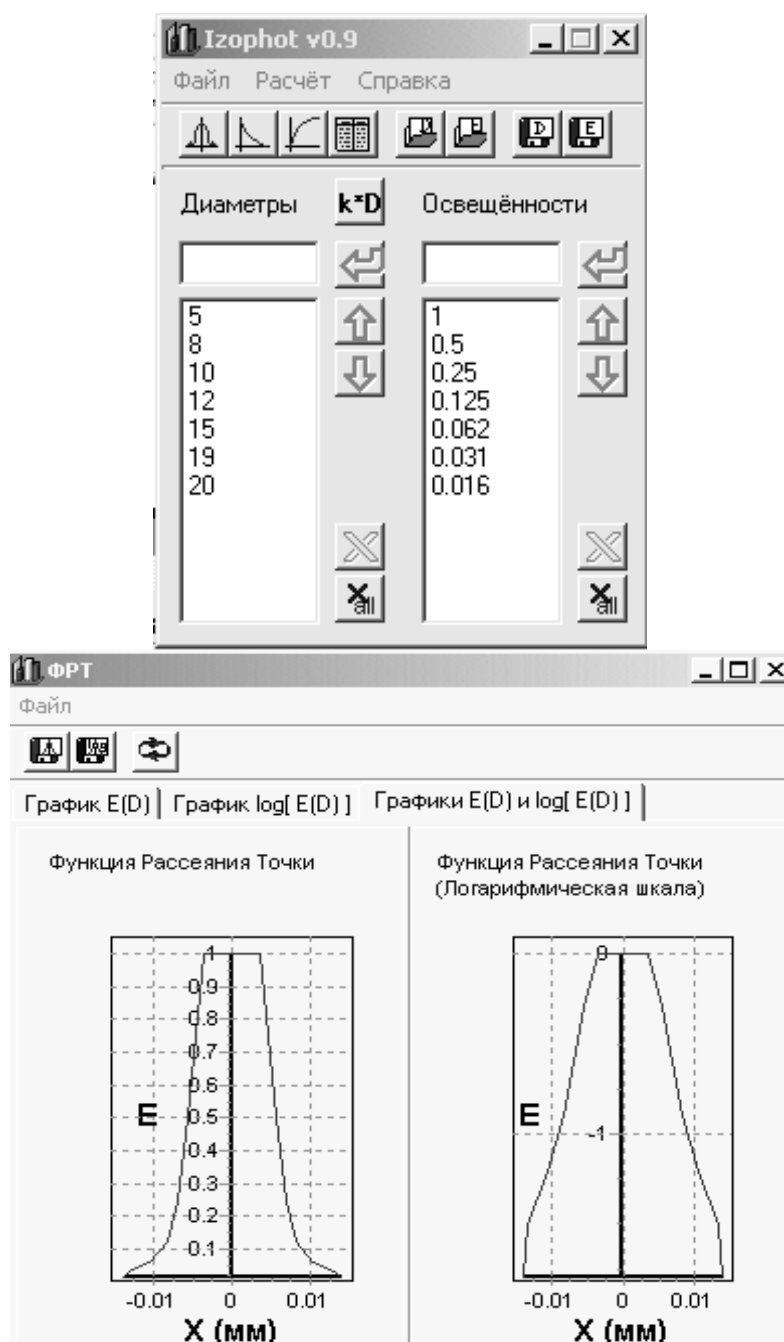


Рис.20

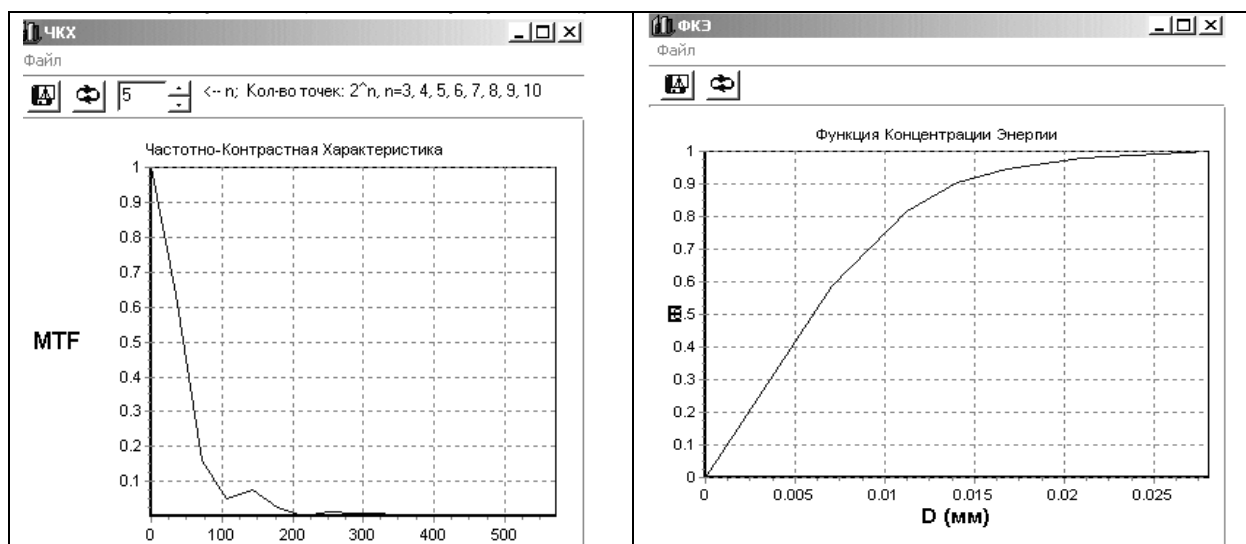


Рис.21

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. 16 это центральная изофота).

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 возможности автоматизации управления клином, формирования карты и графика ФРТ, считывания и обработки результатов.

На рис. 20 показаны результаты компьютерной обработки результатов изофотометрии ФРТ в программой, разработанной совместно со студентом А. Федоровым.

Программа дает возможность, после ручного ввода данных в процессе измерения семейства изофот, отображать ФРТ в виде графиков в логарифмическом и линейном масштабе по оси относительных освещенностей. Далее, программой выполняется расчет функции передачи модуляции и функции концентрации энергии для исследуемой оптической системы и их отображение в графической (рис.21) и табличной форме

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ПО ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ ЛИНИИ

Наряду с функцией рассеяния точки, первичным критерием качества изображения оптической системы является распределение освещенности в изображении светящейся линии или функция рассеяния линии (ФРЛ). Как было показано, на основе этой функции могут быть определены другие известные характеристики качества оптического изображения, такие, как пограничная кривая, частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), фотографическая разрешающая способность и др.

ФРЛ является одномерной функцией, которая описывает распределение относительной освещенности в двумерном изображении тест - объекта типа "светящаяся линия" (по нормали к оси направления линии).

Таким образом, ФРТ и ФРЛ являются базовыми количественными характеристиками качества изображения. Точное измерение этих характеристик при достижении широкого диапазона измерений очень важно для достоверной количественной оценки качества изображения, сформированного реальными оптическими системами.

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

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

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

- 1) сохранение точности в широком диапазоне чувствительности (10^6), что заставляет применять сложные и дорогостоящие источник питания для фотоумножителя, усилитель и регистратор, причем все эти элементы должны быстро и многократно менять свои диапазоны чувствительности при помощи переключателей;

2) ширина щели не должна превышать 0,1-0,2 диаметра дифракционного пятна, следовательно, ее ширина в обычных условиях составляет микрометры.

Следствием указанных жестких требований к сканирующей системе являются ее ограничения: требуется весьма прецизионная механика, требующая особо квалифицированного обслуживания. Малые размеры диафрагм не позволяют достичь достаточного уровня светового потока в системе, что вынуждает пользоваться малыми скоростями сканирования. В процессе сканирования требуется переключение электрооборудования, а так как после переключения режимы должны установиться, то приходится прерывать процесс сканирования. Кроме того, система в силу своей прецизионности чувствительна к вибрациям, которые всегда имеются в цеховых условиях оптико-механического производства.

Наиболее распространенным является сканирование оптического изображения тест-объекта по ряду прямолинейных строк [3], аналогичных строкам телевизионной развертки. Различия в технике фотоэлектрического сканирования во многом определяются конструктивными особенностями фотоэлектрических приемников изображения и сканирующих устройств. Это могут быть различные микрофотометры, телевизионные, матричные и лазерные сканеры.

Работа фотоэлектрического приемника излучения или совокупности таких приемников, составляющих приемник оптического изображения, характеризуется линейной зависимостью между числом действующих фотонов и числом возникающих электрических зарядов.

Полученная функция (рис. 22), связывающая фототок приемника с освещенностью, будет верно отображать искомое распределение освещенности в исследуемом оптическом изображении только в пределах диапазона освещенностей, соответствующего протяженности проекции на ось прямолинейного участка световой характеристики фотоэлектрического приемника излучения. Эта величина для реальных фотоприемников, в режиме непрерывного сканирования с достаточной скоростью, соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую 10^3 .

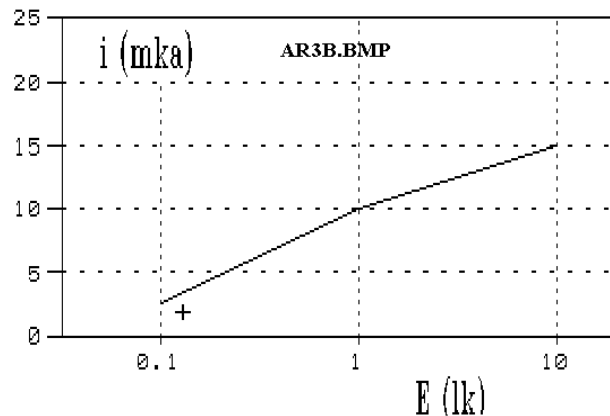


Рис.22. Плавная функция преобразования для метода фотоэлектрического сканирования (световая характеристика фотоэлектрического приемника)

Но основной недостаток метода прямого фотоэлектрического сканирования состоит в следующем. 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.22). Эта величина для реальных фотоматериалов соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую 10^2 .

Необходимо заметить, что знание ФРЛ в таком ограниченном диапазоне перепада освещенности не позволяет с необходимой точностью и достоверностью определить или рассчитать такие привычные и стандартизованные характеристики качества изображения, как ЧКХ и ФКЭ. Отсюда постоянные проблемы с точностью и воспроизводимостью такого измерения этих характеристик в практике оптического производства и исследований.

Метод изофотометрии ФРЛ

Указанные ограничения методов исследования ФРЛ, основанных на использовании рассмотренных выше, плавных функций преобразования, преодолеваются методами изофотометрии. В частности, разработан метод изофотометрии ФРЛ [4, 5, 6, 7], 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.

Интересный способ исследования ФРЛ был описан Джонсом и Вольфом [6]. Распределение освещенности поперек изображения щели получают в виде логарифмической кривой ФРЛ, фотографируя изображение щели через серый клин. Существо метода – в сле-

дующем. Оптическое изображение щели перекрывается клином, плотность в котором изменяется вдоль клина

$$D_k = KX \quad (40)$$

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

Результирующее двумерное распределение относительной освещенности характеризуется в поперечном сечении функцией рассеяния линии, а в поперечном направлении - функцией модуляции освещенности клином

$$-\lg E = KX \quad (41)$$

Изофота такого распределения дает график ФРЛ с логарифмической шкалой освещенностей.

Фотографический изофотометрический метод определения ФРЛ нашел применение при исследованиях фотографических объективов и объективов любительской киноаппаратуры. Телевизионный метод изофотометрического анализа ФРЛ позволяет визуально оценивать качество изображения по форме графика функции, непрерывно наблюдать и измерять характеристики качества изображения при втировках, фокусировках и других перестройках систем и, кроме того, расширить диапазон измеряемых освещенностей в ФРЛ до значений, достаточных для надежных оценок качества системы. Установка для испытания объективов собрана на базе оптической скамьи. Изображение освещенной щели, построенное исследуемой системой, и увеличенное микроскопом, переносится на мишень передающей телевизионной трубки, а затем по телевизионному каналу воспроизводится на телевизионном экране с максимальным контрастом. Изофота выделяется как граница черного и белого в изображении на телевизионном экране. Градуировка осей координат полученного графика ШРЛ 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 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 составе (рис. 24) подключен блок выделения контура (БВК), выделяющий изофоту изображения тест-объекта типа "линия переменной яркости", сформированного исследуемой оптической системой.

Эта изофота имеет форму графика функции рассеяния линии (ФРЛ) исследуемого объектива, 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 (ФРС).

Компьютерной обработкой данных получают весь комплекс требуемых характеристик качества изображения объектива: оптическую передаточную функцию ОПФ и модуляционную передаточную функцию ФПМ (называемую также частотно-контрастной характеристикой ЧКХ). Определяют требуемые критерии качества изображения исследуемой системы, такие как значение коэффициента передачи контраста на заданной критической частоте.

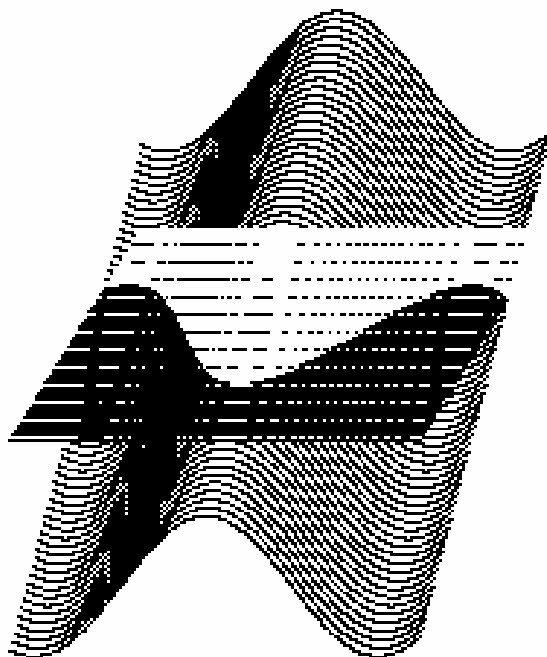


Рис. 23. Компьютерное моделирование принципа формирования изофоты как графика ФРЛ исследуемой оптической системы

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

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

где μ_{np} - частота, принятая в качестве предельной на сюжетно важном интервале;

T_μ - коэффициент передачи контраста.

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.

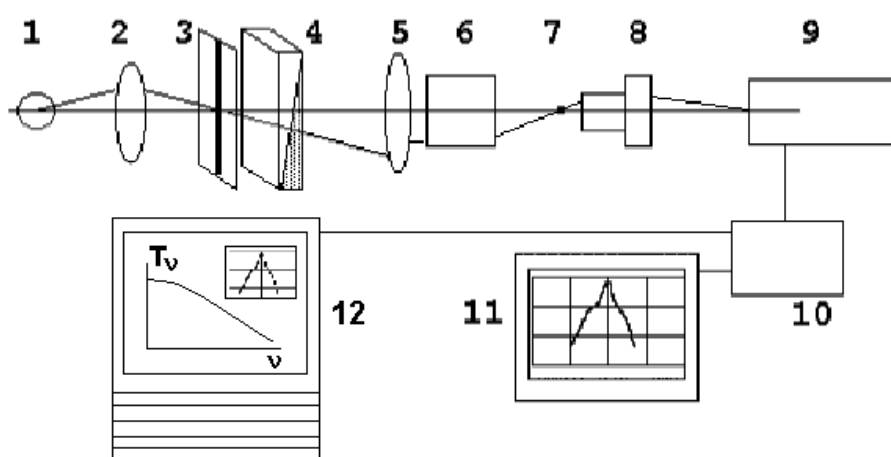
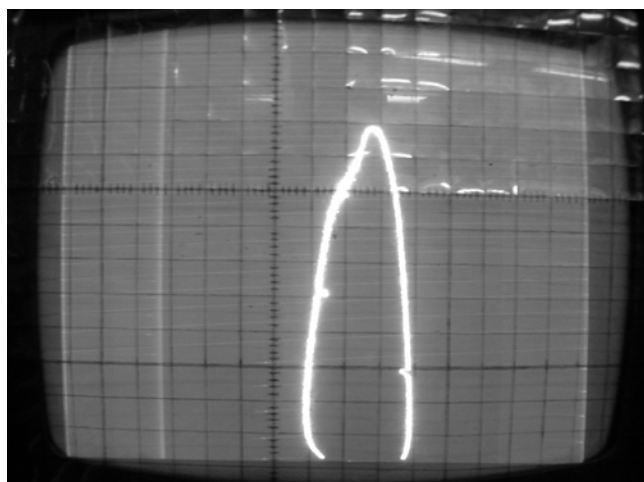


Рис.24. Схема установки для изофотометрического измерения ФРЛ объектива;
график ФРЛ на TV - экране

1 - лампа, 2 - конденсор, 3 - щелевая диафрагма, 4 - линейный фотометрический клин, 5 - объектив коллиматора, 6 - исследуемый объект, 7 - изображение тест – объекта, 8 - микрообъектив, 9 - передающая телекамера, 10 - блок выделения контура, 11 - видеоконтрольное устройство (телевизионный монитор), 12 - компьютер с видеоадаптером

Компьютеризация изофотометрии ФРЛ

Дальнейшее развитие указанного метода выполнено средствами компьютерных технологий. Таким образом, полученные результаты можно считать шагом в развитии новой ветви компьютерной оптики в рамках направления, получившего название “Современные оптические измерения”.

Автоматизация расчета и проектирования систем получила свое развитие с появлением электронно-вычислительных машин (ЭВМ) в

40-х годах нашего столетия. В наши дни применение компьютеров получает все более широкое распространение, в том числе и в условиях действующего оптического производства, несмотря на ряд нерешенных проблем и несбывшихся надежд, связанных с попытками полностью автоматизировать труд создателя оптической системы. Наряду с вопросами автоматизации проектирования, выполняются и задачи расчетной оценки качества изображения оптических систем.

При разработке оптических систем с форсированными оптическими характеристиками, качество изображения которых в основном обусловлено явлением дифракции, одним из важнейших вопросов становится оценка возможности реализации разработанной системы в условиях производства (обычно серийного). Использование компьютера в процессе проектирования дает возможность не только минимизировать расчетные аберрации, но и достоверно оценить влияние ошибок изготовления на результирующие характеристики изготовленной системы. Таким образом оценивается чувствительность проектируемой системы к ошибкам технологического процесса, т.е. технологичность оптической конструкции. Рассматривая применение компьютера в области оптического производственного контроля и измерений, необходимо указать следующие основные направления (как развивавшиеся, так и требующие своего развития).

1. На этапе проектирования оптической системы:

- оценка качества изображения системы, получаемая в соответствии с расчетом;
- определение требований к точности изготовления оптических поверхностей системы, ее волновым аберрациям и, в соответствии с этим, требований к точности оптических измерений и чувствительности контроля в процессе изготовления системы;
- расчет анаберрационных схем оптического контроля, технологических корректоров аберраций и технологических контрольных оптических деталей и систем, коллиматоров и т.д.;
- расчет оптических схем приборов контроля, требуемых для производства спроектированной системы и ее деталей в соответствии с расчетом; - расчет контрольно-юстировочных и измерительных приборов и приспособлений; - разработка алгоритмов и программ автоматизации контроля при изготовлении, сборке и юстировке.

2. На этапе изготовления оптической системы:

- автоматизация операций контроля деталей (автоматизированное рабочее место контролера); роботизация контролера,

- автоматизация расшифровки результатов контроля (в том числе - оптико-измерительных изображений) и их регистрации, в том числе
- скоростная цифровая память кадра для устранения влияния вибраций на надежность контроля;
- программно управляемая расшифровка (например, гартманогрaмм); управляемое следящее сканирование (например, при расшифровке интерференционных и изофотометрических изображений);
- математическая обработка результатов измерений, получение характеристик и критериев качества изображения и параметров изделий, указаний по продолжению операции обработки изделий;
- обработка оптико-измерительных изображений и отображение результатов обработки с целью повышения наглядности, повышения производительности, чувствительности и надежности контроля;
- генерация команд управления технологическим оборудованием в системах активного контроля ГПС;
- обработка данных и получение рекомендаций на юстировочные воздействия в операциях автоматизированной юстировки ;
- контроль и аттестация готовых оптических систем и приборов.

Согласно рассмотренным концепциям, авторами предложены алгоритмы и разработано программное обеспечение, позволяющее реализовать компьютерную интерпретацию метода изофотометрии ФРЛ на созданной установке (рис. 26).

Сформированное телевизионной камерой изофотометра изображение тест-объекта "светящаяся линия переменной яркости" вводится в компьютер при помощи телевизионного тюнера с опцией захвата кадра. Изображение, записанное в BMP-файл далее вызывается программой "LSF_MTF", которая подвергает его оконтуриванию, причем формируется график ФРЛ как функции $lg(E_{отн}) = f(y')$, после чего программа подвергает график оцифровке, определяя координаты его точек, причем формируется таблица массивов значений функции. Далее программой выполняется расчет спектра пространственных частот ФРЛ как функция передачи модуляции (МПФ или ЧКХ) исследуемой оптической системы (рис.6).

Методика компьютерной обработки данных изофотометрии ФРЛ

Сформированное на изофотометре изображение тест-объекта "светящаяся линия переменной яркости" отобразить на компьютерном дисплее при помощи компьютерного телевизионного блока. При помощи правой кнопки мыши вызвать падающее меню, в нем выбрать опцию Full Screen (полный экран). Правая кнопка - падающее меню - "copy image" (захват изображения в буфер).

При помощи правой кнопки мыши вызвать падающее меню, в нем выбрать опцию Full Screen (полный экран). Правая кнопка - падающее меню - "copy image" (захват изображения в буфер).

Свернуть все окна, с рабочего стола вызвать PAINТ, в нем, через опцию "paste" вызвать изображение тест-объекта; взять его в рамку, устраняя лишние поля и посторонние блики в изображении.

Дальнейший алгоритм: "Правка - копировать - файл - создать - вставить - файл - сохранить как – ИМЯФАЙЛА".

Так создается файл изображения для последующей обработки в программе FRL_MTF.

Выключить TV - тюнер.

Запустить программу LSF_MTF.exe. .

Далее : "Открыть - ИМЯФАЙЛА - Image - Контур - ФРЛ - МПФ(ЧКХ)".

Порядок команд программы:

Контур - изображение тест-объекта преобразуется в график ФРЛ в осях $\lg(I_{отн}) = F(y')$, где $I_{отн}$ - относительная освещенность,

y' - пространственная координата, поперечная направлению щели.

Одновременно программа подвергает этот график цифровой расшифровке (табуляции). Таблица функции $\lg(I_{отн}) = F(y')$ выводится в соседнем окне.

ФРЛ - график $\lg(I_{отн}) = F(y')$ преобразуется в график $I_{отн} = F(y')$.

Таблица новой функции $\lg(I_{отн}) = F(y')$ выводится в соседнем окне.

МПФ(ЧКХ) - Функция $\lg(I_{отн}) = F(y')$ подвергается математической обработке, в результате которой рассчитывается фнкция передачи модуляции МПФ (традиционно она называется частотно - контрастной

характеристикой ЧКХ) для исследуемой оптической системы.]

На рис. 25 показаны результаты обработки данных изофотометрии ФРЛ TV-камеры и расчета ЧКХ системы объектив - видикон.

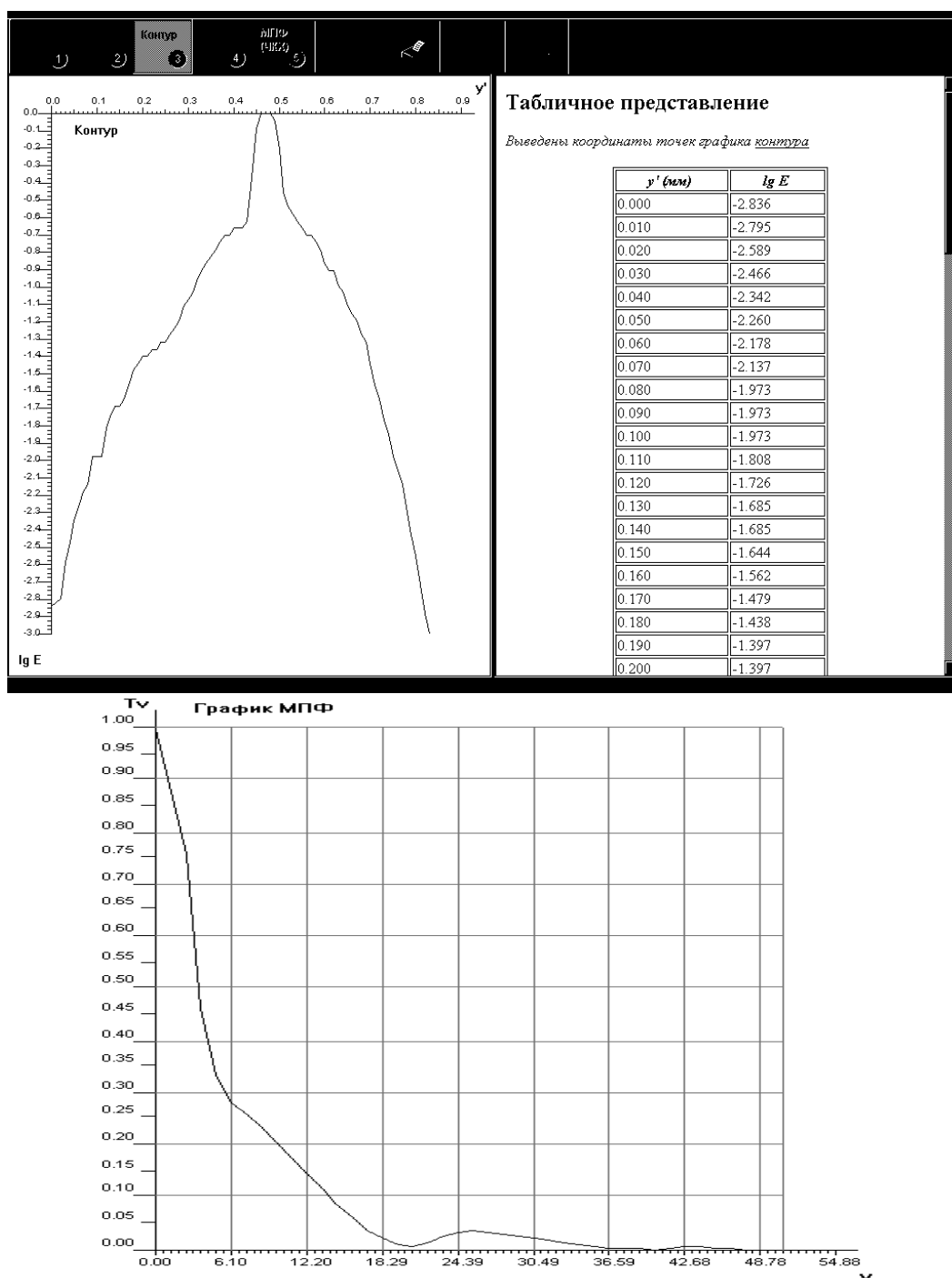


Рис. 25. Компьютерная обработка данных изофотометрии ФРЛ.

Общий вид установки для компьютерной изофотометрии ФРЛ телевизионной камеры показан на рис. 26 и 27 .



Рис. 26

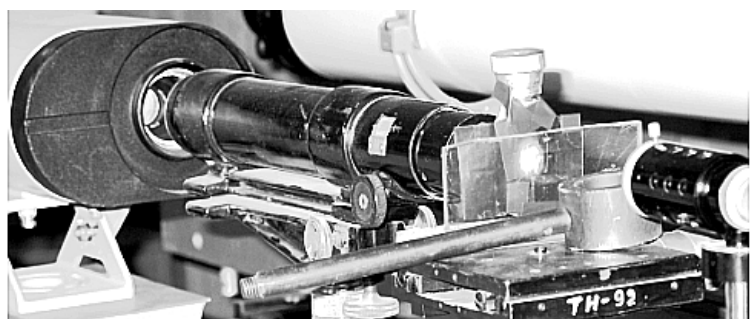


Рис. 27

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования показывают, что на текущий момент можно указать три поколения приборов и методов оптических измерений [10]. Эта ситуация наглядно иллюстрируется и подтверждается на примере методов и аппаратуры оценки качества изображения оптических систем и измерения его характеристик.

В первом поколении применяются средства классических оптических измерений. Эти средства ориентированы на глаз как приемник информации, которую содержит оптический измерительный сигнал. Здесь глаз воспринимает оптическое измерительное изображение (например, изображение обычной измерительной шкалы), опознает его детали (основные, рабочие элементы, скажем - штрихи шкалы) и извлекает информацию, передаваемую оптическим сигналом, например - оптико-измерительным изображением. Методы извлечения – это общие качественные визуальные оценки, а также количественные оценки или извлечение количественной информации, причем основной способ здесь - визуальные оптические измерительные наводки (наведения, установки).

Как видим, к методам первого поколения могут быть отнесены рассмотренные традиционные методы контроля оптических характеристик объективов [5, 6], определяющих качество изображения, во многом основанные на визуальных оценках. Так, оценка качества изображения и разрешающей силы производится на скамье с помощью наблюдения штриховой линейной миры (рис.1). Сложный, профессиональный фотообъектив проверяется заводом прежде чем будет выпущен на рынок. Чаще всего испытание состоит в фотографировании проверяемым объективом специальной крупномасштабной миры или таблицы. Критерием разрешающей силы объектива служит тот квадрат в фотографическом изображении миры, у которого, при наблюдении под микроскопом, можно свободно различить светлые и темные полосы, расположенные в разных квадратах по различным направлениям, и определить их количество. Такую интерпретацию можно рассматривать как разновидность оптической измерительной наводки.

Средства оптических измерений второго поколения составляют те оптические измерительные приборы и методы, где глаз наблюдателя заменяют приборным (обычно - электронным) приемником изображения. Такой приемник моделирует функции

глаза при использовании того же исходного оптико-измерительного изображения, как и в случае средств оптических измерений первого поколения. Механизм извлечения информации здесь воспроизводит (с большим и меньшим успехом) операции наводок и оценок, выполняемые глазом. Компьютеризация методов данного направления создает предпосылки повышения его эффективности.

К данной группе могут быть отнесены, например, электронные приборы и методы исследования изображения линейной решетки переменной частоты для измерения ЧКХ оптической системы. Для контроля необходимы сложные по конструкции электронно-оптические установки, требующие высококвалифицированного обслуживания и часто нестабильные в эксплуатации, что тормозит широкое внедрение контроля объективов по ЧКХ.

Другим примером могут служить методы фотоэлектрического сканирования или фотографической фотометрии пятна рассеяния оптической системы с целью определения ФРТ. Указанные методы, основанные на использовании плавной, монотонно возрастающей световой характеристики, имеют общие недостатки и ограничения, как средства приборного моделирования (имитации) работы зрительного анализатора:

1) ограниченный динамический диапазон при непрерывном восприятии данного объекта (обычно – около 10^2);

2) непрерывное ухудшение отношения сигнала к шуму по мере уменьшения уровня интенсивности в исследуемом изображении.

Средства оптических измерений третьего поколения не направлены на моделирование операций классических визуальных измерений. Здесь используются новые методы извлечения оптико-измерительной информации, дающие принципиально улучшенные результаты. Исходное оптико-измерительное изображение используется не в исходной его форме, а подвергается *структурной трансформации*, что позволяет повысить точность оптических измерительных наводок в десятки раз при радикальном расширении диапазона измерений и постоянном отношении сигнала к шуму. Это отношение максимально на всем измеряемом диапазоне освещенностей. Существенно улучшаются условия и создаются новые предпосылки для ввода измерительной информации в компьютер и ее всесторонней обработки. В результате, количество извлекаемой числовой информации в методах оптических измерений 3-го поколения (то есть информативность измерений, исследований и контроля) превышает все известные и традиционные методы на 2 - 3 порядка. Это преимущество дополняется

существенным увеличением объема наглядной информации, которая может быть интуитивно воспринята и использована измерителем. Как следствие, достигается высокая эффективность принципов и методов, относящихся к средствам оптических измерений 3-го поколения, доступность и экономическая целесообразность аппаратуры [6].

К этой группе можно отнести рассмотренные здесь методы и аппаратуру изофотометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Родионов С.А. Основы оптики. Конспект лекций. СПб. СПб ГИТМО (ТУ). 2000.
2. Зверев В.А. Основы геометрической оптики. СПб. СПб ГИТМО (ТУ). 2002.
3. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. Учебное пособие. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2003.
4. Вычислительная оптика. Справочник под ред. Русинова М.М., Грамматина А.П. и др. Л. Машиностроение. 1984.
5. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л. Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М. Машиностроение. 1987 г.
6. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л. Машиностроение. 1984 г.
7. Еськова Л.М., Гаврилин. Д.В. Компьютерные методы контроля оптики. Учебно-методическое пособие к лабораторному практикуму. СПб. СПб ГУ ИТМО. 2004.
8. Оптический производственный контроль. Под ред. Д.Малакары. М. Машиностроение. 1985.
9. Прикладная оптика. Части 1 и 2. Учебно-методическое пособие под. ред проф. Шехонина А.А. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2003.
10. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 3. Функциональная схема прибора оптических измерений. Типовые узлы. Оптические измерения геометрических параметров. Учебное пособие. СПб ГУ ИТМО. СПб. 2003.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ПОНЯТИЕ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	6
ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....	12
СПОСОБЫ ОЦЕНКИ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ	12
ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ	18
КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ.....	23
ЗАДАЧА ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПЯТНА РАССЕЯНИЯ.....	27
ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ	28
ИЗМЕРЕНИЕ ЧАСТОТНО-КОНТРАСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБЪЕКТИВОВ	28
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ПЯТНА РАССЕЯНИЯ	35
ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ	37
МЕТОДИКА ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ФОТОМЕТРИИ ПЯТНА РАССЕЯНИЯ....	40
ФОТОГРАФИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ.....	43
МЕТОДЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ СВЕЯЩЕЙСЯ ТОЧКИ	44
МЕТОД ИЗОФОТОМЕТРИИ.....	47
ИЗОФОТОМЕТРИЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВРЕМЕНЕМ НАКОПЛЕНИЯ	49
АППАРАТУРА ФОТОГРАФИЧЕСКОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ.....	52
ТЕЛЕВИЗИОННАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ	55
ИЗОФОТОМЕТРИЯ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ	59
ТЕЛЕВИЗИОННЫЙ ИЗОФОТОМЕТР С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ М СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ.....	61
КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ ФРТ	64
МЕТОД ИЗОФОТОМЕТРИИ ФРЛ.....	71
КОИПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ИЗОФОТОМЕТРИИ Ф Р Л.....	75
МЕТОДИКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ИЗОФОТОМЕТРИИ ФРЛ	78
ЛИТЕРАТУРА	83

Название кафедры прикладной и компьютерной оптики Санкт-Петербургского государственного института точной механики и оптики (технического университета) отражает новейшую тенденцию проникновения компьютерных технологий во все сферы науки и техники. В то же время эта кафедра является прямой наследницей старейших оптических кафедр России – кафедры теории оптических приборов, физиологической оптики, оптических приборов, лабораторных, а затем оптико-механических приборов. В разное время этими кафедрами заведовали и работали на них такие выдающиеся ученые как академик В.П. Линник, член-корреспондент Академии наук СССР профессор В.С. Игнатовский, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, профессор, доктор технических наук В.Н. Чуриловский, заслуженный деятель науки и техники РСФСР, лауреат Ленинской и четырех Государственных премий, премии Французской Академии наук, профессор, доктор технических наук М.М. Русинов, заслуженный деятель науки и техники РСФСР профессор, доктор технических наук И.И. Крыжановский, член-корреспондент Академии артиллерийских наук, профессор, доктор технических наук А.Н. Захарьевский, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Ленинской премии и премии Совета Министров СССР, профессор, доктор технических наук В.А. Зверев, лауреат Государственной премии и премии Совета Министров СССР профессор, доктор технических наук А.П. Грамматин, лауреат Государственной премии профессор, доктор технических наук П.Д. Иванов, лауреат премии Совета Министров СССР, профессор, доктор технических наук С.А. Родионов.

Таким образом кафедра прикладной и компьютерной оптики по праву может считаться ведущей оптической кафедрой России, продолжающей дело таких основоположников как В.С. Игнатовский, В.Н. Чуриловский, М.М. Русинов, В.П. Линник, А.Н. Захарьевский, и собравшей в своем составе ведущих представителей школы прикладной и вычислительной оптики: Л.Н. Андреева, А.П. Грамматина, В.А. Зверева, П.Д. Иванова, С.А. Родионова и их учеников.

В списке достижений кафедры: создание непревзойденных широкоугольных аэрофотосъемочных объективов с улучшенным

светораспределением по полю и приборов обработки аэрофотоснимков (М.М. Русинов, Н.А. Агальцова), превосходящие зарубежные аналоги гидросъемочные объективы (М.М. Русинов, П.Д. Иванов, Л.Н. Курчинская), методы и средства контроля главного зеркала телескопа БТА (В.А. Зверев, С.А. Родионов, В.В. Усоскин), металлостеклянная оптика (И.И. Крыжановский, С.М. Никитин), оптика для космического проекта “Вега” (Г.И. Цуканова), высокоскоростные кинокамеры для научных исследований (И.И. Крыжановский, В.И. Решеткин), компьютерные пакеты автоматизированного проектирования оптики (С.А. Родионов с сотрудниками). Эти достижения в свое время были отмечены двумя ленинскими премиями, пятью государственными премиями, премией Совета Министров СССР, премией французской академии наук.

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

О последнем направлении следует сказать несколько подробнее. Следует подчеркнуть тот известный факт, что вычислительная оптика не только явилась первым практическим применением для компьютеров (одним из первых применений первой в мире ЭВМ Марк-1 в 1944 году был расчет оптических систем), но и способствовала развитию многих новых методов прикладной математики (методов оптимизации, численного интегрирования, решения некорректных задач и т.д.)

В России работы в этом направлении были начаты А.П. Грамматиным (1958 г.). В ЛИТМО в 1960 году были построены одни из первых отечественных ЭВМ ЛИТМО-1 и ЛИТМО-2, предназначенные главным образом для расчета оптических систем; а соответствующий математический аппарат был разработан доцентом кафедры оптико-механических приборов В.В. Хваловским.

С 1965 г. 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 аберраций 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.

Основным и наиболее перспективным направлением развития кафедры представляется именно компьютерная оптика как основа для подготовки так называемых “компьютерных инженеров” – специалистов, профессия которых, по нашему мнению и по мнению авторитетных зарубежных экспертов, станет ведущей в наступающем веке.

Область деятельности таких специалистов – это решение сложных инженерных и научных задач (в нашем конкретном случае прикладной оптики) на основе интенсивного использования математических методов и компьютерных технологий, а также разработка такого рода технологий.

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

- фундаментальных и широких знаний в области предмета разработки и исследования (прикладной оптики, оплотехники, оптических приборов и систем);
- глубоких знаний прикладной математики, включая математическое моделирование, численные методы, методы оптимизации и т.п.;
- владения современными компьютерными технологиями, особенно применяемыми в инженерной и научной деятельности.;

Как показывает опыт, задачи прикладной оптики настолько разнообразны, сложны и комплексны, а применяемые для их решения методы, модели и средства настолько универсальны, что специалист по компьютерной оптике может с успехом практически безо всякой адаптации работать в любой области, требующей владения математическими методами и компьютерными технологиями.

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

Владимир Константинович Кирилловский

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 4.

Оценка качества оптического изображения и измерение его
характеристик

В авторской редакции и компьютерной верстке
Зав редакционно-издательским отделом СПб ГИТМО(ТУ)
Н.Ф.Гусарова
Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.
Подписано к печати 15.06.05
Отпечатано на ризографе. Тираж 300 экз. Заказ №812

Редакционно-издательский отдел
Санкт-Петербургского государственного
университета информационных технологий,
механики и оптики
197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49

