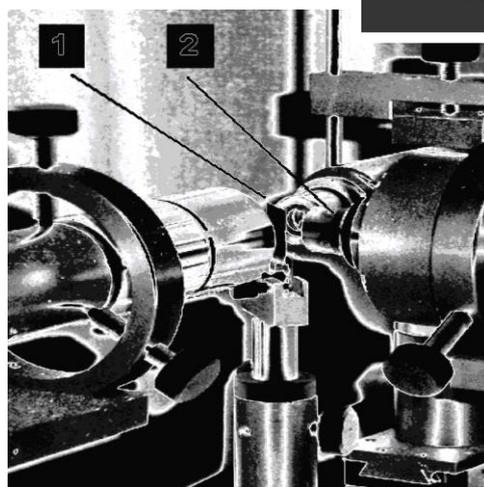
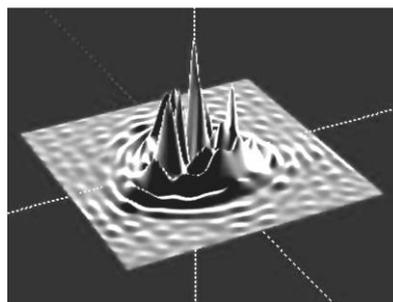


**В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина**

## **ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем**

**УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ**



Санкт-Петербург  
2019

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

В.К. Кирилловский, Т.В. Точилина

# ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

**Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем**  
УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

РЕКОМЕНДОВАНО К ИСПОЛЬЗОВАНИЮ В УНИВЕРСИТЕТЕ ИТМО  
по направлениям подготовки 12.03.02, 16.03.01 и 12.04.02 в качестве  
учебного пособия для реализации основных профессиональных  
образовательных программ высшего образования  
бакалавриата и магистратуры

 УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

Санкт-Петербург

2019

Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Часть 6. Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 96 с.

Рецензент:

Мусалимов Виктор Михайлович, доктор технических наук, профессор, профессор факультета систем управления и робототехники, Университета ИТМО.

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 в современных условиях производства и научно-технических исследований. Рассмотрены инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем, включающие анализ и синтез новых схемных решений компьютеризированной аппаратуры для измерения aberrаций и ошибок оптических систем и поверхностей, а также - аппаратуры для определения характеристик качества изображения.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 12.03.02 «Оптехника» и 16.03.01 «Техническая физика» в рамках дисциплины «Оптические измерения» и направлению подготовки магистрантов 12.04.02 «Оптехника» в рамках дисциплины «Методы исследования и контроля качества оптических систем», а также может быть полезным для инженерно-технических работников исследовательских лабораторий и для технологов оптического производства.



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

© Университет ИТМО, 2019  
© Кирилловский В.К., Точилина Т.В., 2019

## **ВВЕДЕНИЕ**

В пособии рассмотрены инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем, включающие анализ и синтез новых схемных решений компьютеризированной аппаратуры для измерения aberrаций и ошибок оптических систем и поверхностей, аппаратуры для определения характеристик качества изображения. Средства оптических измерений третьего поколения используют новые методы извлечения оптико-измерительной информации, дающие принципиально улучшенные результаты. Вновь разработанные принципы, алгоритмическое и программное обеспечение позволили реализовать мощные потенциальные возможности эффективных методов контроля, таких как сдвиговая интерферометрия и накопительная изофотометрия. Ряд методов, обладая уникальными точностными и информационными возможностями, не получил ранее широкого практического распространения вследствие сложности мануальной реализации и неразработанности методик расшифровки и интерпретации данных. Показаны новые аппаратурные и программные решения, ставшие базой для комплекса компьютеризированных методов оптического контроля и исследований, где указанные методы приобрели новые свойства, эффективность и практическую ценность. Показаны новые пути применения компьютеров в оптическом приборостроении при измерениях и контроле aberrаций и качества систем.

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлениям подготовки бакалавров 12.03.02 «ОпTOTехника» и 16.03.01 «Техническая физика» в рамках дисциплины «Оптические измерения» и для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистрантов 12.04.02 «ОпTOTехника» в рамках дисциплины «Методы исследования и контроля качества оптических систем», а также для инженерно-технических работников исследовательских лабораторий и для технологов оптического производства.

В пособии рассматриваются анализ и синтез схемных решений аппаратуры для измерения деформаций волнового фронта, связанных с aberrациями оптических систем и ошибок оптических поверхностей, а также теоретические, практические и метрологические основы классических и современных оптических измерений.

Пособие может быть использовано для освоения лекционного материала, а также при самостоятельной работе студентов для подготовки к лекционно-практическим занятиям и промежуточной аттестации.

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

Рассмотрены современные косвенные методы оценки качества изображения оптических систем путем компьютерной расшифровки интерферограмм и математической обработки интерферометрической информации с целью определения характеристик качества изображения. Даны характеристики точности интерферометрии и современные методы повышения точности.

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

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

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

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

Кроме того, следует иметь в виду, что при таких оценках не учитывается влияние на качество изображения ряда факторов, действующих при изготовлении оптической системы, 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. Таким образом, в ответственных случаях, при изготовлении и аттестации оптических систем новых классов точности, таких как космические телескопы, прецизионные исследовательские микроскопы, а также оптические системы для технологий микро- и нанолитографии, необходимо совместное применение как косвенных, так и прямых методов определения характеристик качества изображения.

## **РОЛЬ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, ИЗМЕРЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ**

Сложный процесс создания современной оптической системы может быть разделен на два этапа: проектирование и изготовление.

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

На втором этапе, при изготовлении, стремятся получить реальную систему с параметрами, насколько возможно близкими к расчетным. В серийном производстве продукции среднего класса точности отклонение реальных параметров от расчетных регламентируется системой допусков. Полученные параметры и качество изображения, даваемое изготовленной системой, оцениваются в процессе измерительного эксперимента средствами оптических измерений.

Если обобщенно рассмотреть совокупность традиционных методов контроля и исследования оптических систем и элементов, то можно убедиться в том, что эти методы в основном сводятся к регистрации структуры волнового фронта, сформированного системой (или деталью) в схеме контроля. Следующий шаг – исследование этой структуры, которая визуализируется в форме изображения того или иного вида (назовем его *оптико-измерительным изображением*), например, в виде интерференционных полос, теневой картины, совокупности пятен, составляющих диаграмму Гартмана, а также дифракционных изображений светящейся точки или линии [1, 2].

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

Обобщенная схема подразумевает точечный источник излучения, из которого сферический волновой фронт распространяется во входной зрачок изображающей оптической системы. Волновой фронт, преобразованный исследуемым объектом в измерительной схеме, вписан в выходной зрачок (рис. 1) [2].

Структура волнового фронта, характеризующая качество исследуемой системы, может быть представлена функцией пространственных координат на зрачке или на предмете.

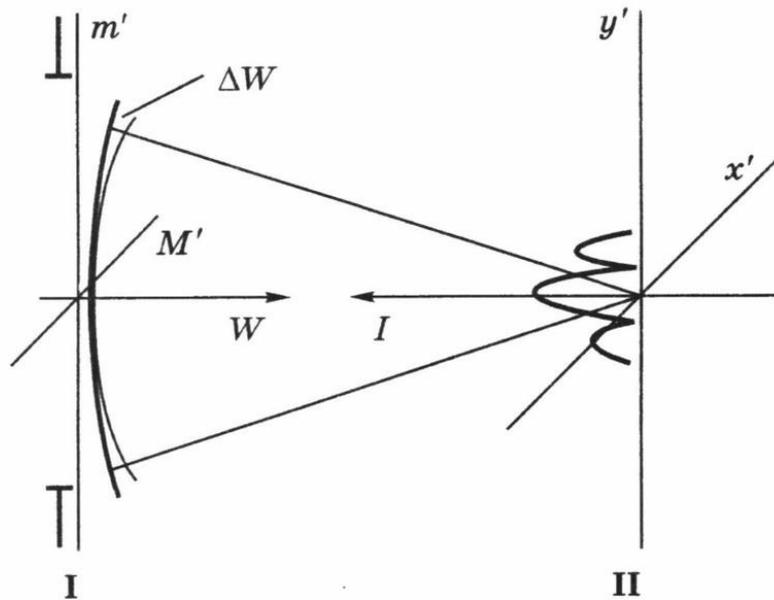


Рис. 1. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований:  $M'$  и  $m'$  – координаты на выходном исследуемом зрачке оптического элемента в схеме;  $x'$  и  $y'$  – координаты в плоскости изображения тест-объекта;  $W$  – координата формы исследуемого волнового фронта;  $I$  – относительная освещенность в изображении тест-объекта;  $\Delta W$  – координата деформаций волнового фронта

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

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

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

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

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

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

# ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ

## Анализ ФРТ

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

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

Преимущества *косвенных* методов состоят в том, что они позволяют по известной топографии отклонений фронта волны от сферической формы рассчитать большинство характеристик качества изображения (таких как модуляционная передаточная функция (МПФ) или ФКЭ). Косвенные методы дают возможность определить влияние конкретных искажений волнового фронта, вносимых системой (как следствие влияния аберраций, дифракции и ошибок изготовления), на качество изображения.

К ограничениям косвенных методов следует отнести: высокую трудоемкость расшифровки данных, сложный математический аппарат обработки данных, дорогостоящее программное обеспечение при использовании компьютера. Кроме того, при таких оценках не учитывается влияние на качество изображения ряда важных факторов, которые могут в корне изменить структуру изображения и резко ухудшить его качество по сравнению с предсказанным (смоделированным) при помощи упомянутого косвенного метода.

К таким факторам относятся:

- мелкоструктурные ошибки формы оптических поверхностей (например, возникающие при ретуши крупногабаритной оптической поверхности малым полировальником), а также их остаточная шероховатость;

- мелкоструктурные дефекты оптических сред (свилы, неоднородности, включения, мутность);
- дефекты оптических покрытий;
- дефекты склеек;
- рассеянный свет в системе;
- блики в оптической системе;
- свет, отраженный от элементов оправы оптической системы и элементов внутренней конструкции оптического прибора.

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

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

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

*Изображение* тест-объекта «светящаяся точка» (рис. 2) есть **пятно рассеяния** или **дифракционный кружок**.

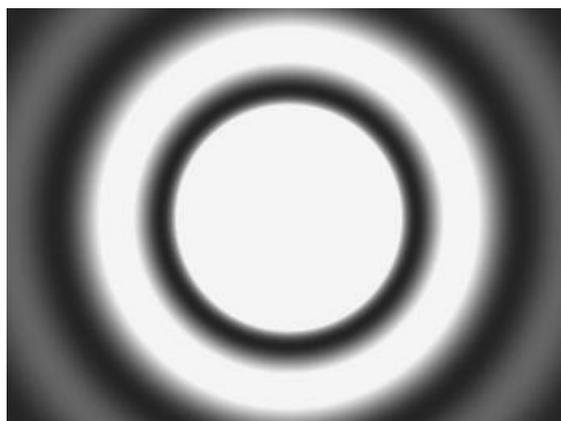


Рис. 2. Дифракционный кружок

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

Функция, описывающая распределение освещенности в изображении тест-объекта «светящаяся точка», есть *двумерная функция*, носящая название *функция рассеяния точки* или *ФРТ* (рис. 3).

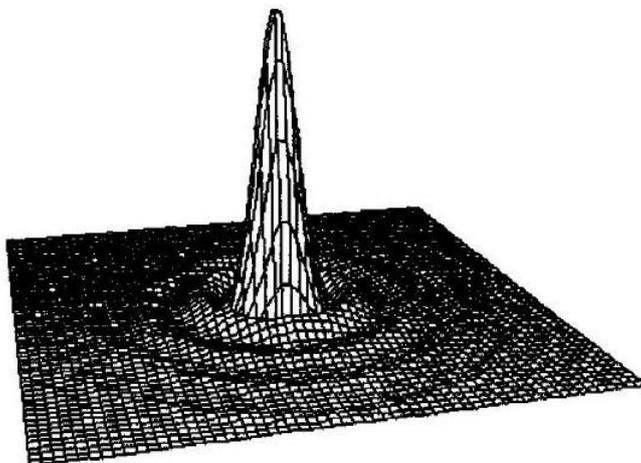


Рис. 3. ФРТ

Экспериментально найденная ФРТ, характеризующая качество системы, позволяет учитывать все особенности волновой поверхности, сформированной системой, в том числе – характер микрорельефа оптических поверхностей, дефекты оптических материалов, блики, отклонение пропускания (или отражения) на зрачке, а также сдвиги изображения, возникшие при работе прибора.

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

Тест-объект «светящаяся точка» описывает часто встречающиеся в оптической измерительной практике объекты, такие как, например, небесные объекты типа звезд или орбитальные объекты военного и невоенного назначения.

## **Интерферограмма**

Начало XX века ознаменовалось развитием методов бесконтактной интерферометрии. В 1918 году Твайман сообщил о методе интерферометрии аберраций объективов и ошибок оптических поверхностей. Суть метода состояла в сравнении плоского опорного

волнового фронта с фронтом от исследуемой системы или поверхности, форма которого приведена к плоской для случая отсутствия ошибок. Таким образом, проблема исследования оптической системы ставится как задача непосредственного выявления и измерения деформаций, претерпеваемых поверхностью волнового фронта. Интерферометрия позволяет, при точно сфокусированном интерферометре, получить интерференционную картину, подобную топографической карте профиля ошибок исследуемой волновой поверхности, где горизонталы (изолинии уровня) представлены в виде полос с интервалом, кратным длине световой волны.

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

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

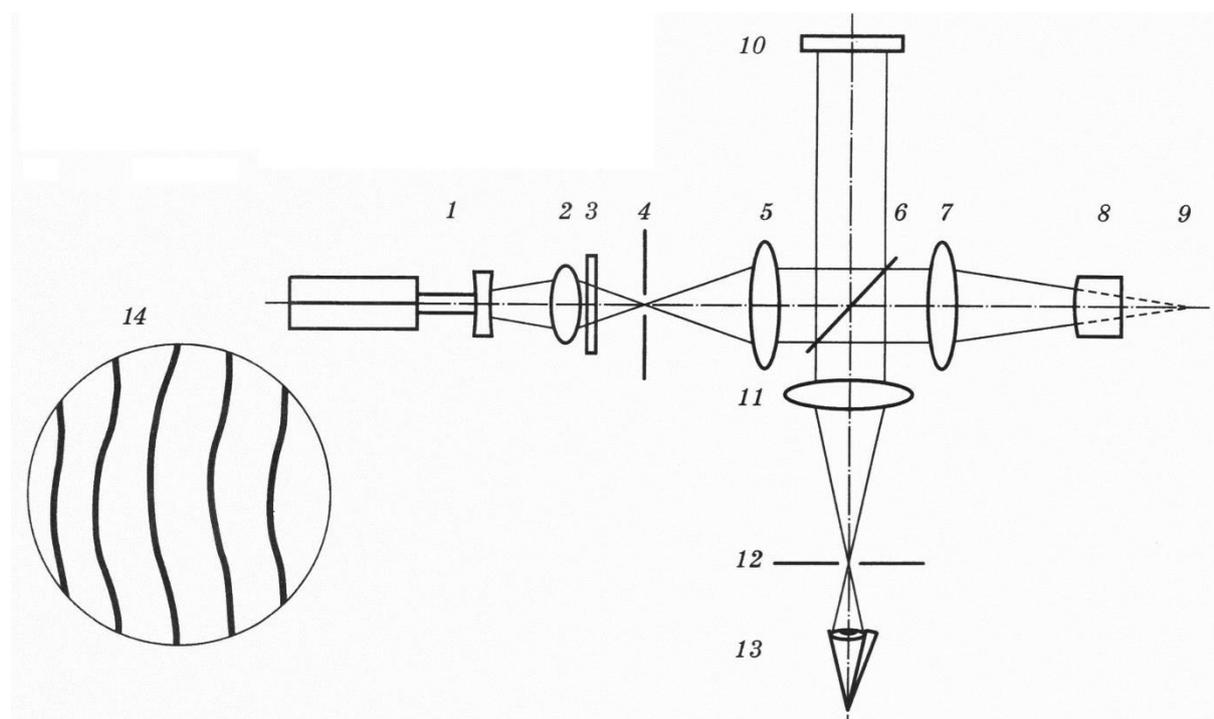


Рис. 4. Интерферометр Тваймана для исследования объектива:  
 1 – лазер; 2 и 3 – осветительная система; 4 – точечная диафрагма;  
 5 – коллиматорный объектив; 6 – светоделитель; 7 – исследуемый объектив;  
 8 – автоколлимационное сферическое зеркало; 9 – центр кривизны автоколлимационного сферического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

Твайман предложил на основании сведений о форме волнового фронта рассчитывать интенсивность светового поля, заложив таким образом основу косвенного метода экспериментального исследования качества оптической системы. Схема интерферометра Тваймана показана на рис. 4.

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

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

Такие решения экономически не оправданы при контроле систем большого диаметра или с большим фокусным расстоянием. В этих случаях полезно использовать скоростную регистрацию интерференционной картины (например, видеозапись) и последующую покадровую расшифровку. Практика показала, что такой прием позволяет устранить вредное влияние вибрации и существенно повысить точность интерферометрии. К тому же получить серьезный экономический выигрыш.

## ТРАДИЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ НАВОДКИ

Основное назначение оптического прибора – построение оптического изображения.

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

Например, в геодезических измерениях изображение шкалы нивелирной рейки совмещается в фокальной плоскости объектива нивелира со штрихом окулярной сетки. Видно, что происходит совмещение оптического измерительного изображения (изображения измерительной марки) с оптическим изображением объекта, на которое выполняется измерительная наводка. Итак, измерительное наведение (наводка) есть процесс совмещения элементов двух оптических измерительных изображений – изображения значащего элемента объекта с отсчетной точкой (или линией) в изображении измерительной марки. Физически такое совмещение осуществляется на чувствительной площадке приемника изображения (при визуальных измерительных наводках – на сетчатке глаза).

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

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

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

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

Рассмотрим идеализированный случай. Если бы процесс измерительной наводки был выполнен без погрешности, то имелись бы нулевые смещения оптического измерительного изображения объекта относительно оптического измерительного изображения марки.

Однако, в силу действия дифракционных явлений в процессе формирования любого оптического изображения, существует явление фундаментальной нерезкости оптического изображения (даже при

использовании оптической системы, в которой практически отсутствуют aberrации).

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

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

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

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

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

- того, *на которое* наводятся (изображение измеряемого объекта);
- того, *которым* наводятся (изображение измерительной марки).

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

Оптическое измерительное изображение марки строится окуляром оптического измерительного прибора.

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

- изображение края;
- изображение перекрестия окулярной сетки, наблюдаемое в окуляр.

Физически оптическое измерительное изображение объекта совмещается в процессе измерительной наводки с элементами марки, что и отображается на чувствительной площадке приемника

изображения (например, на сетчатке глаза измерителя) через оптические системы окуляра и приемника изображения.

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

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

Структура оптического изображения определяет качество оптического измерения и его важнейшие метрологические характеристики – чувствительность и точность. Структура того оптического изображения, на которое выполняются оптические измерительные наводки (обычно это изображение измеряемого объекта), в значительной степени зависит от вида объекта, дифракционных явлений в процессе образования оптического изображения и аберраций оптической системы.

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

Изображение марки для приемника (в том числе и для глаза) обычно является совершенно резким, т.е. характеризуется максимальным градиентом перепада освещенности на краю штриха. При этом пространственная протяженность пограничной зоны ниже порога разрешения приемника изображения, что и можно считать состоянием резкости.

Заметим, что с развитием современных технологий создаются возможности преобразования первичного, т.е. созданного прибором, оптического изображения, в заданном направлении с применением приемников-анализаторов изображения, в том числе и компьютерных.

В последующих частях данного пособия будет показано применение средств такого рода для повышения точности, диапазона измерений и чувствительности оптического контроля сразу в десятки раз.

Оптические системы, применяемые в оптических измерительных приборах, имеют качество изображения, обусловленное в основном дифракцией. Поэтому классическая теория чувствительности и

точности оптических измерительных наводок основана на анализе дифракционного распределения световой энергии в зоне изображения тест-объекта оптической системой, aberrациями которой можно пренебречь и которую в данном случае считают идеальной оптической системой.

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

Распределение интенсивности оптического излучения, обусловленное влиянием дифракции, характеризуется плавными функциональными зависимостями (например, такими как ФРТ, ФРЛ или структура изображения линейной решетки) [2]. Поскольку названные функции являются элементарными при описании тонкой структуры изображения (на пределе разрешения элементов структуры), то становится ясно, что при таком рассмотрении каждое оптическое изображение, построенное прибором, является фундаментально нерезким.

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

В результате чувствительность оптического измерительного прибора зависит от следующих факторов:

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

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

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

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

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

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

Однако современная теория оптических измерений дает математический аппарат, позволяющий определить (предсказать) предельно малые значения погрешностей – пороги чувствительности оптических измерительных наводок, теоретически достижимые для оптических измерительных приборов, оснащенных идеальными (безабберационными) оптическими системами. Поскольку aberrации оптических систем измерительных оптических приборов малы, то теория чувствительности оптических измерительных наводок строится на базе рассмотрения дифракционной структуры изображения, построенного такой безабберационной оптической системой [2].

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

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

Порог чувствительности изображающих приборов можно оценить по распределению интенсивности в пространстве изображений и порогу реагирования приемника на изменение этой интенсивности. Так как порог чувствительности определяется смещением предмета (и, соответственно, изображения), его удобно выразить в функции от инвариантной величины, т.е. отклонения волновой поверхности на краю зрачка (рис. 1).

## ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОПЕРЕЧНЫХ НАВОДОК

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

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

Чувствительность поперечных оптических измерительных наводок определяется не только размером дифракционного изображения в поперечном направлении, но и формой штрихов сетки прибора и объекта, которые должны совмещаться [1, 2].

Поперечная наводка предусматривает выполнение следующих операций:

- смещения изображения анализатора (например, сетки) относительно изображения элемента объекта;
- фиксации момента совмещения этих двух изображений;
- выполнения измерительного отсчета, т.е. получение численного значения, связанного с координатами положения базы анализатора в момент совмещения.

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

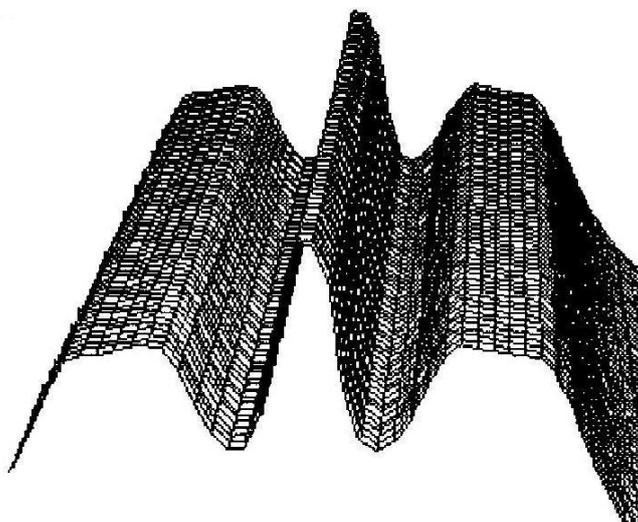


Рис. 5. Распределение освещенности в изображении темного штриха, совмещенного с биссектором (точная наводка)

Например, совмещение штриха с биссектором характеризуется формированием суммарного изображения [2] (рис. 5). Здесь момент точного совмещения характеризуется равенством интенсивности дифракционных минимумов. Ошибка совмещения (измерительной наводки) характеризуется неравенством этих интенсивностей. Это неравенство на практике зависит от порога контрастной чувствительности приемника изображения (например – глаза) для изображения данного типа. Поскольку этот порог неодинаков для характеристических изображений различных типов, то соответствующие им разные методы оптических измерительных наводок характеризуются различными порогами чувствительности (табл. 1).

Таблица 1. Практическая чувствительность поперечных наводок

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

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

$$\varphi_{\text{гл}} = (120/2)'' = 60''.$$

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

Сравнение показывает, что чувствительность поперечных наводок глаза существенно лучше его предельного разрешения  $\varphi_{\text{гл}}$ :

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

Такое повышение чувствительности при поперечных совмещениях объясняется специфическим распределением энергии в суммарной картине. При близком расположении таких объектов, как соприкасающиеся штрихи (нониус), биссектор и штрих (рис. 5) [2],

наблюдатель при поперечной наводке добивается не только определенного взаимного расположения этих объектов, но и одинакового распределения освещенности в промежутках между штрихами.

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

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

## СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ДИАПАЗОНА И ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ

Процесс развития указанных методов рассмотрим на примере экспериментальных методов оценки качества изображения оптической системы.

Традиционные методы контроля оптических характеристик объективов [1, 2], 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.

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.

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.

Производить оценку качества объектива на основе остаточных расчетных аберраций недостаточно. Оценка качества изображения и разрешающей силы производится на скамье с помощью штриховой линейной миры [2].

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.

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 испытуемого. Кроме того, визуальные методы нельзя использовать для непосредственного определения оптических характеристик объективов, применяемых для создания изображения в невидимой области спектра.

Современные средства контроля объективов развиваются в направлении создания методов и аппаратуры, дающих однозначные количественные результаты и не зависящих от индивидуальных особенностей зрения испытуемого.

До недавнего времени в области прикладной оптики наиболее широко были приняты оценки оптической системы, основанные на геометрической оптике, т.е. на измерении геометрических aberrаций системы, например, известным методом Гартмана [2].

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

Одновременно развиваются и средства контроля оптических параметров. Все более широко применяются методы, позволяющие получить полную топограмму формы волнового фронта. Персональный компьютер дает возможность путем расчета предсказать большинство параметров системы, 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. Эти средства должны позволять исследовать действительную форму волнового фронта, сформированного реальной оптической системой. Такая 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 персонального компьютера, 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 [3]. 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. 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 персональном компьютере.

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 [2]:

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 [2, 4, 5];
3. изображение светящейся точки, сформированное исследуемой системой, анализируется по распределению освещенности в нем, после чего полученный результат сопоставляется с расчетными данными [3].

Так исследуемая оптическая система анализируется на соответствие расчету.

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. В связи с этим 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 деформаций и разрывов.

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.

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.

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, 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, 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 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, цифровой фотографии, телевизионной техники, устройствам связи с персональным компьютером, 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.

## 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, 3].

В современной теории образования изображения применяется способ представления объекта, заключающийся в том, что объект представляется в виде суперпозиции синусоидальных решеток, различающихся амплитудой, пространственной частотой и фазой, т.е. расположением на плоскости. При рассмотрении особенностей изображения оптической системой синусоидального объекта обнаруживается, что его изображение также является синусоидальной решеткой. Изображение сложного объекта получается суммированием изображений синусоидальных составляющих.

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

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

где  $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) e^{-i\omega y} dy$ ;  $\omega = 2\pi\nu$  – круговая частота;  $\nu$  – пространственная частота,  $\text{мм}^{-1}$ .

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

Найдем преобразование Фурье двумерного объекта:

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

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:

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

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

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 линий (в спектральных приборах), функции рассеяния дают самое прямое и наглядное представление о качестве изображения.

Теперь рассмотрим более подробно оптическую передаточную функцию. 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 ОПФ и является преобразованием Фурье от ФРТ. Таким образом, ОПФ может быть представлена в виде:

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

Для одномерного тест-объекта (освещенной щели) имеем:

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

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:

$$d_{\text{Л}}(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} h_{\text{Л}}(y) \cos \pi \mu y dy - i \int_{-\infty}^{\infty} h_{\text{Л}}(y) \sin \pi \mu y dy = T_C(\mu) - iT_S(\mu).$$

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

$$D_{\text{Л}}(\mu) = T(\mu)e^{i\varphi(\mu)}.$$

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

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

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

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

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

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

Распределение освещенности в изображении объекта

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

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

Используем формулу для определения контраста синусоидального объекта:

$$K = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{E_{\max} + E_{\min}} = \frac{b_1}{b_0},$$

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

$$T_\mu = \frac{K_I}{K_O}.$$

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

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

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

## КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

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

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.

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

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

$$R = \frac{1,64A'}{\lambda},$$

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 (фото- и кинообъективы, телевизионные и проекционные системы), стремятся к определению числовых соотношений, связывающих результаты измерений с субъективной оценкой качества изображения. При этом критерии классифицируются в соответствии с требованиями, предъявляемыми к изображению.

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

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

Критерий вычисляется по формуле:

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

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

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

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 aberrаций, 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:

$$L_K = \frac{F_d}{F},$$

$$F_d = \int_0^{\frac{d}{2}} h(r)rdr,$$

где  $D(r)$  – ФРТ.

С другой стороны, вся энергия в пятне рассеяния:

$$F = \int_0^{\infty} h(r)rdr.$$

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

Таблица 2. Концентрация энергии для ФРТ идеальной системы

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

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Известно большое количество конструкций установок для прямого 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, согласующееся 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 [2], 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 компьютер для получения требуемых характеристик качества изображения.

### **Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния**

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

1. методы фотографической фотометрии, включая применение цифровой фототехники;
2. методы фотоэлектрического сканирования.

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

### **Фотографическая фотометрия**

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

1. двумерное воспроизведение исследуемой картины доступными и надежными средствами, стабильность изображения во времени, возможность получения неограниченного количества копий;

2. простота системы регистрации, возможность переноса процесса анализа данных с рабочего места в цехе на универсальную лабораторную аппаратуру обработки изображения и ввода данных в компьютер;
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 фото процесса в режиме двумерного преобразования информации; квантование по уровням плотности; выделение линий равной плотности; фильтрация пространственных частот при цифровой обработке фотографического изображения; устранение оптических шумов.

Необходимо указать, что большинство приводимых возможностей сегодня успешно реализуются в быстро развивающейся цифровой фотографии.

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

При этом действует соотношение:

$$H=Et,$$

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.

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

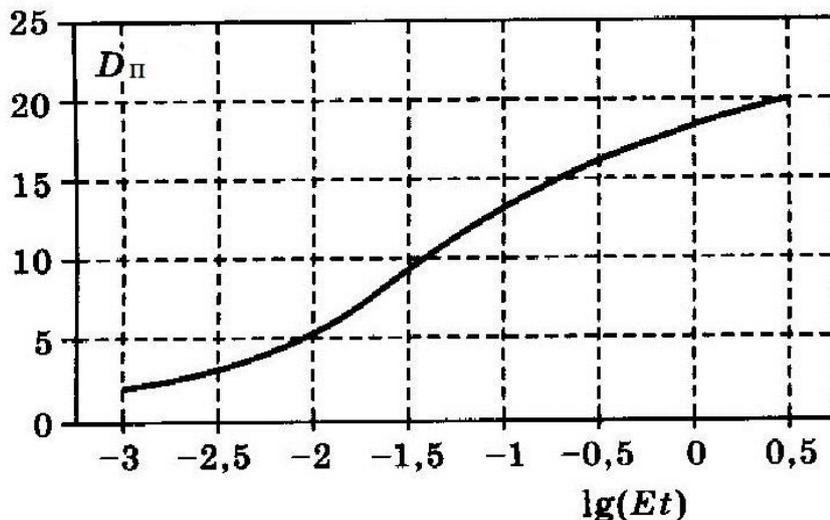


Рис. 6. Характеристическая кривая фотографического материала

Вся характеристическая кривая может быть разделена на четыре участка: 1 – начало характеристической кривой с постоянным почернением небольшой плотности – так называемая вуаль, которая появляется после проявления на участках фотоматериала, не подвергшихся действию света; 2 – область недодержек, которая характеризуется нелинейной зависимостью плотности от экспозиции; 3 – рабочая часть кривой, прямолинейный участок, который характеризуется зависимостью

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

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

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

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

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

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

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.

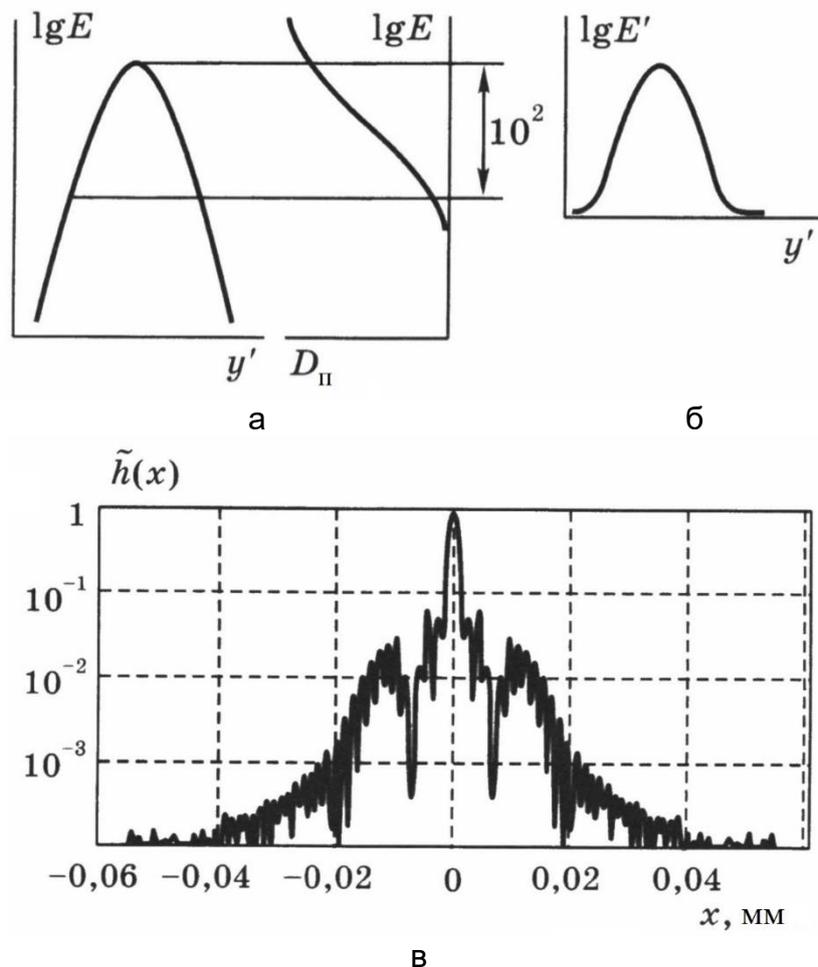


Рис. 7. Схема метода фотографической фотометрии пятна рассеяния для определения ФРТ: ограничение регистрируемого диапазона интенсивностей пятна рассеяния протяженностью рабочего участка световой характеристики приемника изображения (а); результат регистрации ФРТ в условиях ограниченного динамического приемника изображения (б); ФРТ фотообъектива «Гелиос-44» в логарифмическом масштабе (в)

Спроецируем линейный участок на ось  $\lg E$  графика распределения освещенности. Как видно из рис. 7, а, 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). Таким образом, требуются 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. Необходимо отметить, что современные средства компьютерных технологий позволяют использовать в роли микрофотометра сканер с выводом сигнала на компьютер и считывания значений пиксельной яркости, связанной с оптической плотностью, например, в программе Adobe Photoshop.

Сигнал с микрофотометра записывается 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  $D_{\Pi}=f(\lg E)$ .

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. 7, а, б). 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  $10^3-10^5$ .

Практика исследования показывает, что диапазон регистрации освещенности в пятне рассеяния сильно влияет на точность определения характеристик изображений, даваемых оптическими системами высокого качества. На рис. 8 показаны кривые ЧКХ фотообъектива, вычисленные по ФРТ, определенной для различных диапазонов освещенности.

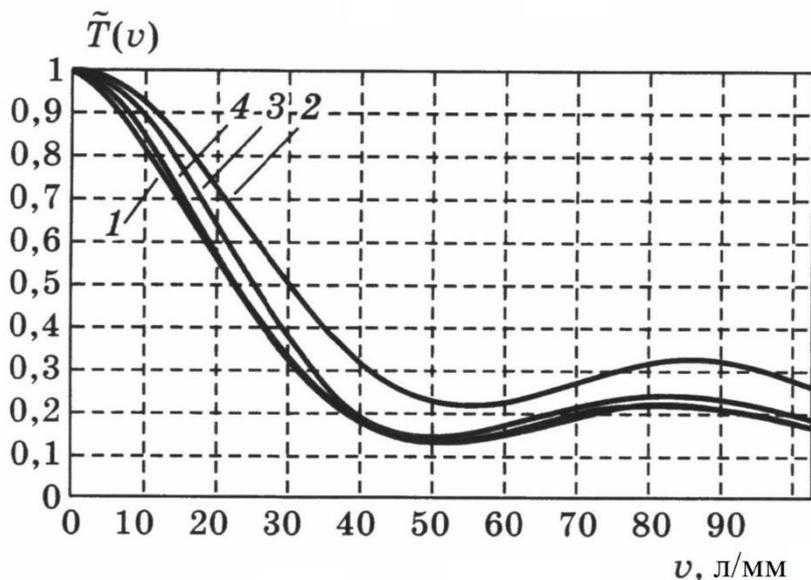


Рис. 8. ЧКХ, вычисленные по ФРТ при различном диапазоне освещенностей (1 – из оптического расчета; 2 – 2-го порядка; 3 – 3-го порядка; 4 – 4-го порядка)

На рисунках видно, что чем шире диапазон освещенности в ФРТ, тем меньше отклонение кривой ЧКХ от полной расчетной формы. При диапазоне 2-го порядка ошибка больше 50% на частоте 30 л/мм, она снижается до 10% при диапазоне 3-го порядка, и почти совпадает с полной расчетной кривой ЧКХ, если диапазон освещенности выше 4-го порядка.

Таким образом, для определения по ФРТ характера качества оптических систем на соответствие требованиям, предъявляемым к изображению, нужно измерить ФРТ в диапазоне освещенности свыше 4-го порядка.

Попытки расширения указанного диапазона фотографическими средствами путем снижения величины  $\gamma$ , 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.

## МЕТОДЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ СВЕЯЩЕЙСЯ 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 [3, 6, 7] осуществляются традиционно 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 прямолинейных строк. Выводя на осциллограф сигнал строки, наблюдают график изменения напряжения видеосигнала по этому сечению, которое в определенных пределах, зависящих от формы световой характеристики фотоприемника, 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.

В то же время 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.

## ВИДЕОМЕТОД

### Классический ПЗС-формирователь изображения

В последние годы все более широкое распространение получают развертывающие приемники оптического излучения на основе приборов с зарядовой связью (ПЗС). Двумерную ПЗС можно представить в виде матрицы потенциальных ям, расположенных в столбцах. Стоп-канал обеспечивает границы столбца и предотвращает боковую миграцию зарядов. Вдоль столбца заряды удерживаются в индивидуальных ямах потенциалами, которые приложены к затворам. Таким образом, можно создать двумерную матрицу независимых потенциальных ям. Эти ямы называются ячейками (рис. 9). Каждая из них способна хранить фотогенерированный электронный заряд.

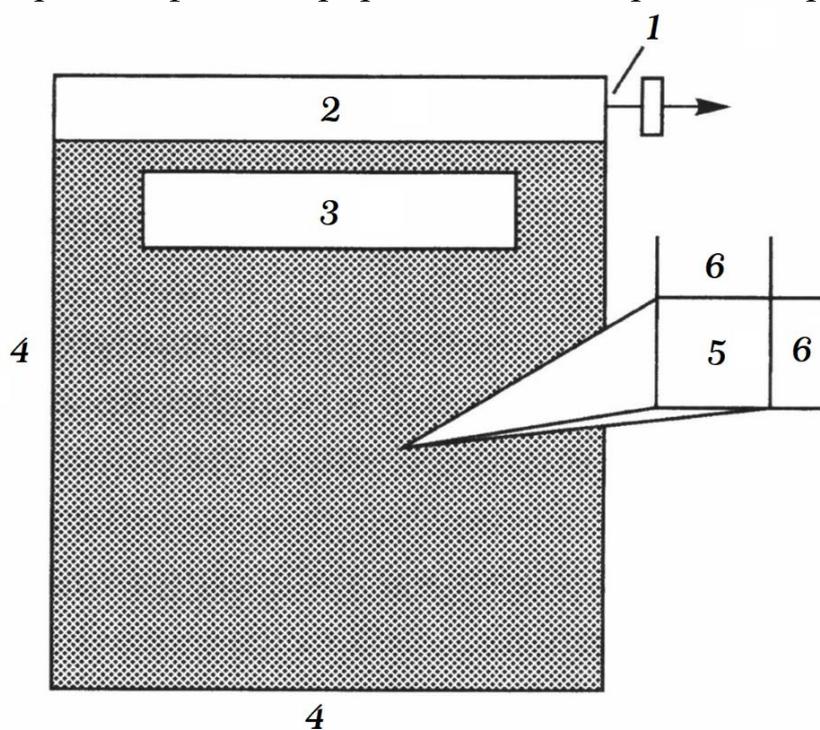


Рис. 9. Типичный матричный ПЗС-фотоприемник для научных исследований: 1 – выходной усилитель; 2 – последовательный регистр; 3 – параллельный регистр (262144 пиксела); 4 – 52 пикселей (10,25 мм); 5 – один пиксел; 6 – 20 мкм

Двумерная матрица ячеек называется параллельным регистром. Изображение, которое фокусируется на параллельном регистре, формирует зарядовую картину, которая пропорциональна средней освещенности в каждой ячейке. ПЗС-матрица может управляться так, чтобы накапливать фотогенерированные заряды в течение определенного периода времени. Общий заряд, накопленный в ячейке,

соответствует произведению фотогенерированных зарядов на время экспонирования.

$$Q_c \div H_0 = \int_0^{T_H} E(t) dt,$$

где  $H_0$  – экспозиция оптического излучения, лк·с;  $T_H$  – время экспонирования, с.

Заряды  $Q_c$  затем преобразуются в напряжение выходного сигнала. Аналоговый процессор затем усиливает этот сигнал, оцифровывает и передает в компьютер для дальнейшей обработки и отображения.

Цифровое значение сигнала названо уровнем серого  $D$ .

$$D \div Q_c = \int_0^{T_H} E(t) dt.$$

Очевидно, что при постоянной во времени освещенности  $E(t) = E$ , уровень серого, соответствующий полезному сигналу, пропорционален времени накопления и уровню освещенности:  $D \div ET_H$ .

Однако указанная линейная зависимость остается справедливой, пока ПЗС не достигнет уровня накопления, близкого к режиму насыщения  $Q_c \leq 0,7 \div 0,8 Q_{\text{нас}}$  (рис. 10).

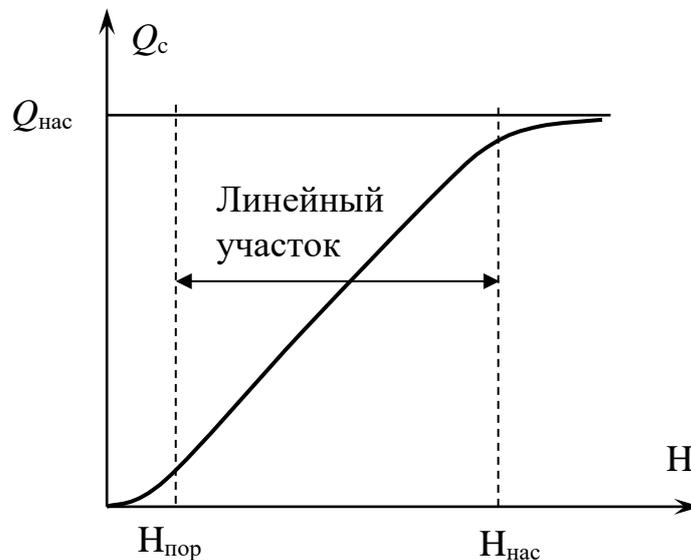


Рис. 10. Характеристика накопления ПЗС-фотоприемника

За пределами рабочего линейного участка световой характеристики уровень серого изменяется непропорционально уровню освещенности, причем отклонение от пропорциональности изменяется по нелинейному закону. Исходя из этого, фотометрическая структура пятна, которую дает ПЗС-камера, искажается очень сильно и отличается от реальной ФРТ за пределами линейного участка световой характеристики. За пределами рабочего участка световой

характеристики приемника (динамический диапазон которого обычно не превышает двух порядков) интенсивность изображения не регистрируется, и информация о структуре ФРТ оказывается потерянной.

### Методика видеофотометрии пятна рассеяния

Чтобы использовать ПЗС в качестве средства для измерения фотометрической структуры оптического изображения, необходимо установить и поддерживать соответствие между освещенностями в оптическом изображении и уровнями серого в фотографическом изображении, выражаемое характеристической кривой. Для этого на ПЗС-матрице (CCD) должен быть зарегистрирован фотометрический клин с известным законом изменения плотности. Анализ полученного изображения дает соотношение между освещенностями и уровнями серого (рис. 11).

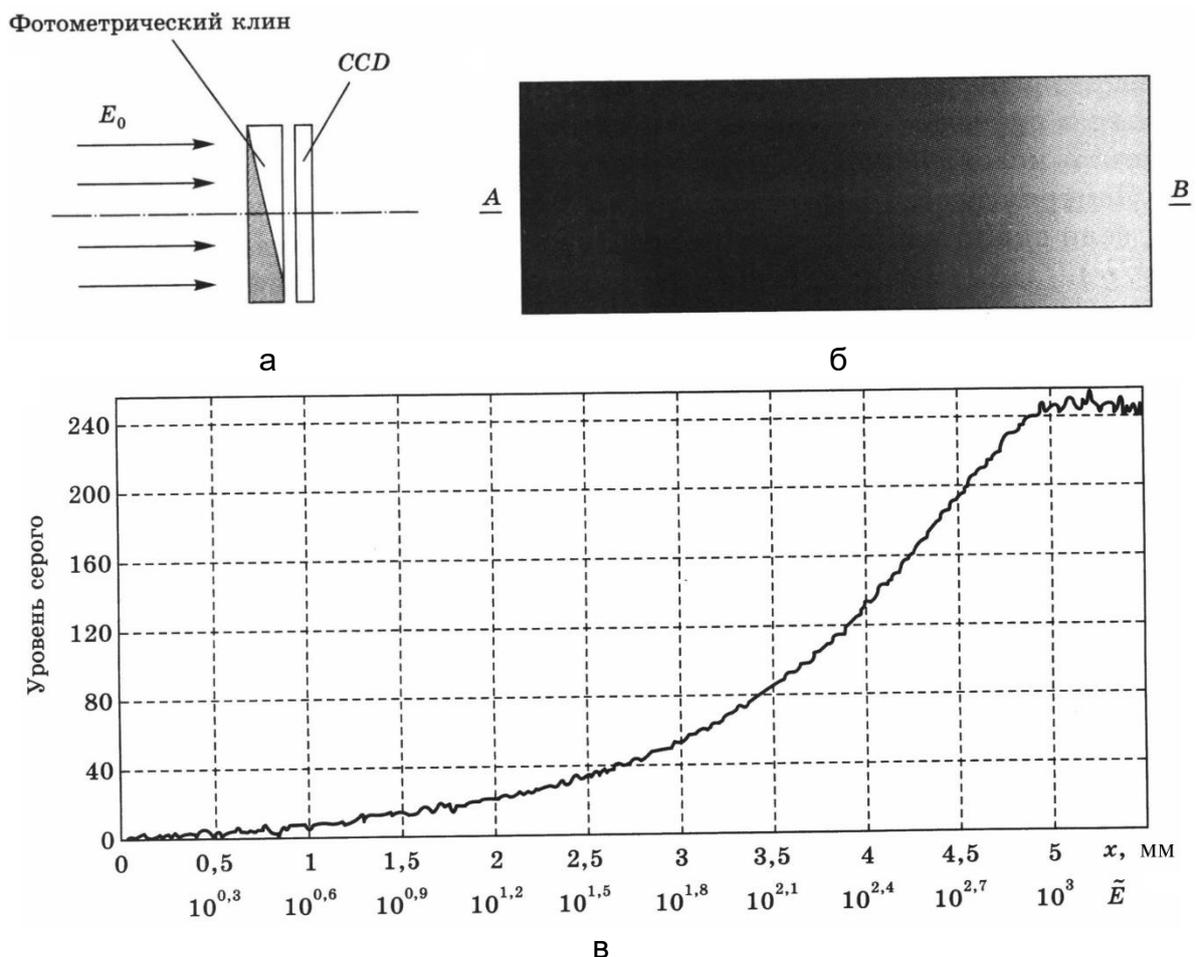


Рис. 11. Исследование световой характеристики матрицы: схема регистрации фотометрического клина (а); полученное изображение (б); фотометрическая структура в сечении  $AB$  и соответствие освещенности, модулируемой клином (в)

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

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

Спроецируем линейный участок на ось  $\lg E$  графика распределения освещенности. Как видно из рис. 12, диапазон пропорционального воспроизведения не позволяет произвести регистрацию распределения освещенности в идеальном дифракционном кружке.

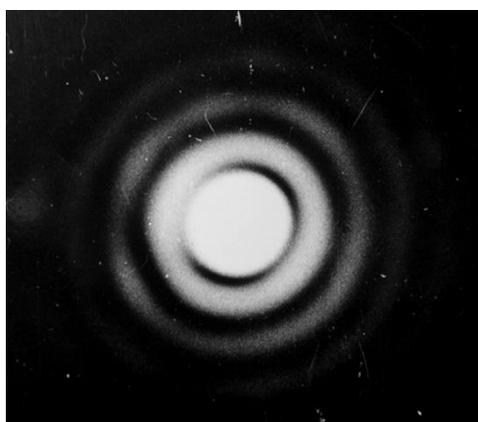


Рис. 12. Дифракционный кружок, близкий к идеальному

В этот диапазон  $\Delta \lg E$ , называемый фотографической шириной ПЗС (или 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 насыщения – рис. 13, в). Таким образом, требуются не менее двух снимков для того, чтобы воспроизвести распределение освещенности идеальной дифракционной точки на фотоматериале.

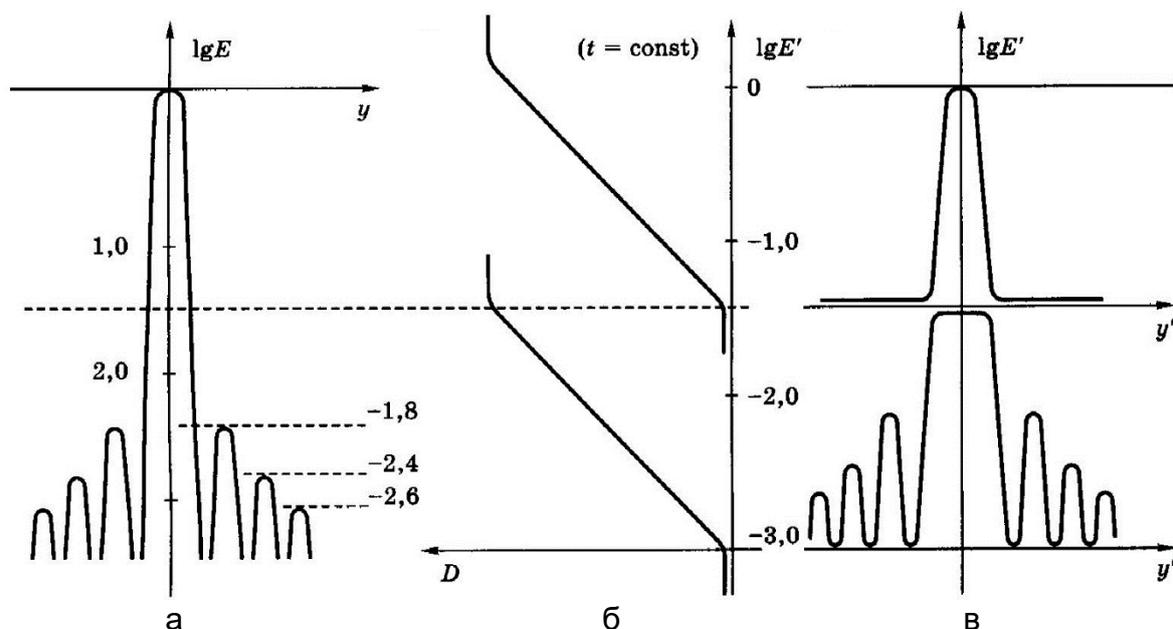


Рис. 13. Схема фотографической фотометрии дифракционного кружка

Для восстановления по фотографическим изображениям функции распределения освещенности в оптическом изображении, прежде всего, измеряют уровень серого. Далее, исходя из характеристической кривой, по значениям уровня серого определяют уровни освещенности, после чего график  $D(x, y)$  преобразуют в искомую функцию рассеяния точки.

Для сокращения этих преобразований и выполнения их в один этап полезно характеристическую кривую ПЗС в ее рабочем варианте строить сразу в осях  $D = f(E)$ . После преобразования результатов уровня серого 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  $D = f(E)$ .

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

Полученная функция будет верно отображать искомое распределение освещенности в исследуемом оптическом изображении только в пределах диапазона освещенностей, соответствующего протяженности проекции на ось прямолинейного участка характеристической кривой (рис. 13). Эта величина для реальных ПЗС соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую  $10^2$ .

В то же время, как показывают исследования (рис. 8), 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, 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.

## 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 телескопа БТА и ряда других крупных астрономических систем [3, 8]. Эти методы нашли применение для контроля (по функции концентрации энергии в пятне рассеяния) однородности оптических материалов, проведения контроля оптики прецизионных микроскопов, оптических систем для фокусировки лазерных пучков, объективов для передающей телевизионной аппаратуры, объективов для микрофотографии и других прецизионных оптических систем.

Изобразим в логарифмическом масштабе распределение относительной освещенности, полученное от объекта. Наложим на изображенную совокупность распределений шкалу равномерно и достаточно часто расположенных фотометрических сечений (рис. 14). 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  $D_{\Pi}=f(\lg E)$  при  $H=Et=\text{const}$ , где  $t$  – время.

В этих координатных осях каждому времени экспозиции соответствует своя высококонтрастная 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 сечений, расположенных равномерно независимо от общего (среднего) уровня освещенности, с

одинаковой степенью подробности передачи фотометрической структуры.

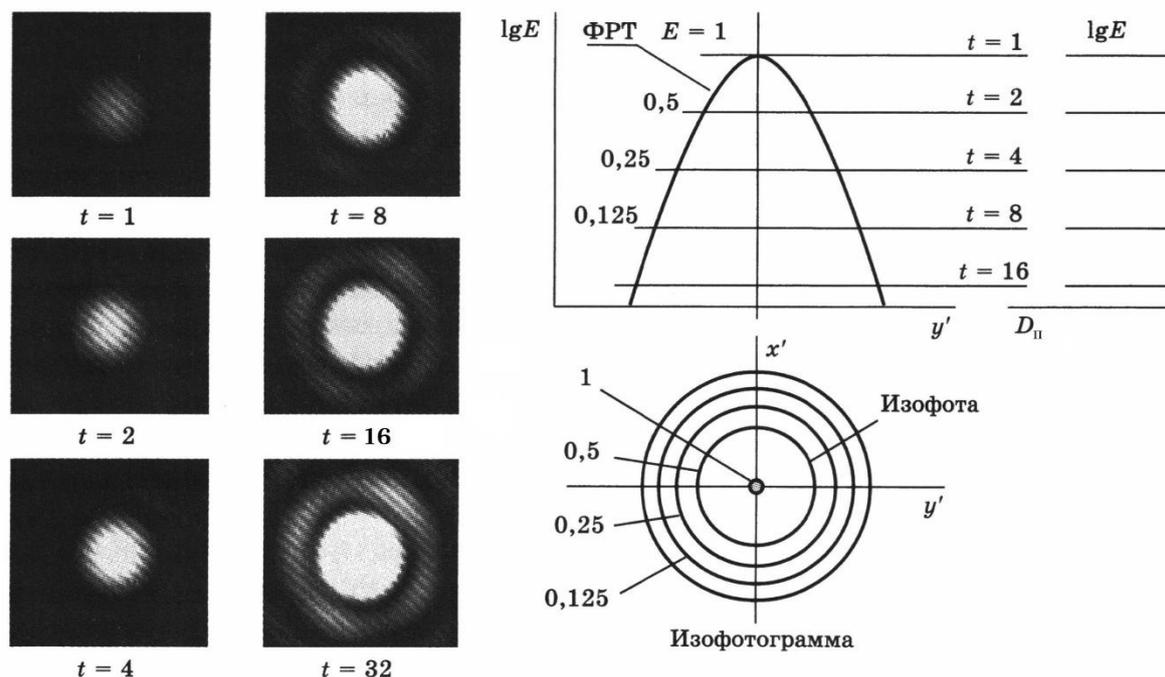


Рис. 14. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления и вид изофотogramмы

### Изофотометрия с изменяющимся временем накопления

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 (рис. 14).

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».

Как показывают проведенные исследования, для получения системы изофот (изофотограммы) исследуемого распределения освещенности необходимо использовать ФП типа «гребенка» (по-латински – СОМВ) (рис. 14). 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.

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

$$E_1=H/t_1; E_2=H/t_2 \dots E_n=H/t_n.$$

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

$$E_{\text{отн}}=1/t_{\text{отн}};$$

или в логарифмической форме

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

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

Последние две формулы являются основными выражениями структурометрического метода изофотометрической 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  $\lg E$ .

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

$$t_i = 2^i,$$

где  $t$  – относительная продолжительность экспозиции.

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).

Таким образом получают графическое выражение исследуемой ФРТ, градуированное в точных значениях  $E_{отн}$ .

ФРТ, полученная в численных значениях, служит для расчета концентраций энергии в изображении точки, ЧКХ системы и других требуемых характеристик, и 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 в традиционной технике реализации следует отнести необходимость получения серии кадров с нарастающим временем экспозиции; это требование приводит к снижению оперативности исследований.

## КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ С НАКОПЛЕНИЕМ

Средства оптических измерений **третьего поколения** не направлены на моделирование операций классических визуальных измерений. Измерительное изображение подвергается здесь *структурной трансформации*, что позволяет повысить точность оптических измерительных наводок в десятки раз при радикальном расширении диапазона измерений и существенном улучшении отношения сигнала к шуму. Создаются новые предпосылки для ввода измерительной информации в компьютер и ее всесторонней обработки. В результате информативность измерений и исследований превышает все известные и традиционные методы на 2–3 порядка. Указанные преимущества в равной мере касаются и исследования невидимых для глаза зон в спектре электромагнитного излучения. В световом диапазоне эти преимущества дополняются существенным увеличением объема наглядной информации, которая может быть интуитивно воспринята и использована измерителем.

Задача изучения характеристик качества изображения, включая ФРТ и ЧКХ, связана с необходимостью измерения структуры распределения интенсивности в изображении в диапазоне перепада интенсивности на величину свыше  $10^4$ .

Аналогичные требования к исследованию структуры пучков и изображений различного рода и назначения предъявляются в различных областях прикладной оптики и фотоники, таких как космическая оптика, оптика современных микроскопов, оптические измерения и исследования, лазерные технологии и исследование структуры лазерных пучков, технологии микро- и наноэлектроники.

### Телевизионная изофотометрия ФРТ

Схема установки для контроля ФРТ фотовидеообъектива в положении наименьших aberrаций показана на рис. 15.

ФРТ характеризуется плавным распределением освещенности. В то же время при проведении изофотометрии для 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».

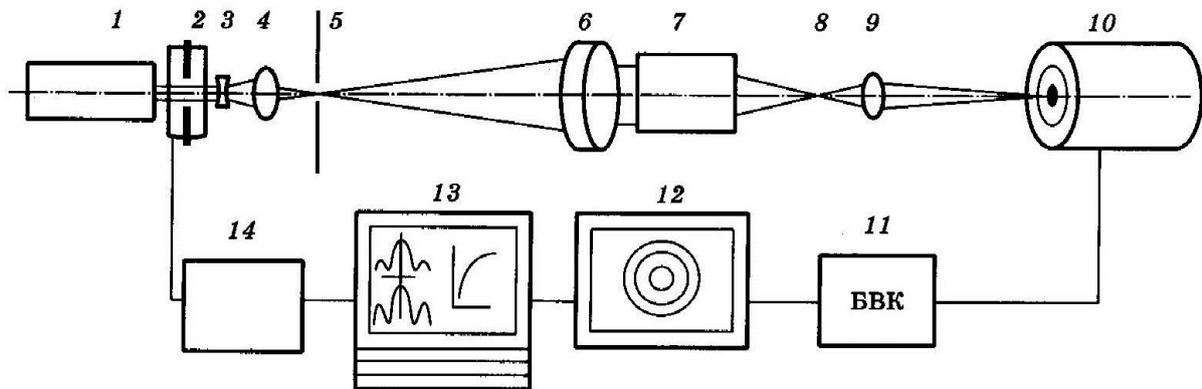


Рис. 15. Установка для измерения ФРТ объектива фотовидеокамеры в положении наименьших aberrаций методом изофотометрии с накоплением: 1 – лазер; 2 – световой затвор; 3, 4 – объектив для фокусировки лазерного пучка; 5 – точечная диафрагма; 6 – объектив коллиматора; 7 – исследуемый объектив; 8 – изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния); 9 – проекционный микрообъектив; 10 – приемник изображения (телевизионная камера); 11 – электронный блок обработки видеосигнала; 12 – телевизионный монитор; 13 – компьютер; 14 – электронный блок управления регистрацией

Применение компьютера создает возможности обработки результатов изофотометрии ФРТ в программе.

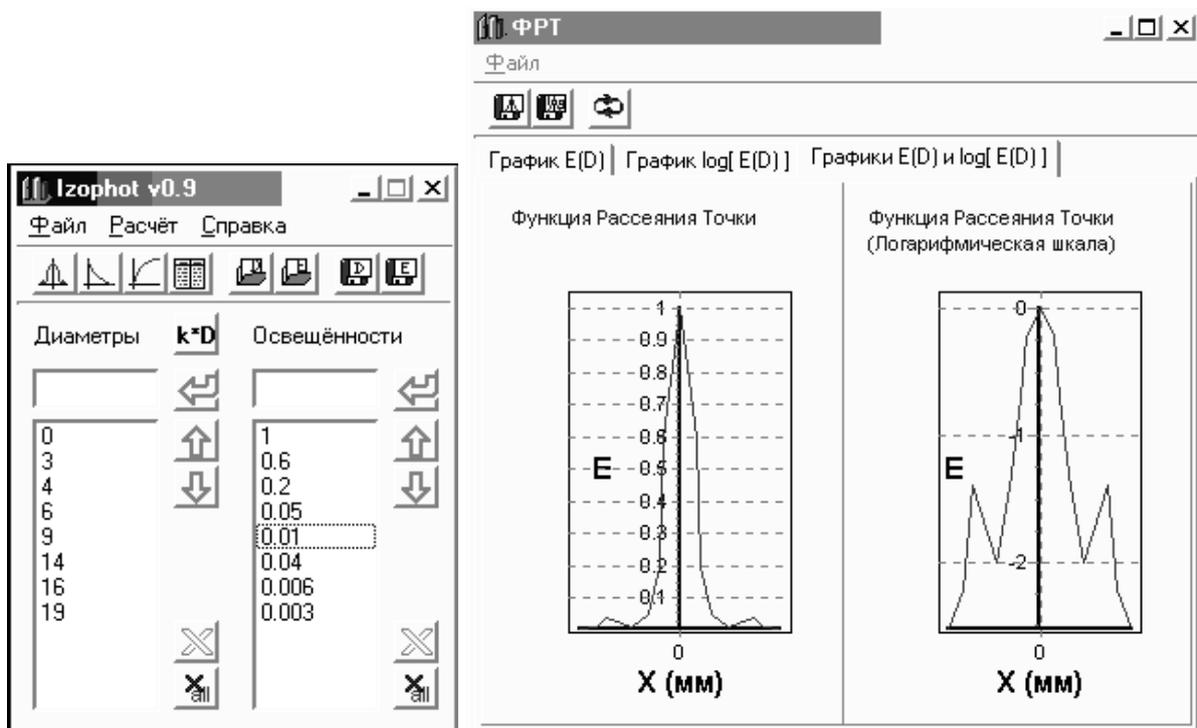


Рис. 16. Применение компьютера создает возможность обработки результатов изофотометрии ФРТ

Программа позволяет, выполнив ввод данных в процессе измерения семейства изофот, визуализировать ФРТ в виде карты (изофотограммы), а также в виде графиков в логарифмическом и линейном масштабе по оси относительных освещенностей.

На рис. 16 и 17 показаны результаты компьютерной обработки результатов изофотометрии ФРТ измерения семейства изофот, отображать ФРТ в виде графиков в логарифмическом и линейном масштабе по оси относительных освещенностей.

Далее программой выполняется расчет ФПМ для исследуемой оптической системы, функции концентрации энергии и их отображение в табличной и графической форме.

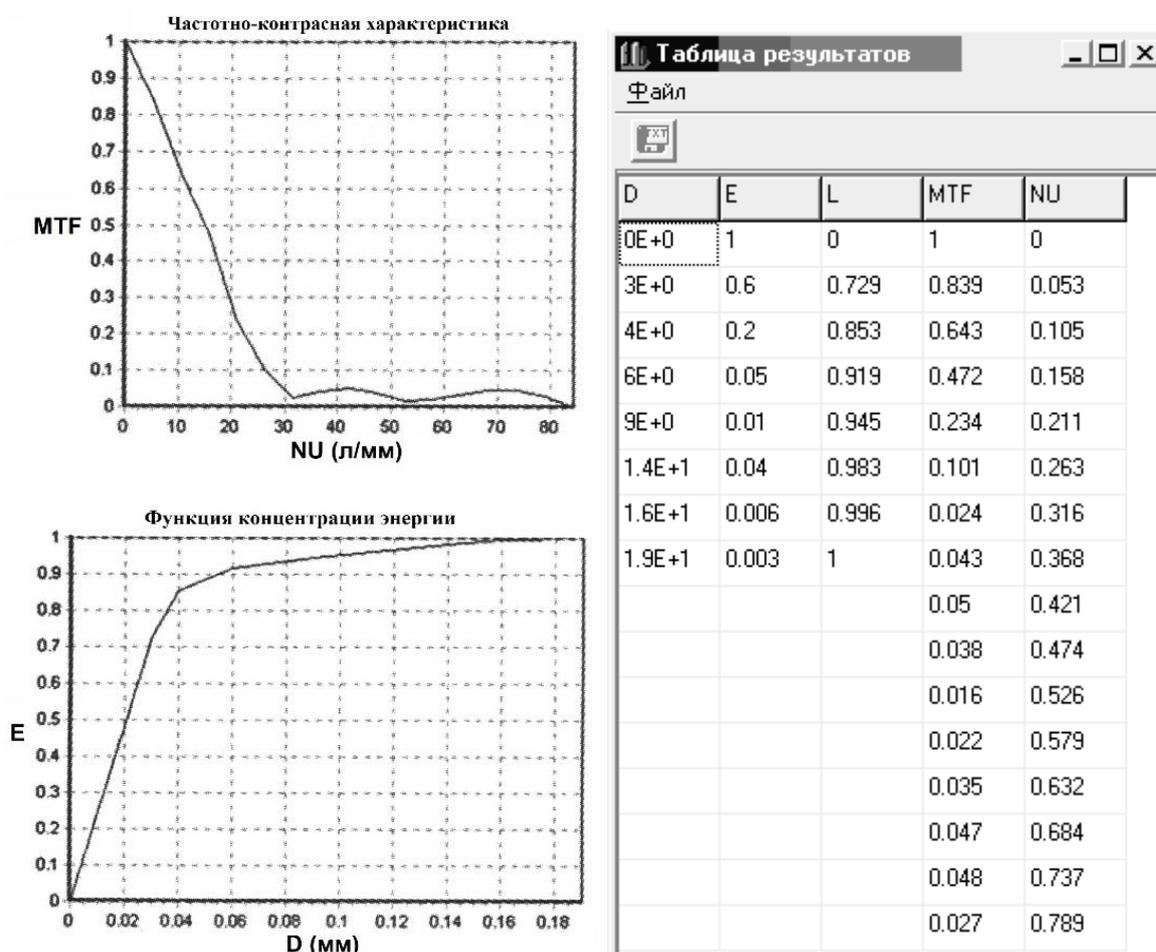


Рис. 17. Отображение в табличной и графической форме результатов расчета ЧКХ и ФКЭ

## Компьютерный метод измерения ФРТ по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления

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).

Разработан компьютерный метод измерения ФРТ по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления с применением WEB-камеры [9]. Выполненные исследования показывают, что в качестве фотоприемника можно использовать любые камеры, имеющие способность изменения времени накопления. Такие камеры легко достать на рынке, например, видеокамеры производства Тайвань СВ-3803S, СС-8606S. Они способны изменять время накопления в широком диапазоне  $1/50$ – $1/100000$  с, это обеспечивает перепады регистрируемой освещенности в пятне рассеяния в диапазоне более трех порядков. Для макетной установки первоначально была использована WEB-камера фирмы «Creative»; ее диапазон изменения относительного времени накопления равен 1–240.

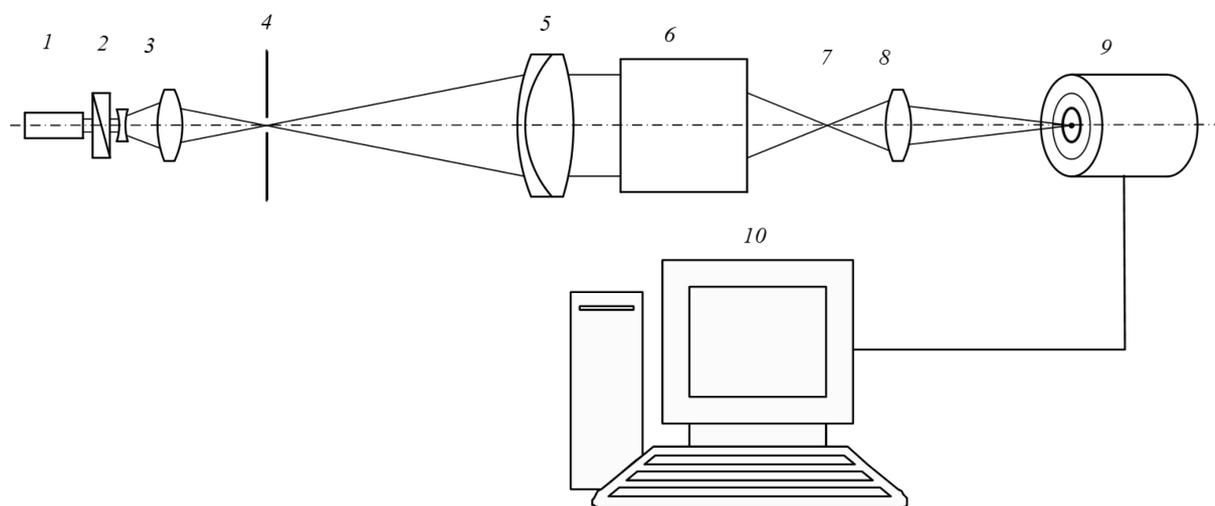


Рис. 18. Схема установки для измерения ФРТ фотообъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления при помощи WEB-камеры: 1 – лазер; 2 – фотометрический клин; 3 – система для фокусировки лазерного пучка; 4 – точечная диафрагма; 5 – объектив коллиматора; 6 – исследуемый объектив; 7 – изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния); 8 – проекционный микрообъектив; 9 – WEB-камера (приемник изображения); 10 – компьютер

На рис. 18 изображена принципиальная схема устройства. Оно содержит осветительную систему, в которую входят лазер 1, расширительная линза и объектив 3, формирующий точечный источник света 4. В осветительную систему введен перемещающийся (вращающийся) фотометрический клин 2, плавно меняющий световой поток. Сформированный точечный источник света посылает расходящийся пучок через объектив коллиматора 5 в зрачок исследуемой системы 6, которая строит пятно рассеяния 7. Это изображение переносится с увеличением при помощи микроскопа 8 на чувствительную площадку приемника изображения 9 (ПЗС WEB-камеры). WEB-камера превращает изображение пятна рассеяния в видеосигнал и посылает в компьютер 10 через порт USB. Программа «Videoprocess» позволяет наблюдать экранное отображение пятна рассеяния и строить его трехмерную модель для выполнения настройки установки.

Кроме того, на дисплей выводятся карта (изофотограмма) ФРТ и графики ФРЛ в двух перпендикулярных сечениях. Далее программа выполняет расчет и отображение ФКЭ и ФПМ (или ЧКХ) в качестве характеристик качества изображения исследуемой оптической системы (рис. 19).

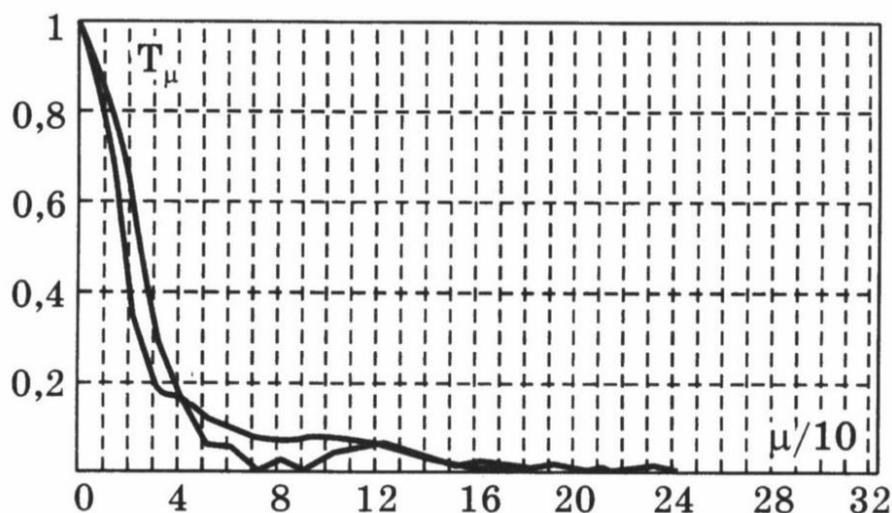


Рис. 19. График ФПМ по результатам изофотометрии

Таким образом, благодаря применению современных компьютерных технологий высокоэффективный метод изофотометрии с переменным временем накопления реализован в виде автоматизированной компьютерной версии и оснащен достаточно полным аппаратом обработки и интерпретации измерительных данных.

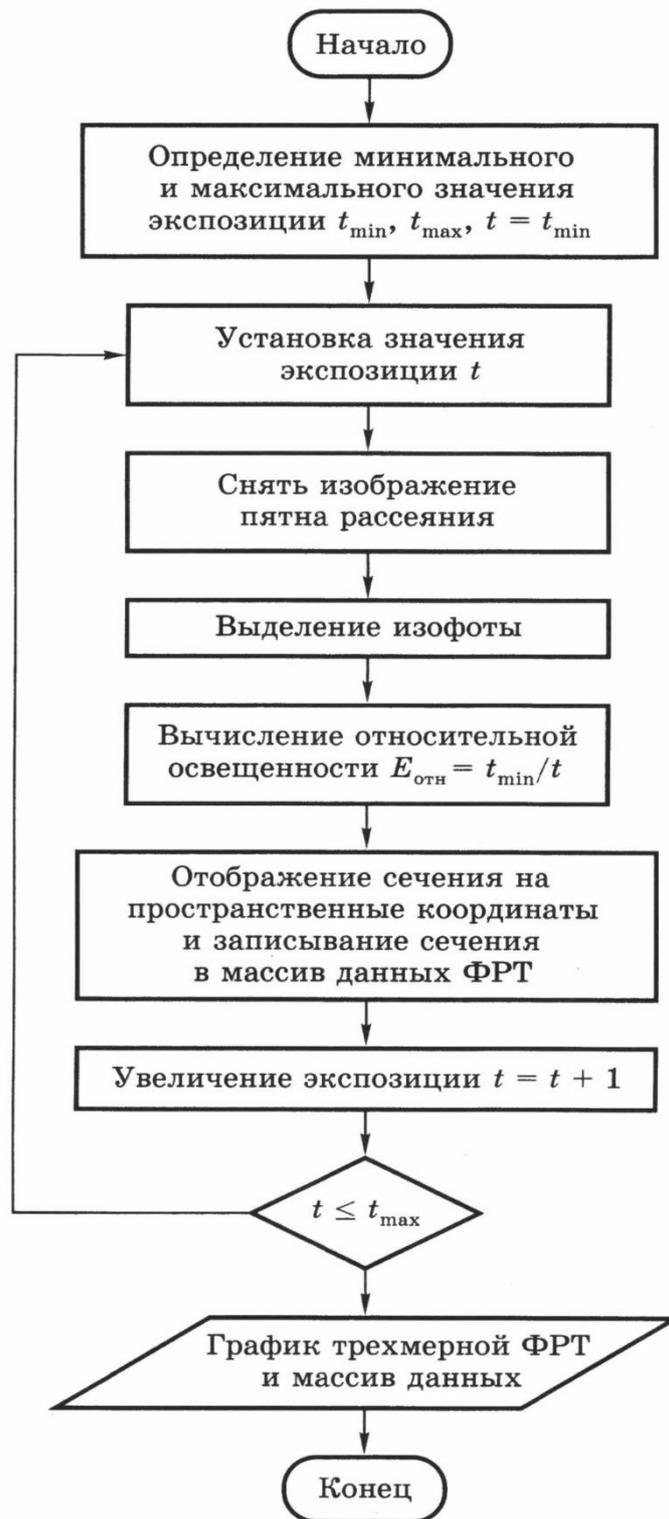


Рис. 20. Алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением при помощи USB-камеры, управляемой компьютером

Алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением показано на рис. 20. В исходном состоянии параметр «exposure» WEB-камеры установлен на минимальное значение; фотометрический клин введен так, что световой поток в

схеме контроля формирует изображение (рис. 21), дающее изофоту в виде точки (первая изофота). Эта изофота соответствует максимуму освещенности  $E_1$ , которое принимается равным единице.

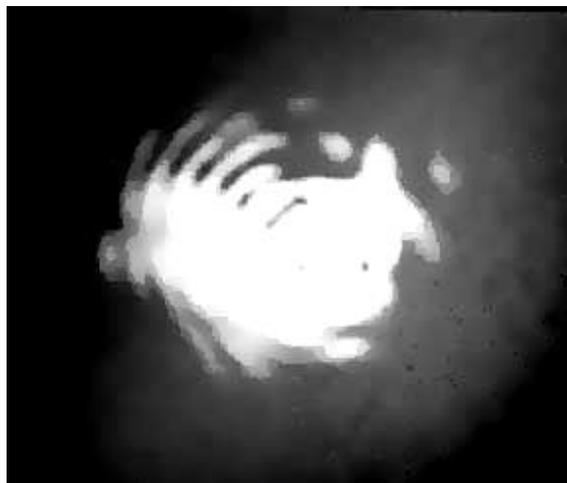


Рис. 21. Регистрация общего вида пятна рассеяния оптической системы

В процессе измерения, после установки времени экспозиции, программа снимает фотокадр пятна рассеяния и вводит его в модуль выделения изофоты. Эта изофота находится в сечении, соответствующем уровню относительной освещенности  $E_{отн}=1/t_{отн}=t_{min}/t$ , поэтому помещаем изофоту в систему координат на высоту  $E_{отн}$  и записываем в память.

В следующий цикл время экспозиции увеличивается на единицу и получается второе сечение. Когда  $t$  превышает максимальное значение  $t_{max}$ , работа программы заканчивается, на мониторе компьютера отображается изофотограмма (рис. 22) как карта ФРТ.

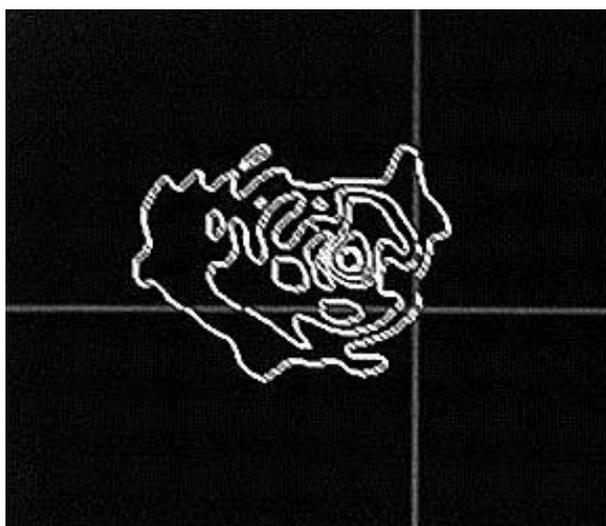


Рис. 22. Изофотограмма пятна рассеяния оптической системы в компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением

Таким образом, в результате запоминания ряда фотометрических сечений и построения в пространственных координатах их исходного взаимного расположения формируется трехмерная ФРТ, т.е. функция распределения освещенности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой.

Итак, на современном этапе выполнены исследования и разработки в свете программы развития инновационных технологий, посвященные развитию метода изофотометрии.

Проанализированы и интерпретированы теоретические основы методов изофотометрии. С помощью современных достижений информационных технологий метод изофотометрии развит на основе применения современных достижений видеотехники и компьютерных технологий для получения нового средства оценки качества оптических систем – компьютерной изофотометрии, на основе которой разработано новое поколение изофотометрических установок. Существенные достоинства установок: простота, высокая скорость (работа в реальном времени) и высокая точность (погрешность ФРТ меньше 1,5%, рассчитанная ЧКХ – меньше 5%).

# РАЗВИТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ ФРТ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВРЕМЕНЕМ НАКОПЛЕНИЯ

## Математические основы

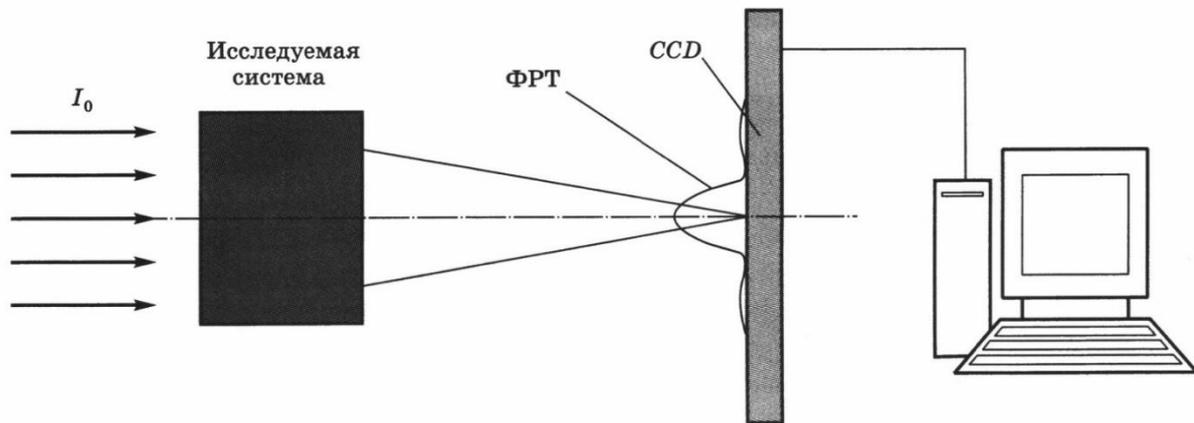


Рис. 23. Схема регистрации пятна рассеяния

Пусть в исследуемую систему (рис. 23), например фотообъектив, падает параллельный пучок лучей с интенсивностью  $I_0$ . Система создает пятно рассеяния в своей фокальной плоскости. Распределение освещенности в пятне рассеяния описывается нормированной функцией рассеяния точки  $h(x', y')$ . Освещенность заданной точки на плоскости изображения определяется по формуле:

$$E'(x', y') = I_0 h(x', y').$$

Если в плоскости изображения установлен приемник изображения – ПЗС-камера (CCD) – то в течение отрезка времени экспозиции  $t_0$  получим фотографию пятна рассеяния в виде матрицы пикселей с размером  $n \times m$ , представляющей освещенность в каждой точке матрицы. Видеосигнал пропорционален уровню серого  $d_{ij}$ :

$$\mathbf{D} = [d_{ij}]_{n \times m},$$

где  $d_{ij}$  – уровень серого.

Матрица  $\mathbf{D}$  содержит дискретные значения двухмерной функции электронного изображения  $f(x, y)$  в пределах размеров ПЗС  $w \times h$ .

Координата  $(x, y)$  любой точки (рис. 24) определяется по формуле:

$$\begin{cases} x = (i - i_0) \cdot dx \\ y = -(j - j_0) \cdot dy \end{cases}$$

где  $(i, i_0)$  – положение начала координат на матрице;  $(i, j)$  – положение текущего пикселя.

Уровень серого в пикселях (распределение потенциала в электронном изображении) пропорционален экспозиции  $H$ :

$$f(x, y) = F[H(x, y)] = F[E'(x, y)t_0]$$

$$f(x, y) = F[I_0 h(x, y)t_0].$$

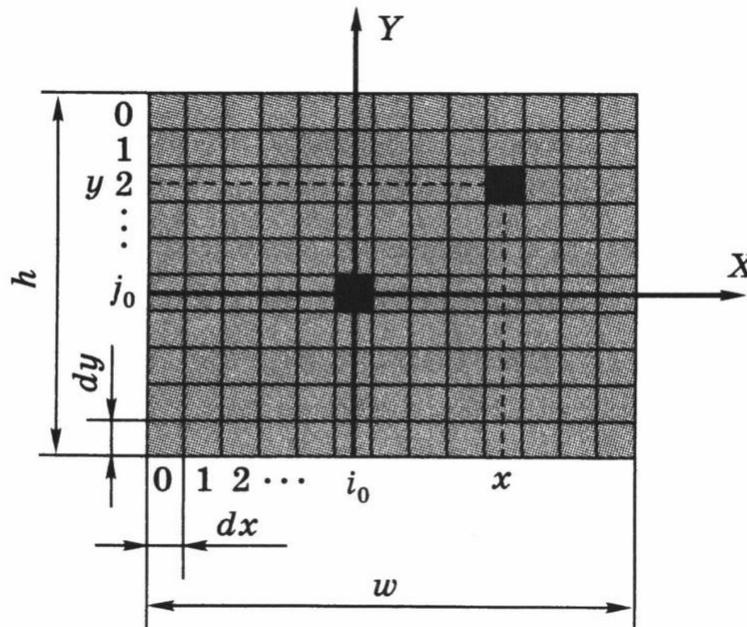


Рис. 24. Определение координаты точки на ПЗС-матрице

Если в изображении будет найдено множество точек  $P_i | i = 0, 1, 2, \dots$ , имеющих уровень серого  $d_0$ , то в этих точках можно определить значения функции  $h(x, y)$  по формуле:

$$h_{P_{0i}} = \frac{F^{-1}(d_0)}{I_0 t_0} = \frac{K}{t_0} \quad (i=0, 1, 2, \dots),$$

где  $F^{-1}$  – обратная функция  $F$ .

Множество точек  $P_i | i = 0, 1, 2, \dots$  составляет контур, который назван изофотой (слово «изофота» имеет значение – линия одинаковых освещенностей).

Подобным же образом, со второй фотографией, регистрируемой со временем накопления  $t_1 > t_0$ , получаем значения ФРТ в других точках (для другого уровня освещенности, т.е. получается другая изофота)

$$h_{Pi} = \frac{F^{-1}(d_0)}{I_0 t_1} = \frac{K}{t_1}.$$

Заметим, что, в обоих случаях правые части выражений имеют одну и ту же постоянную  $K$ , которая зависит от внутренних параметров ПЗС-камеры и трудно определяется. Однако ФРТ измеряется в относительном масштабе, поэтому не обязательно определять значение  $K$ , а достаточно только держать параметры камеры постоянными, чтобы  $K$  не менялся.

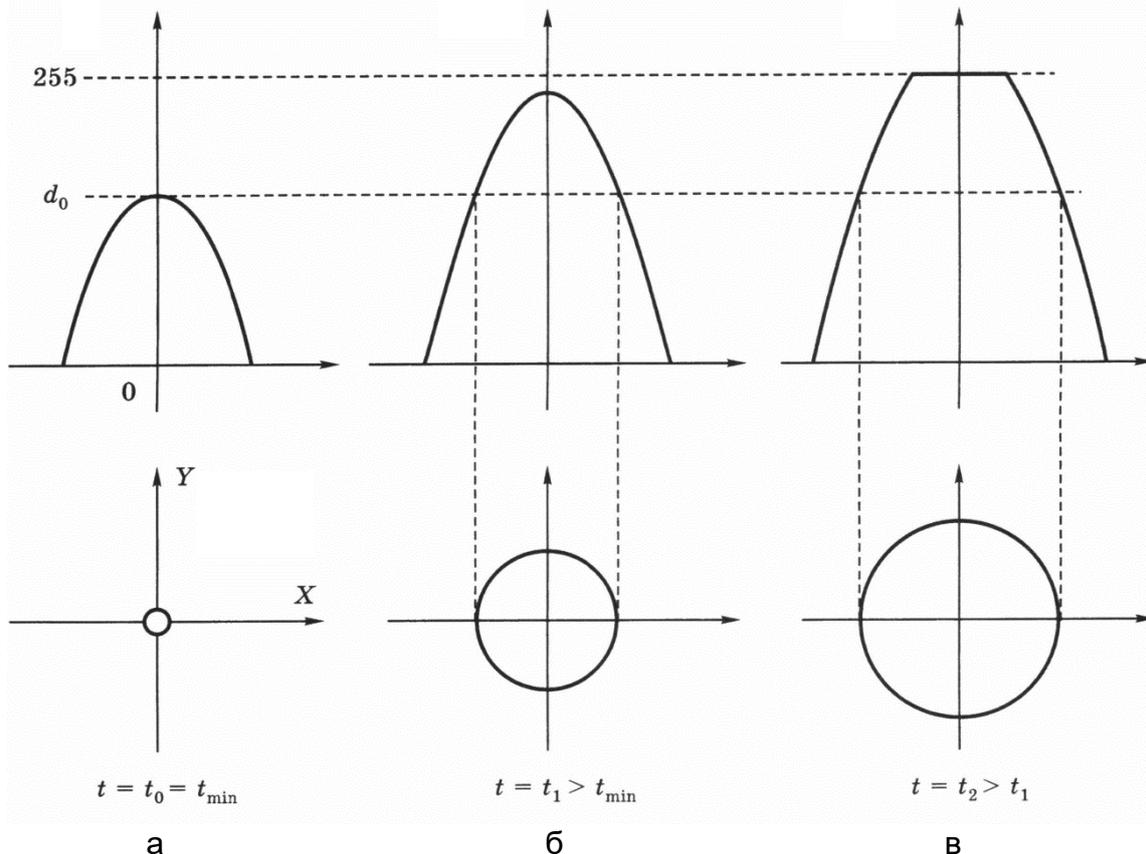


Рис. 25. Серия фотографий с изменением экспозиции и формирование изофот соответствующих диаметров

В камере может меняться время экспозиции в определенном диапазоне ( $t_{\min}$ – $t_{\max}$ ). Для определения максимального значения ФРТ нужно установить минимальное значение  $t = t_{\min}$ , тогда  $h_{\max} = K/t_{\min}$  (рис. 25, а), а если  $t > t_{\min}$  значение ФРТ будет  $h = K/t$  (рис. 25, б, в).

ФРТ в относительных единицах для ряда изофот определяется по формуле:

$$h_p = \frac{h}{h_{\max}} = \frac{K}{t} \cdot \frac{t_{\min}}{K} = \frac{t_{\min}}{t}.$$

Постепенно увеличивая  $t$  с  $t_{\min}$  до  $t_{\max}$ , получим ФРТ в диапазоне относительной освещенности  $1 - t_{\max}/t_{\min}$ .

## Алгоритм выделения изофоты

На основе метода изофотометрии видно, что можно определить ФРТ, если получить и обработать ряд фотографий пятна рассеяния, регистрируемых с постепенным увеличением времени накопления, путем нахождения изофоты для каждой фотографии. Изофотой здесь является множество точек, полученных при пересечении функции изображения  $f(x, y)$  с плоскостью на высоте  $d_0$  (рис. 26). Исходя из этого, изофота имеет следующие черты:

- представляет собой тонкие и сплошные линии;
- разделяет трехмерное отображение ФРТ на две части  $D < D_0$  и  $D \geq D_0$ .

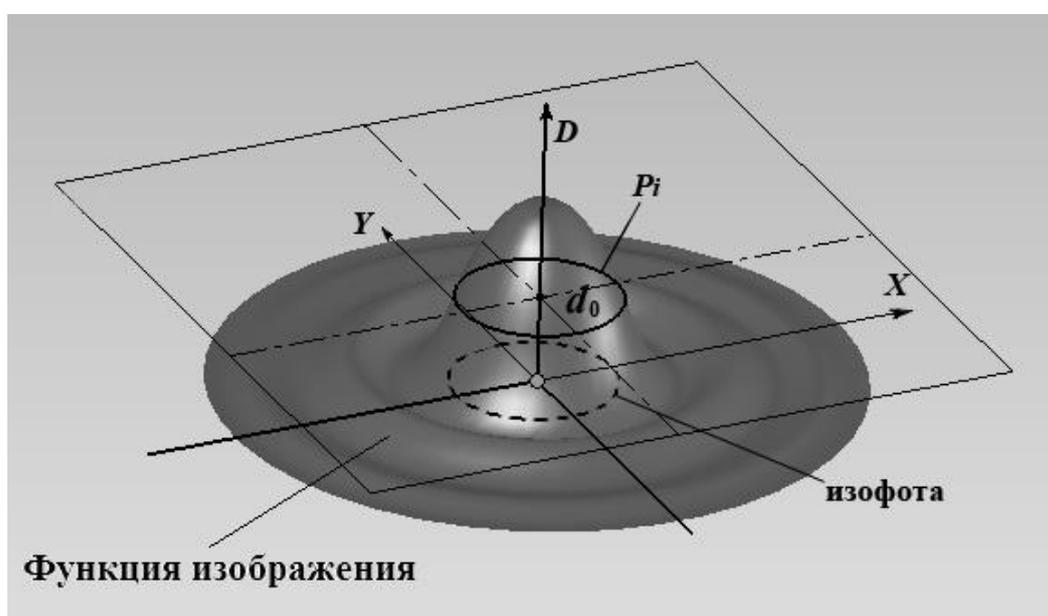


Рис. 26. Принцип формирования изофоты

На основе этих признаков можно предложить алгоритм выделения изофоты, который основан на рассмотрении соотношения текущей точки с окружающими точками. Точки принадлежат изофоте, если их значение (уровень серого) равно  $d_0$ , и существует, по крайней мере, одна из окружающих точек, которая имеет значение меньше  $d_0$ . Алгоритм представлен на рис. 27.

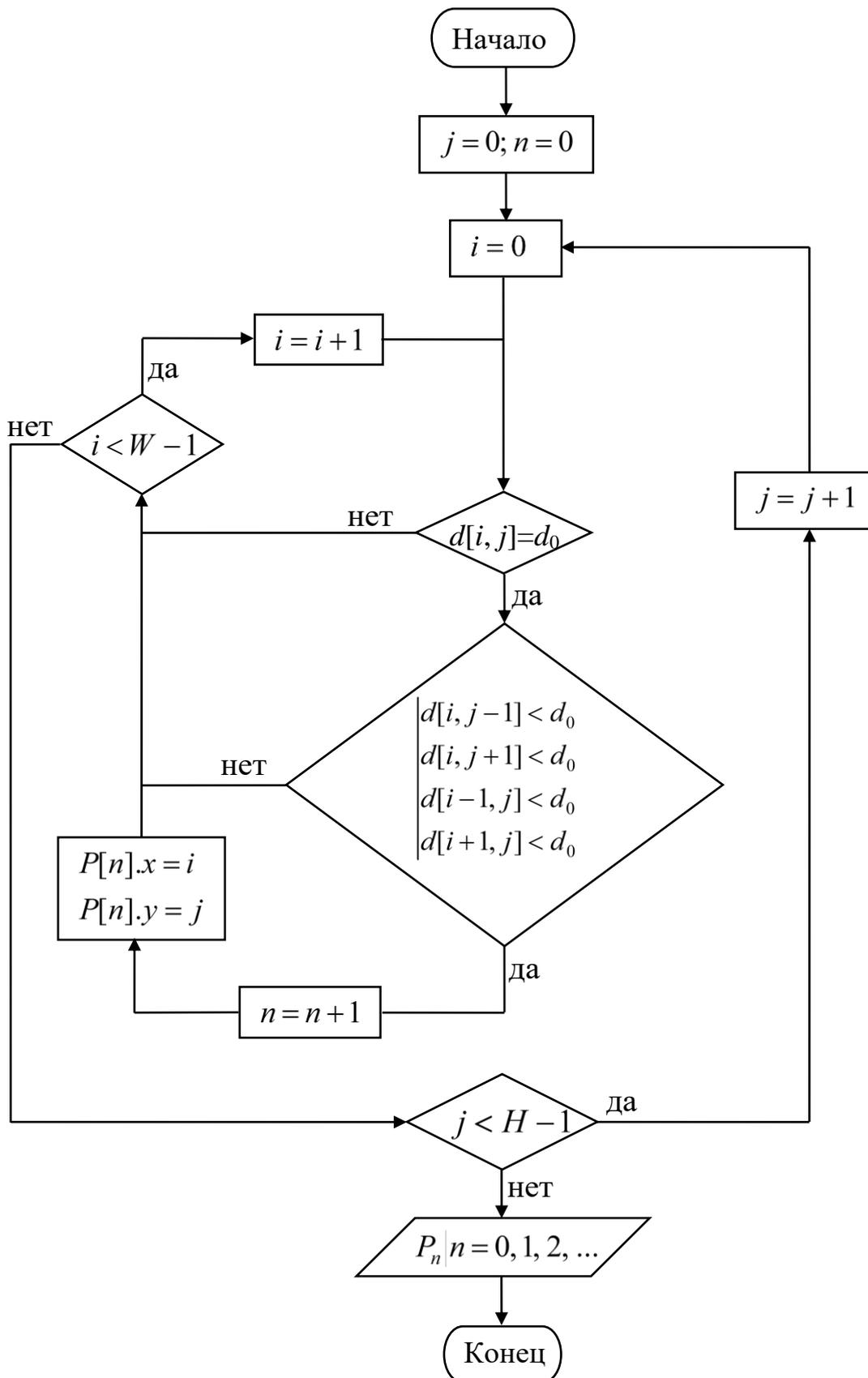


Рис. 27. Алгоритм выделения изофоты

## Алгоритм определения ФРТ

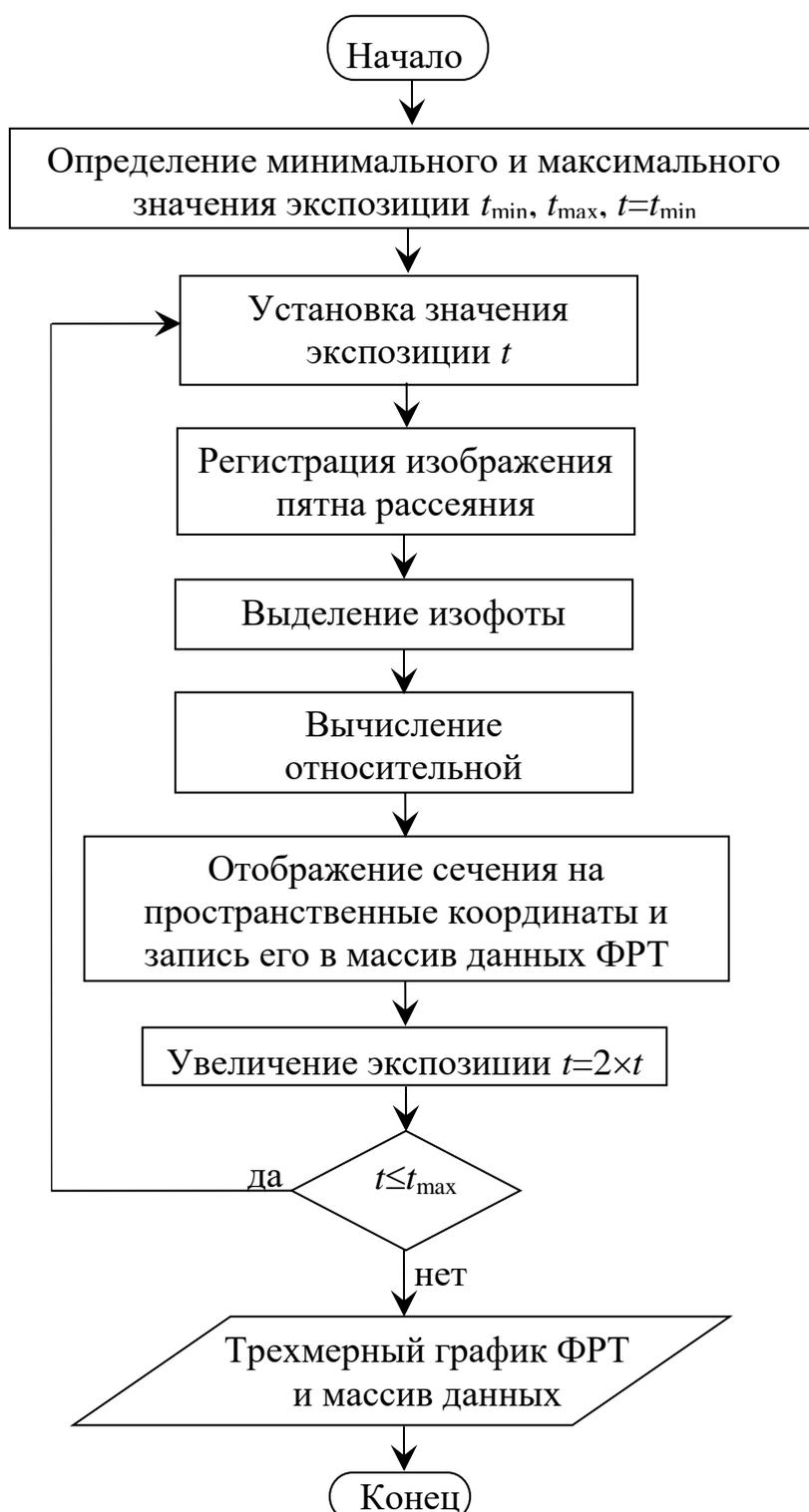


Рис. 28. Алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением

На рис. 28 показано алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением. На основе этого алгоритма создан модуль программы, позволяющий определить ФРТ.

В процессе работы модуля значения ФРТ определяются сверху вниз, этот процесс назовем изофотометрическим сканированием ФРТ. Модулем «сканирование ФРТ» является ядро программы для оценки качества изготовленных оптических систем [9].

В процессе измерения, после установки увеличенного времени экспозиции  $t_2 = k \cdot t_1$ , программа выполняет регистрацию фотографии пятна рассеяния и вводит ее в модуль выделения изофоты. Эта изофота является контуром фотометрического сечения, соответствующего новому уровню относительной освещенности  $E_{\text{отн}2} = t_1 / t_2$ .

Таким образом,  $E_{\text{отн}n} = 1 / t_{\text{отн}n} = t_1 / t_n$ , поэтому помещаем изофоту в систему координат на уровень  $E_{\text{отн}n}$  и записываем его в память. Когда  $t$  превышает максимальное значение  $t_{\text{max}}$ , работа программы заканчивается и на мониторе получается графическое отображение ФРТ.

В результате запоминания ряда фотометрических сечений и построения в пространственных координатах их исходного взаимного расположения формируется объемная диаграмма ФРТ, т.е. функция распределения освещенности в изображении точечного источника, построенном исследуемой оптической системой.

## ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ «КИЗО»

На основе созданного алгоритма разработано программное обеспечение «КИЗО». Таким образом, можно констатировать создание нового метода – компьютерной изофотометрии с изменяющимся временем накопления. С помощью матричной камеры и с применением созданного программного обеспечения метод позволяет определить ФРТ и обработать результаты измерения для получения ряда характеристик качества изображения исследуемого объектива. Программа состоит из трех компонентов:

1. управление камерой;
2. сканирование ФРТ;
3. анализ результата измерения.

Схема структуры программы показана на рис. 29. Перечислим ее особенности.

1. Модуль «управление камерой» использует драйвер, позволяющий потребителю ввести основные параметры, такие как чувствительность, яркость, контраст, и получить время накопления из модуля сканирования ФРТ и установить его в камеру, передавать изображение из камеры и посылать изображение на экран персонального компьютера.
2. Модуль «сканирование ФРТ» определяет ФРТ по методу изофотометрии. Измеренные данные передаются в базу данных.
3. Модуль «анализ результата измерения» получает данные ФРТ из базы данных и обрабатывает данные для получения характеристик качества изображения исследуемой системы, в числе которых:
  - ФРТ;
  - ФРЛ: интегрирование ФРТ по направлению  $u$ ;
  - ФКЭ: интегрирование ФРТ по радиусу  $r$ ;
  - пограничная кривая (ПК): интегрирование ФРЛ;
  - ЧКХ: двухмерное преобразование Фурье для ФРТ.



Рис. 29. Структура программного обеспечения «КИЗО»

## Установка. Конструкция и работа установки

На основе программы «КИЗО-ФРТ» была разработана установка контроля качества изготовления оптических систем (рис. 30). Она исполнена на базе скамьи ОСК-2ЦЛ. Установка обеспечивает определение характеристик качества изображения оптических систем с фокусным расстоянием до 500 мм, диаметром входного зрачка до 150 мм. Погрешность измерения меньше 5%.

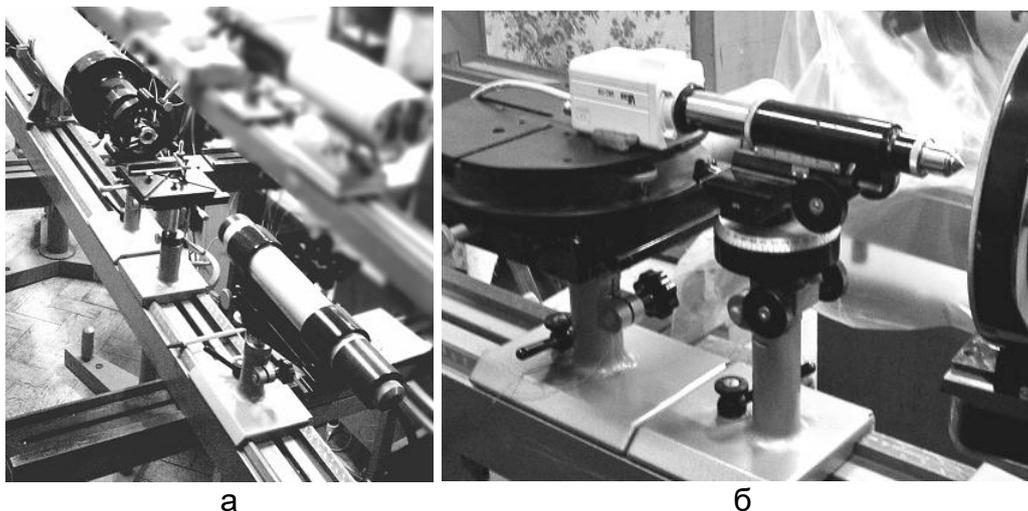


Рис. 30. Общий вид установки: лазер и коллиматор (а); микрообъектив и ПЗС-камера (б)

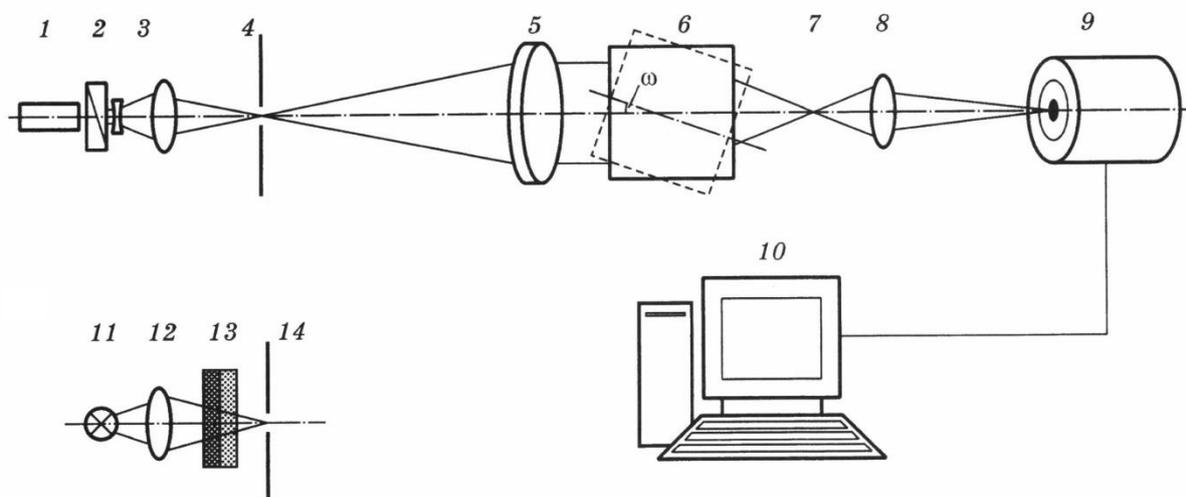


Рис. 31. Схема установки для измерения ФРТ фотообъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления при помощи ПЗС-камеры: 1 – лазер; 2 – фотометрический клин; 3 – система для фокусировки лазерного пучка; 4 – точечная диафрагма; 5 – объектив коллиматора; 6 – исследуемый объектив; 7 – изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния); 8 – проекционный микрообъектив; 9 – видеокамера (приемник изображения); 10 – компьютер; 11 – лампа накаливания; 12 – конденсор; 13 – светофильтр; 14 – точечная диафрагма

На рис. 31 изображена принципиальная схема устройства. Она содержит осветительную систему, в которую входят лазер 1, расширительная линза и объектив 3, формирующий точечный источник света. В осветительную систему введен перемещающийся (или вращающийся) фотометрический клин 2, плавно меняющий световой поток. Сформированный точечный источник света 4 посылает расходящийся пучок через объектив коллиматора 5 в зрачок исследуемой системы 6, которая строит пятно рассеяния 7. Это изображение переносится с увеличением при помощи микрообъектива 8 на чувствительную площадку приемника изображения 9 (ПЗС-камеры). Камера преобразует изображение пятна рассеяния в видеосигнал и посылает в компьютер через порт USB. При помощи программы «КИЗО-ФРТ» можно наблюдать пятно рассеяния на мониторе и снимать последовательные цифровые фотографии, вводимые в модуль выделения изофот.

Исследуемая система закрепляется на специальном держателе, который позволяет вращать ее вокруг оси, перпендикулярной оси измерительной системы, чтобы рассматривать изображения точки по полю.

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. Для контроля оптических систем в белом свете необходимо заменить лазерную осветительную систему, при этом можно использовать осветительную систему 11–14 на рис. 31. Она включает в себя источник 11 (лампу накаливания), конденсор 12, светофильтр 13 и точечную диафрагму 14. Свет от источника проходит конденсор, светофильтр и собирается в точечную диафрагму 14.

### **Тест-объект**

Тест-объектом при таком испытании системы служит освещенная круглая диафрагма малого диаметра. 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:

$$d = \frac{1,22\lambda}{A},$$

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

$$A = \sin \sigma \approx \frac{D_k}{2f'_k},$$

где  $D_k$  – диаметр объектива коллиматора;  $f'_k$  – фокусное расстояние объектива коллиматора.

В данной работе  $D_k = 150$  мм,  $f'_k = 1600$  мм, тогда находим:

$$d = 4,11 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Отверстие диафрагмы, которая устанавливается в фокальной плоскости коллиматора, должно быть меньше 4 мкм.

## Микрообъектив

Диаметр пятна рассеяния, сформированного исследуемым объективом, в общем случае составляет несколько микрометров, соответствующих размеру одного пикселя на матрице ПЗС. Поэтому необходимо использовать микрообъектив для увеличения пятна рассеяния, чтобы центральный кружок покрывал 10–20 пикселей. Таким образом, увеличение микрообъектива должно быть 10–40 $\times$ , что зависит от типа исследуемого объектива.

При работе микрообъектив вносит свою aberrацию в схему измерения и может ограничить пучок лучей, прошедший через исследуемый объектив. Следовательно, результат измерения будет отклоняться. Однако практика показывает, что погрешность, вызываемая микрообъективом, будет незначительна, если aberrация микрообъектива меньше  $\lambda/10$  и апертура микрообъектива соответствует соотношению

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

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

## Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния

Показанная выше установка с программным обеспечением «КИЗО-ФРТ», позволяет оценивать качество изображения объективов с фокусным расстоянием меньше 500 мм и диаметром до 150 мм. Установка работает на основе регистрации и анализа пятна рассеяния, образованного исследуемым объективом в плоскости изображения.

После определения ФРТ программа дает ряд нужных характеристик качества изображения в виде таблиц и графиков с высокой наглядностью.

Успешное применение современного метода изофотометрии для измерения ФРТ в диапазоне до 4–5-го порядков дает возможность высокоскоростного (несколько секунд для одного измерения) определения ряда характеристик качества изображения с высокой точностью. Это полезно для исследования и разработки высококачественных объективов, анализа и сравнения испытуемых объективов с расчетом при усовершенствовании технологического процесса.

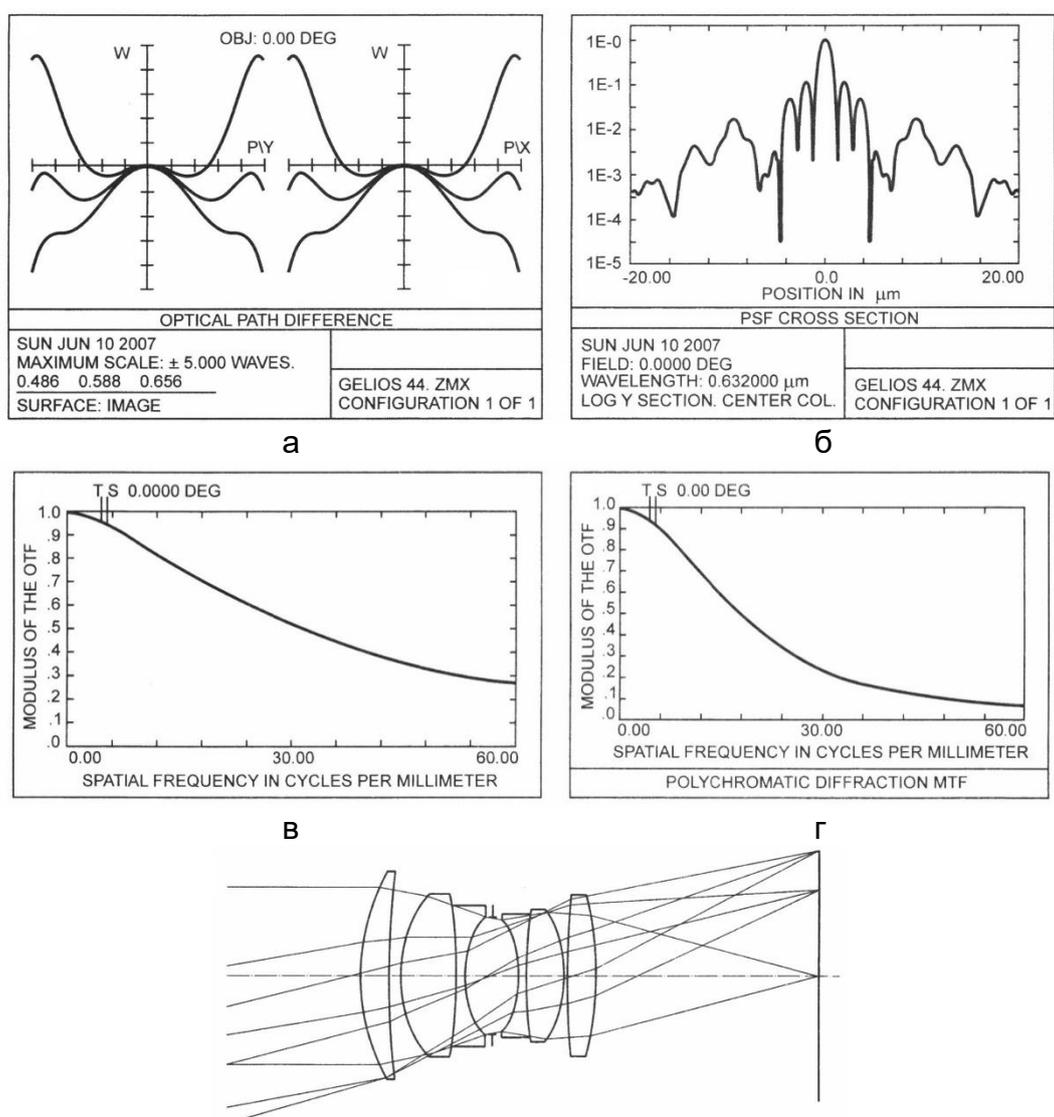


Рис. 32. Расчетные характеристики качества изображения объектива «Гелиос-44»: волновая aberrация (а); ФРТ в логарифмическом масштабе (б); ЧКХ с  $\lambda = 0,6328$  мкм (в); ЧКХ с белым светом в спектральном диапазоне  $\lambda=0,48-0,7$  нм (г); схема объектива (д)

На рис. 32, а–г, показаны характеристики качества изображения, определенные по методу изофотометрии. На рис. 33 – изофотোগрамма и изображение пятна рассеяния, восстановленного из изофотোগраммы (результат при лазерном источнике  $\lambda = 0,632$  мкм, тест-объект лежит на оптической оси).

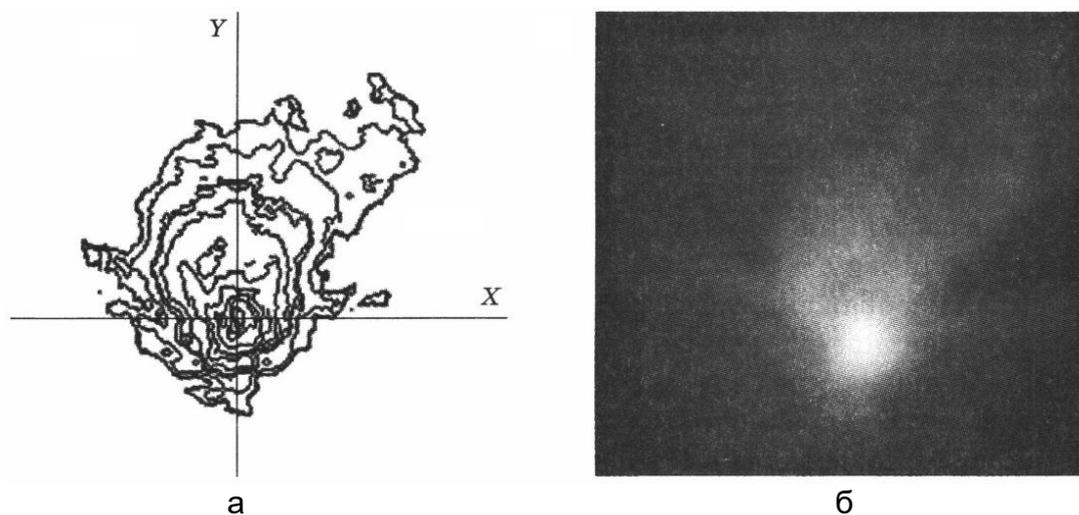


Рис. 33. Изофотোগрамма (а) и изображение пятна рассеяния, восстановленного из изофотোগраммы (б)

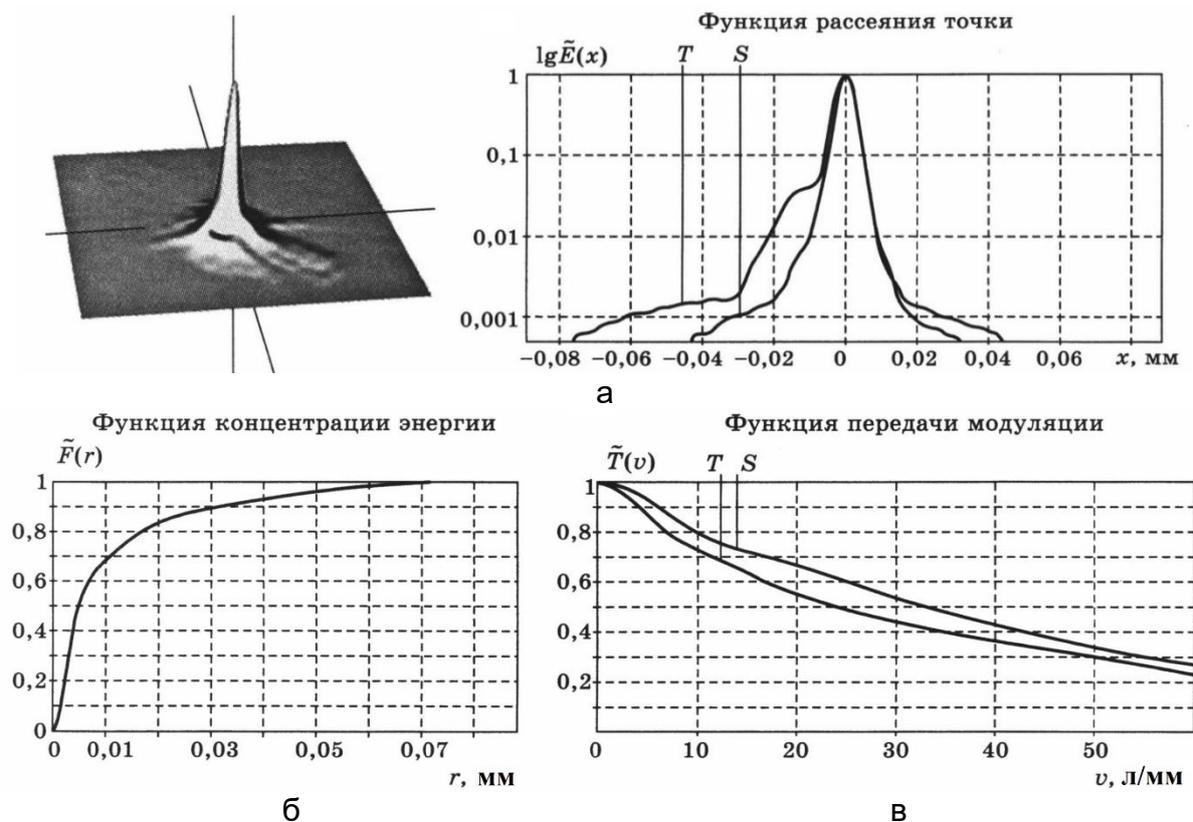


Рис. 34. Характеристики качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» при использовании лазерного источника  $\lambda = 0,632$  мкм: ФРТ (а); ФКЭ в пятна рассеяния (б); ЧКХ (в)

Оценивая изображение пятна рассеяния на рис. 33, заметим, что в исследуемом объективе существует aberrация типа кома на оси. Причина этого в том, что объектив недостаточно хорошо центрирован, поэтому КПК снижается сравнительно с расчетом (рис. 34).

На рис. 35 представлены графики ФРТ и ЧКХ при использовании источника белого света (лампа накаливания). Из-за влияния хроматической aberrации пятно рассеяния расширяется в два раза сравнительно с размером при использовании монохроматического света. График ЧКХ соответствует расчетам. Разрешающая способность объектива по критерию Фуко составляет  $30 \text{ мм}^{-1}$ , что соответствует требованиям, предъявляемым к кинообъективам и элементам фотоаппаратуры, выпускавшимся в СССР до 1988 г.

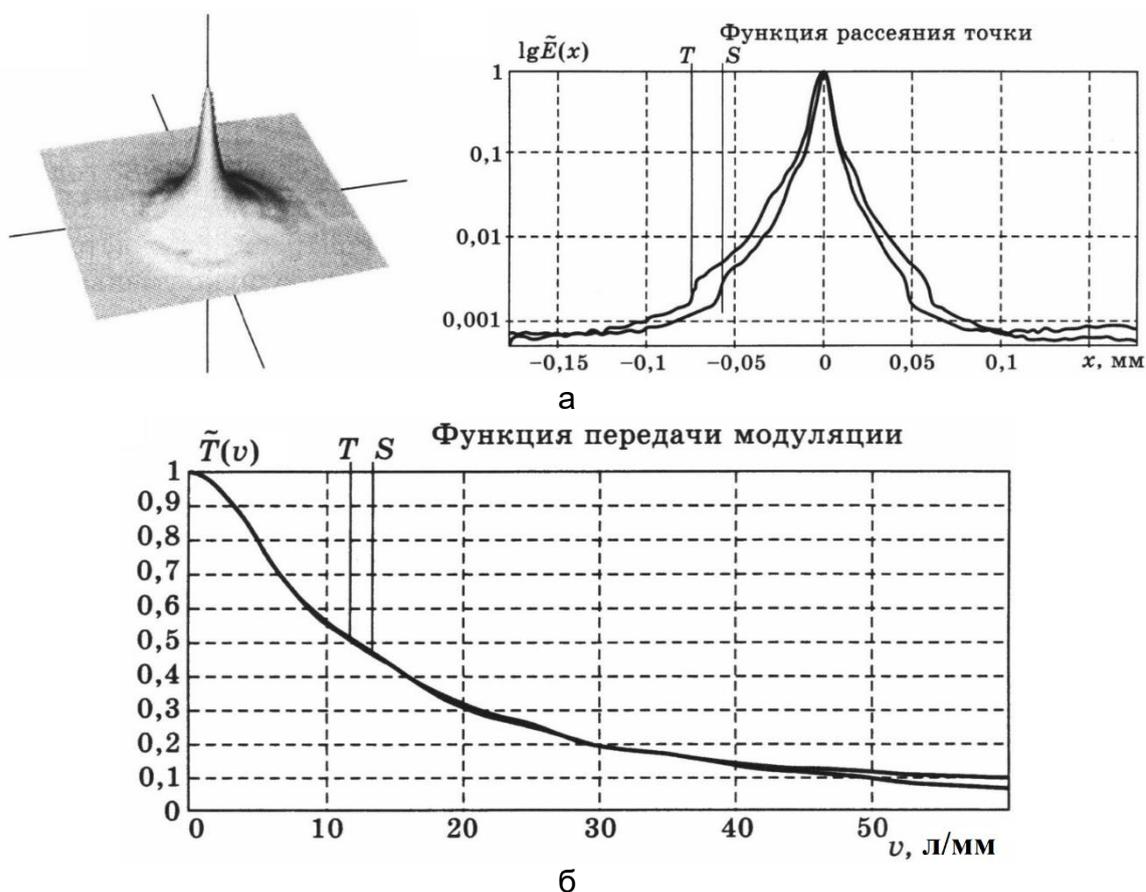


Рис. 35. Характеристики качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» при использовании белого света; точка предмета лежит на оптической оси: ФРТ (а); ЧКХ (б)

На рис. 36 и 37 показаны результаты измерения для внеосевой точки  $\omega=10^\circ$ , при белом свете. Коэффициент передачи контраста снижается на высокой частоте. Разрешающая способность по критерию Фуко уменьшается до  $20 \text{ мм}^{-1}$ .

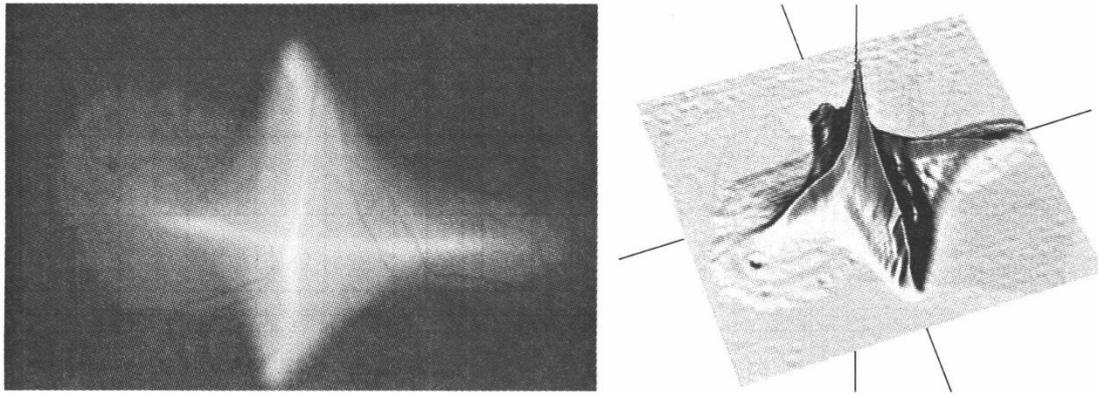


Рис. 36. Внеосевое изображение пятна рассеяния и распределение освещенности в нем

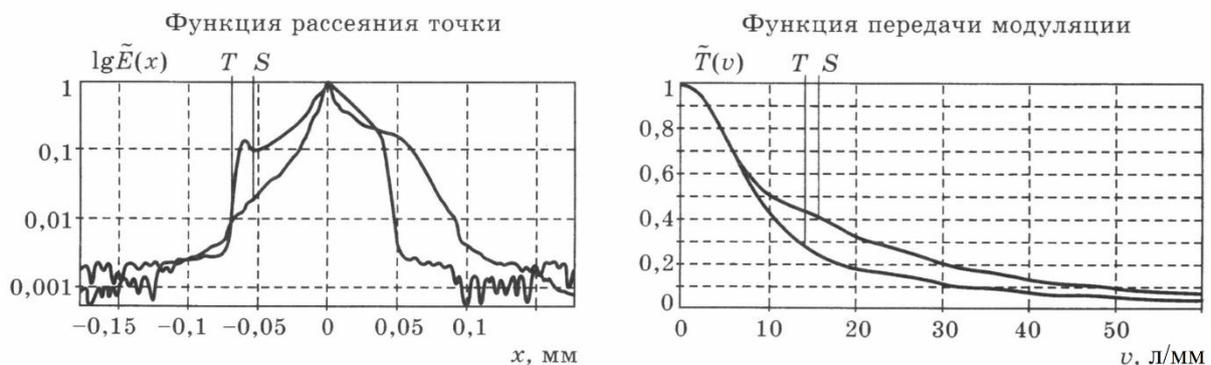


Рис. 37. Характеристики качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» при использовании белого света; точка предмета лежит на поле  $\omega=10^\circ$

## Выводы

- Теоретические основы методов изофотометрии ФРТ глубоко проанализированы и интерпретированы применительно к задаче создания алгоритмов и программного обеспечения.
- Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, которое позволяет измерить ФРТ по методу изофотометрии и преобразовать измеренные значения ФРТ для получения различных характеристик качества изображения оптических систем, таких как ЧКХ, ФРЛ, ПК, ФКЭ.
- Разработана установка контроля качества изображения оптических систем на основе скамьи ОСК2ЦЛ.
- Экспериментально исследовано качество изображения фотообъектива «Гелиос-44» на установке. Результаты соответствуют практике и согласованы с расчетом.
- Дана оценка погрешности метода изофотометрии ФРТ. Погрешность определения ФРТ по методу изофотометрии ФРТ не выше 1,5%, погрешность после расчета ЧКХ не больше 5%.

# КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ ФРЛ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ

## Математические основы

На рис. 38 представлена схема оценки качества изображения по ФРЛ. Пучок лучей, выходящий из лампы накаливания 1, собирается на узкой щели 3 с помощью конденсора 2. Освещенная щель через коллиматорный объектив 4 и исследуемой объектив 5 изображается в плоскости 6, на которой установлен приемник изображения. Распределение освещенности в изображении узкой щели соответствует ФРЛ исследуемого объектива 5.

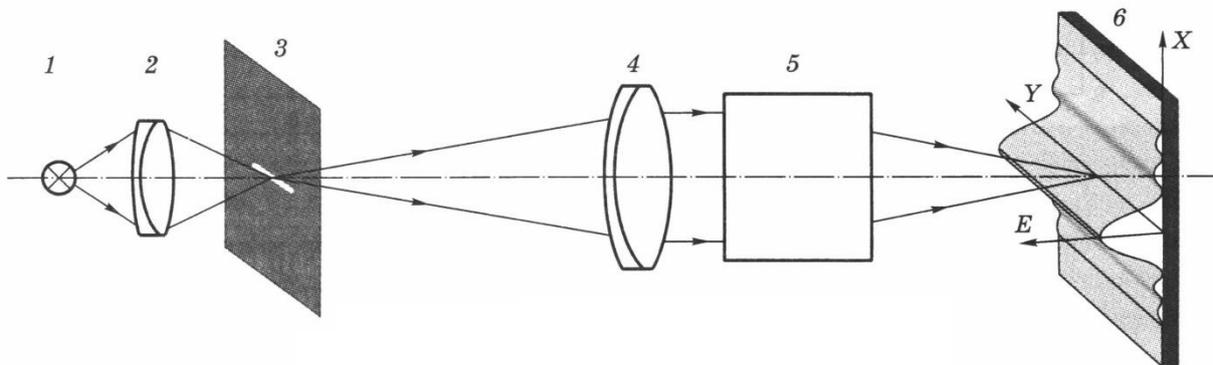


Рис. 38. Схема контроля оптической системы по ФРЛ: 1 – лампа; 2 – конденсор; 3 – узкая щель (тест-объект); 4 – объектив коллиматора; 5 – исследуемый объектив; 6 – ФРЛ исследуемого объектива

Пусть на зрачок исследуемого объектива 6 падает пучок лучей с интенсивностью  $I_0$ . Распределение освещенности в плоскости изображения будет

$$E(x, y) = I_0 \cdot L(x).$$

Если перед плоскостью приемника изображения, совпадающей с плоскостью 6, установлен фотометрический клин вдоль направления  $Y$ , то распределение освещенности в плоскости изображения меняется.

Пусть коэффициент пропускания фотометрического клина меняется как

$$\tau = \tau(y).$$

Распределение освещенности в плоскости изображения будет

$$E(x, y) = I_0 \tau L(x) = I_0 \tau(y) L(x).$$

Приемник изображения дает фотографию этого пятна рассеяния в численном виде, и можно представить ее функцией  $f(x, y)$ :

$$f(x, y) = F[E(x, y)] = F[I_0 \tau(y) L(x)].$$

Если выделить из совокупности значений  $f(x, y)$  все точки  $P_i$ , имеющие одно и то же значение  $d_0$ , то в этих точках имеем

$$I_0 \tau(y) L(x) = F^{-1}(d_0).$$

$$L(x) = \frac{F^{-1}(d_0)}{I_0 \tau(y)} = \frac{K}{r(y)},$$

где  $F^{-1}$  – обратная функция  $F$ .

Так как  $K$  – постоянная величина, то при переходе в относительные единицы можно ею пренебречь, при этом ФРЛ будет:

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

Итак, ФРЛ определяется по закону изменения коэффициента пропускания фотометрического клина.

### Алгоритм определения ФРЛ по методу изофотометрии

Из предыдущего анализа видно, что для изофотометрии ФРЛ необходимо выполнить следующие операции:

- определение функции фотометрического клина  $\tau(y)$ ;
- нахождение на изображении пятна рассеяния всех точек, имеющих одно и то же значение  $d_0$ .

Функцией  $\tau(y)$  является основная характеристика фотометрического клина, определенная изготовителем, а точка  $P_i$  представляет собой пересечение функции  $f(x, y)$  с плоскостью на высоте  $d_0$  (рис. 39).

Контур пересечения формирует изофоту, поэтому можно использовать алгоритм выделения изофоты. Из этого контура можно найти график ФРЛ, а затем найти другие характеристики качества изображения, такие как ЧКХ, ПК, ФКЭ.

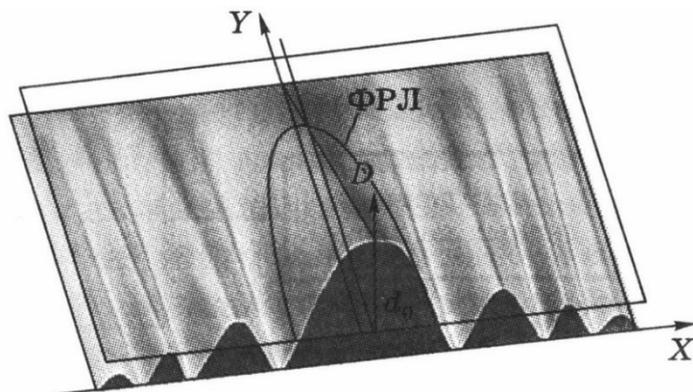


Рис. 39. Компьютерное моделирование принципа изофотометрии ФРЛ

## Программа «КИЗО-ФРЛ»

На основе предыдущего математического анализа разработана программа «КИЗО-ФРЛ» (рис. 40), которая непрерывно обрабатывает изображения, полученные из ПЗС-камеры, для определения ФРЛ и других характеристик качества изображения оптических систем в реальном времени. Программа состоит из четырех компонентов:

- управление камерой;
- выделение контура;
- опознавание и расшифровка ФРЛ;
- анализ.

Модуль «управление камерой» работает так же, как в программе «КИЗО-ФРТ», но здесь его задача – послать изображение пятна рассеяния в следующий модуль со скоростью 15–30 кадр/с, что обеспечивает программу возможностью работать в реальном времени.

Компонент «Опознавание и расшифровка ФРЛ» переводит координаты контурных точек в значения ФРЛ, упорядочивает эти точки по очереди слева направо и устраняет лишние точки, имеющие одинаковые абсциссы  $x$ . Полученные значения ФРЛ вводятся в базу данных программы.

Компонент «анализа» получает данные ФРЛ из базы данных и обрабатывает данные для получения характеристик качества изображения исследуемой системы, в том числе:

- ФРЛ;
- ФКЭ: интегрирование ФРЛ по направлению  $x$ ;
- пограничная кривая: интегрирование ФРЛ;
- ЧКХ: одномерное преобразование Фурье ФРЛ.

Компонент «выделение контура» позволяет получить изображения из блока «управление камерой», найти все точки, имеющие одно значение  $d_0$ .

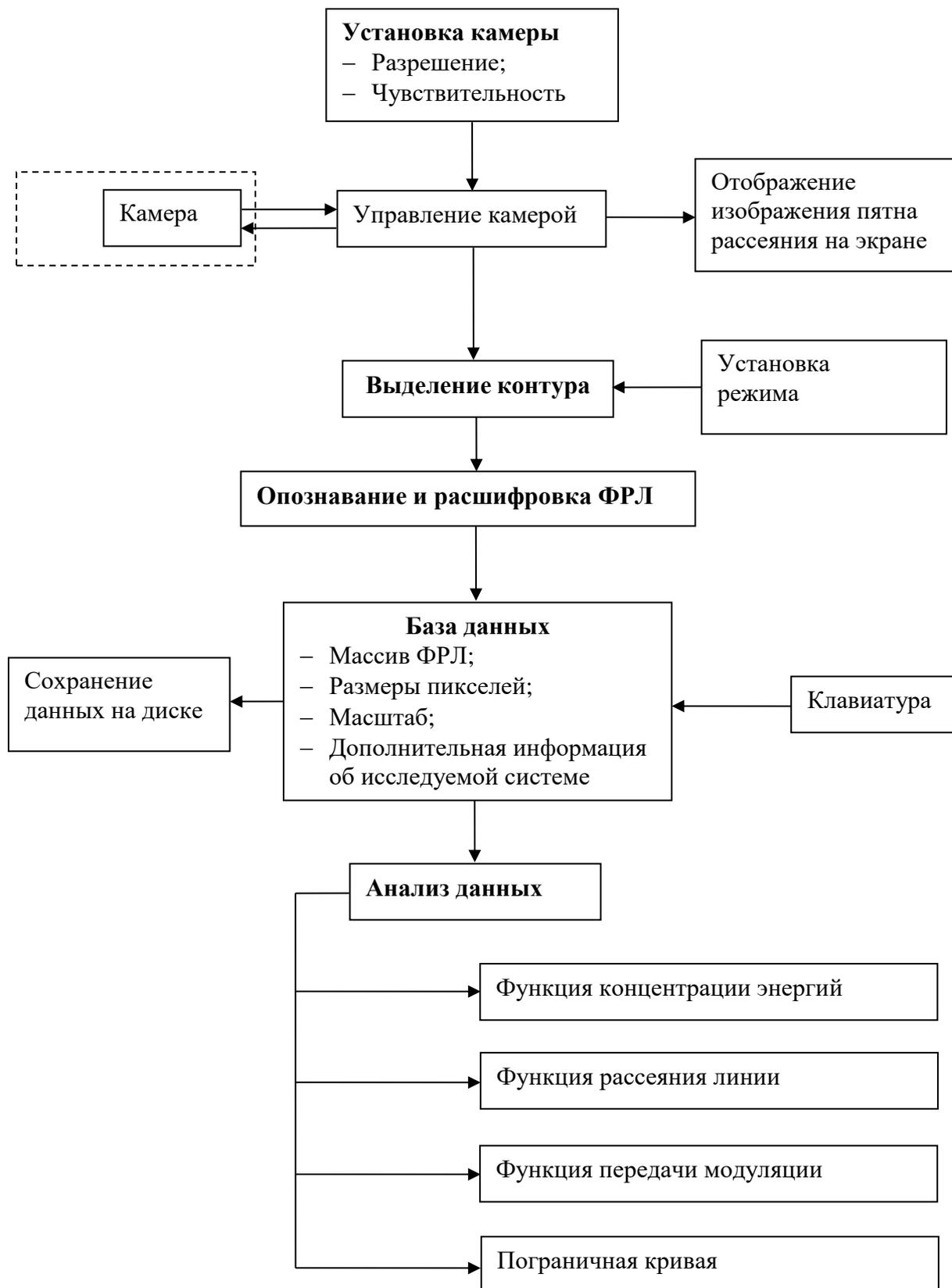


Рис. 40. Структурная схема программы «КИЗО-ФРЛ»

## Установка. Конструкция и работа установки

С использованием программы «КИЗО-ФРЛ» разработана установка контроля качества изображения объектива, которая позволяет измерить ФРЛ в диапазоне относительной освещенности свыше 3-х порядков и одновременно вычислять ЧКХ, КФЭ, ПК в реальном времени (со скоростью 15–30 измерений на секунду).

На рис. 41 показана схема установки изофотометрии ФРЛ. Конденсор 2 собирает пучок лучей из лампы накаливания 1 на узкой щели 4, которая изображается через коллимационный объектив 5 и исследуемый объектив 6 на фокальной плоскости объектива 6. Микрообъектив 7 увеличивает это изображение и переносит его на плоскость матричной камеры 9. С помощью фотометрического клина 8, установленного перед ПЗС, изображение щели становится светящейся линией с переменной интенсивностью. ПЗС-камера регистрирует это изображение и посылает его в компьютер 10 для дальнейшей обработки.

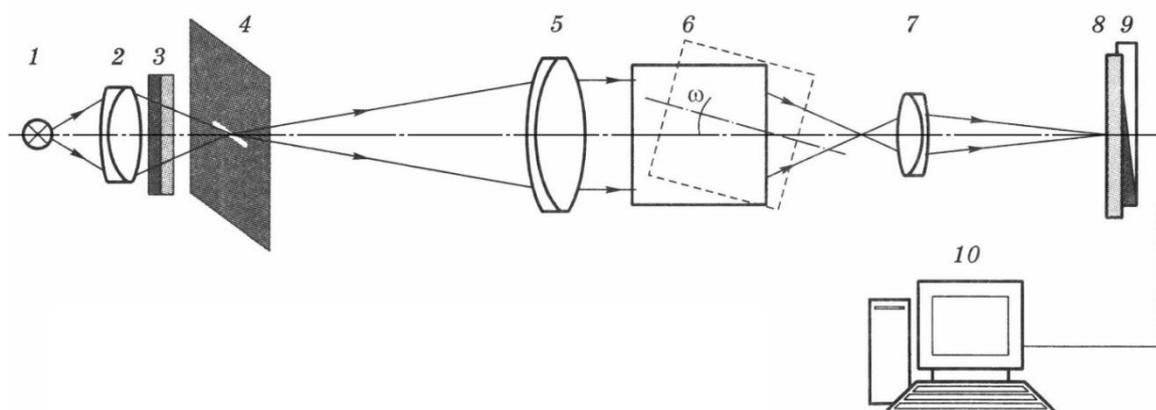


Рис. 41. Схема установки измерения ФРЛ по методу изофотометрии с изменяющимся световым потоком

Исследуемая система закрепляется на специальном держателе, который может вращаться вокруг оси, перпендикулярной оси измерительной системы, чтобы исследовать ФРЛ по полю.

## Расчет основных узлов в схеме установки

Установка создана на базе скамьи ОСК-ЦЛ2. Фокусное расстояние коллимационного объектива 1600 мм, что позволяет исследовать на установке объективы с фокусным расстоянием до 500 мм. Остальные оптические узлы в схеме должны выбираться согласно требованию, чтобы они не влияли на качество исследуемого объектива.

Например, при исследовании фотообъектива «Гелиос-44».

## Тест-объект

Ширина  $d$  щели 4 должна быть меньше диаметра дифракционного кружка, который способна построить исследуемая система в обратном ходе лучей, что можно выразить соотношением:

$$d = \frac{1,22\lambda}{A},$$

где  $D_k$  – эффективный диаметр апертурной диафрагмы объектива коллиматора;  $f'_k$  – фокусное расстояние объектива коллиматора.

В данной работе  $D_k = 200$  мм,  $f'_k = 1600$  мм, тогда найдем

$$d = \frac{1,22\lambda}{A} = \frac{1,22\lambda}{D_k / 2f'_k} = \frac{2,44\lambda f'_k}{D_k} = \frac{2,44 \cdot 0,55 \cdot 10^{-3} \cdot 1600}{200} =$$
$$= 10,736 \cdot 10^{-3} \text{ мм.}$$

Ширина щелевой диафрагмы, которая устанавливается в фокальной плоскости коллиматора, должна быть меньше 10 мкм.

## Микрообъектив

Диаметр пятна рассеяния, сформированного исследуемым объективом, в общем случае составляет несколько микрометров, соответствующих размеру одного пиксела на матрице ПЗС. В связи с этим необходимо использовать микрообъектив для увеличения пятна рассеяния, чтобы центральный максимум дифракционного кружка проецировался на 10–20 пикселей. Таким образом, увеличение микрообъектива должно быть  $10^{\times}$ – $40^{\times}$ , что зависит от типа исследуемого объектива.

При работе микрообъектив вносит свою aberrацию в схему измерения и может ограничить пучок луча, прошедший через исследуемый объектив. Следовательно, результат измерения будет отклоняться. Однако практика показывает, что погрешность, вызываемая микрообъективом, будет незначительна, если aberrация микрообъектива меньше  $\lambda/10$  и апертура микрообъектива соответствует соотношению:

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

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

## Фотометрический клин

Из изложенного видно, как результаты исследования ФРЛ определяются фотометрическим клином. Диапазон освещенности, в котором измеряется ФРЛ, равен диапазону изменения коэффициента пропускания клина. Этот диапазон должен быть выше 3–4-х порядков для корректного перехода к определению ЧКХ. Таким образом, функцию клина (закон изменения коэффициента пропускания) нужно определить.

В данной установке фотометрический клин склеен из двух призм, изготовленных из нейтрального стекла НС10 и бесцветного стекла К8 (рис. 42). Фотометрический клин работает как плоскопараллельная пластинка, так как показатель преломления двух стекол одинаков.

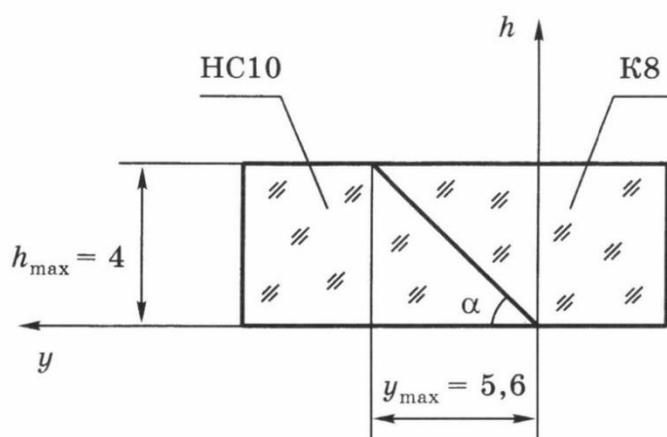


Рис. 42. Фотометрический клин

Коэффициент пропускания фотометрического клина выражается как

$$\tau_{\lambda}(y) = (1 - \rho) 10^{-k_{\lambda} h} = (1 - \rho) 10^{-k_{\lambda} y \operatorname{tg} \alpha},$$

где  $\rho$  — коэффициент отражения от поверхностей (в данном случае коэффициент  $\rho$  имеем постоянное значение);  $k_{\lambda}$  — показатель поглощения стекла НС10.

Показатель поглощения стекла НС10 в спектральном диапазоне  $\lambda = 0,48 - 0,656$  мкм почти постоянен и можно принять  $k_{\lambda} = 0,87$ , тогда

$$\tau(y) = 10^{-0,87 y \operatorname{tg} \alpha} = 10^{-0,621 y}.$$

На рис. 42 толщина серого клина меняется в диапазоне 0–4 мм, что соответствует диапазону освещенности  $1 \div 10^{3,7}$ , в котором можно определить ФРЛ.

Фотометрический клин работает как плоскопараллельная пластинка в сходящемся пучке лучей, созданном микрообъективом, поэтому он вносит свою аберрацию в схему. Однако толщина фотометрического клина незначительна (4 мм) и задний апертурный угол микрообъектива

очень мал (пучок почти параллельный), следовательно, фотометрический клин практически не влияет на результат измерений. Экспериментальные исследования показывают, что в этом случае абберация измерительной системы меняется меньше чем  $\lambda/100$ .

### Экспериментальные исследования качества изображения объектива по ФРЛ

Описанная выше установка построена в лаборатории на основе скамьи ОСК2ЦЛ. Установка и программное обеспечение «КИЗО-ФРЛ» позволяют определить ФРЛ исследуемой оптической системы в динамическом диапазоне свыше  $10^3$ , обрабатывать измеренные данные для получения характеристик качества оптической системы, таких как ЧКХ, пограничная кривая 9, ФКЭ. Скорость работы установки и программного обеспечения достигает 15–20 измерений в секунду, что позволяет рассматривать оптические системы в реальном времени в разных условиях работы, например, следить за изменением кривой ЧКХ во время фокусировки, при перемещении тест-объекта по полю или при юстировке исследуемой системы. Такие возможности позволяют оценивать исследуемую систему в процессе ее сборки для получения наилучшего качества изображения.

Данную установку целесообразно применять на производстве для оценки качества изображения изготовленных оптических систем в серийном производстве.

На рис. 43 и 44 представлены результаты определения характеристик качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» на разработанной установке. Можно сравнивать эти результаты с расчетными или с результатом, определенным по методу изофотометрии ФРТ.

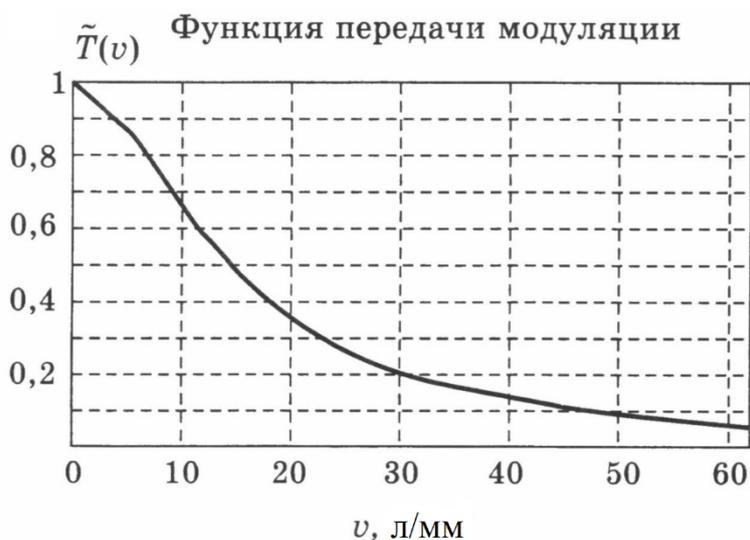
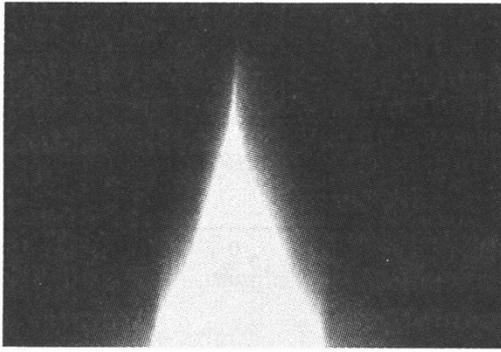


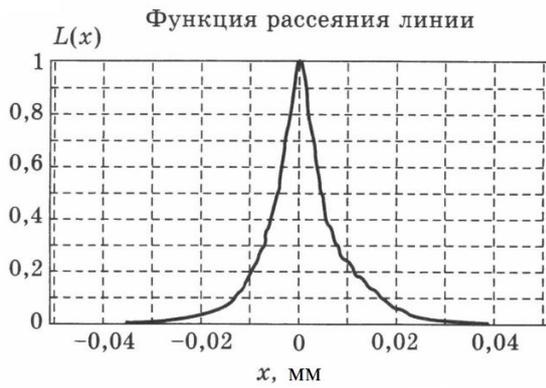
Рис. 43. Кривая ЧКХ, полученная методом Фурье-преобразования ФРЛ



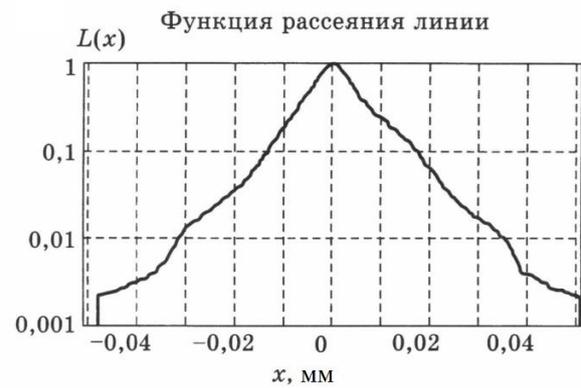
а



б



в



г

Рис. 44. Экспериментальная оценка качества изображения фотообъектива «Гелиос-44» для осевой точки по методу изофотометрии ФРЛ: изображение тест-объекта (светящаяся линия), зарегистрированное ПЗС-камерой (а); контур ФРЛ после обработки изображения тест-объекта (б); ФРЛ в линейном масштабе (в); ФРЛ в логарифмическом масштабе (г)

# ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С ДИФРАГИРОВАННЫМ ЭТАЛОННЫМ (ОПОРНЫМ) ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ

## Устройство

Высокую эффективность при контроле высокоточных оптических поверхностей и систем показал лазерный интерферометр с дифрагированным опорным волновым фронтом и *разнесенными* ветвями [4, 5] (рис. 45).

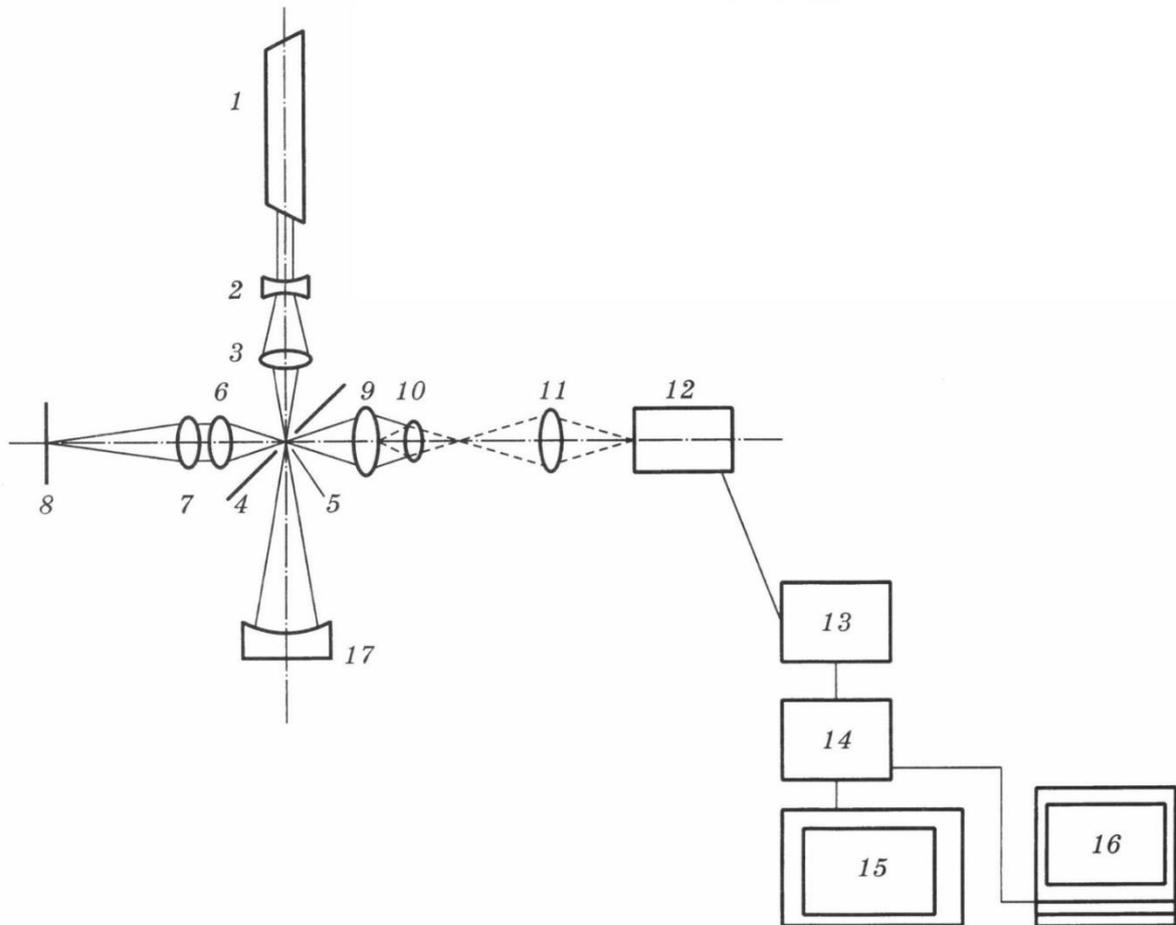


Рис. 45. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом: 1 – лазер; 2, 3 – осветительная система; 4 – наклонное зеркало, точечная диафрагма; 5 – точечная диафрагма; 6, 7 – встречные коллиматорные объективы; 8 – плоское автоколлимационное зеркало; 9–11 – наблюдательный микроскоп с линзой Бертрана; 12 – видеокамера; 13 – блок обработки изображения; 14 – блок выделения центров интерференционных полос; 15 – телевизионный монитор; 16 – компьютер; 17 – измеряемая поверхность

Разработаны разновидности схем интерферометра с дифрагированным эталонным волновым фронтом. Этот прибор имеет традиционную методику настройки и интерпретации интерференционной картины, обеспечивает высокое качество

интерферограммы, гибкость при исследовании оптических систем и элементов с различными коэффициентами пропускания (отражения) от 98% (зеркальные покрытия) до 0,15% (просветляющие покрытия).

Данный прибор может быть использован для оценки погрешностей изготовления оптических поверхностей, качества объективов различного назначения, в том числе – объективов микроскопов.

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

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

На одну из поверхностей светоделителя светового пучка, выполненного в виде плоскопараллельной пластины 4, нанесено зеркальное покрытие (вместо светоделительного покрытия, используемого в неравноплечих интерферометрах). В центре зеркального покрытия имеется точечное отверстие 5, диаметр которого соизмерим с длиной волны излучения. Между лазером и светоделителем пучка расположен объектив 2, 3, задний фокус которого совмещен с точечным отверстием 5 на светоделителе пучка [10].

Точечное отверстие служит источником дифракционной волны, которая является опорной. Таким образом, возникающая в этой схеме интерференционная картина есть результат сложения идеальной сферической волны, возникающей при дифракции на точечном отверстии, и рабочей волны, отраженной от контролируемой поверхности или прошедшей дважды через исследуемый объектив в автоколлимационной схеме.

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

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

При этом интерферометр с дифракционной волной позволяет контролировать оптические элементы и поверхности, отличающиеся

коэффициентом пропускания или отражения в большом диапазоне, от 1 до 90%, без замены элементов интерферометра. Решение подобной задачи в неравноплечем интерферометре требует замены неалюминированной эталонной сферической поверхности на алюминированную, что влечет за собой необходимость повторной настройки прибора.

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

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

### Методика проведения измерений

По виду интерференционной картины (рис. 46) можно определить величину ошибки исследуемой оптической поверхности, как отношение максимальной стрелки прогиба интерференционной полосы к шагу (периоду) полосы.

$$\Delta N = \Delta l / l.$$

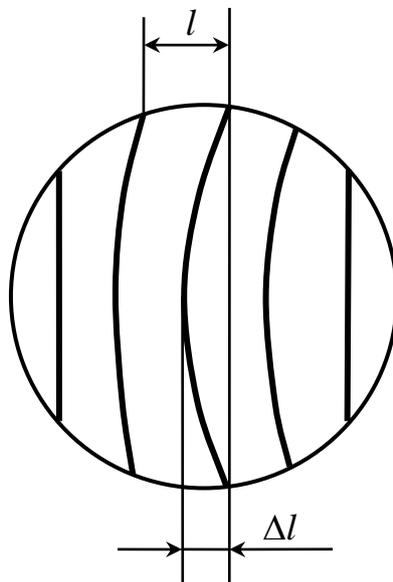


Рис. 46. Методика определения максимальной ошибки волнового фронта по интерферограмме исходя из оценки соотношения стрелки прогиба полосы с ее шагом

При визуальной оценке можно определить только максимальную деформацию и точность определения  $\Delta l$  не менее 0,1 ширины полосы. Для определения карты деформации волнового фронта необходимо

измерить величину прогиба в совокупности точек, составляющих ряд полос. При этом интерферограммы регистрируются в виде матрицы численных координат точек. Тогда можно определить величину прогиба интерференционных полос через координаты экстремальных точек с погрешностью не меньше одного пиксела.

В современных ПЗС-камерах значение одного пиксела составляет несколько микрометров, что ограничивает точность определения координат точек полос, которые служат для вычисления деформаций волнового фронта (рис. 47).

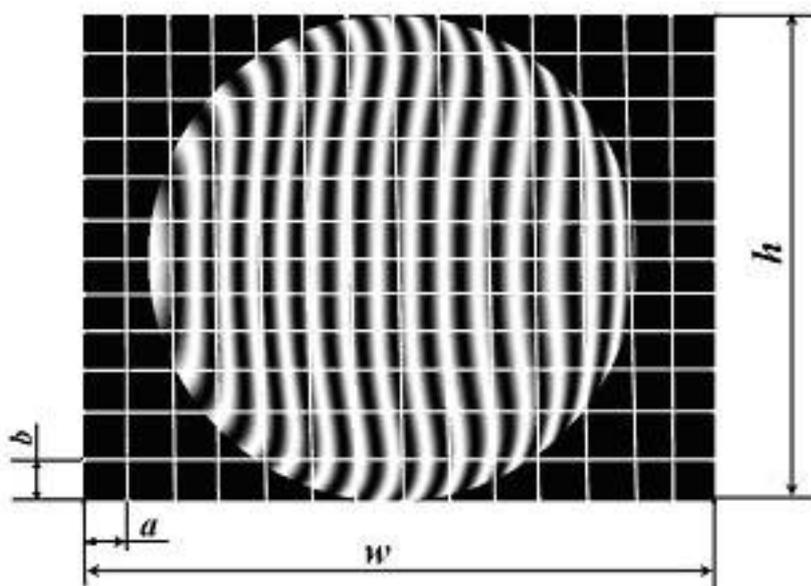


Рис. 47. Интерферограмма на ПЗС-матрице

Практика показывает, что для получения достаточно полной информации о волновом фронте нужно настраивать интерферометр так, чтобы получить примерно 15 интерференционных полос на изображении выходного зрачка. Если размеры ПЗС-матрицы составляют  $w \times h$ , то максимальная ширина одной полосы равна  $l = h/15$ . Погрешность при определении деформаций волнового фронта составит

$$\Delta N = \Delta l / l = 15b/h,$$

где  $b$  – размер пиксела.

Если разрешение ПЗС-матрицы, исходя из количества пикселей, является  $n \times m$ , то

$$b = h/m.$$

$$\text{Тогда } \Delta N = 15/m.$$

## Принципы обработки интерференционных картин

Компьютерная обработка интерференционных картин состоит из следующих этапов:

1. предварительная обработка интерферограммы с целью устранения шума;
2. определение центра и преимущественного направления полос;
3. отслеживание полос и расстановка точек на экстремумах.

Этапы работы программы, следующие:

1. сигнал, несущий информацию о структуре интерферограммы, вводится в программу из устройств регистрации изображения или с жесткого диска в виде файла. Если выполняется сдвиговая интерферометрия, то требуются две интерферограммы, полученные при выполнении сдвига последовательно по двум взаимно перпендикулярным направлениям;
2. после предварительной обработки, с целью повышения качества изображения, интерферограмма поступает в модуль оцифровки интерференционных полос, после чего она представлена совокупностью геометрических точек;
3. затем координаты точек поступают в модуль вычисления функции, характеризующей структуру волнового фронта исследуемой оптической системы. Этой функцией является функция деформаций волнового фронта, если обрабатывать классическую интерферограмму (рис. 48).

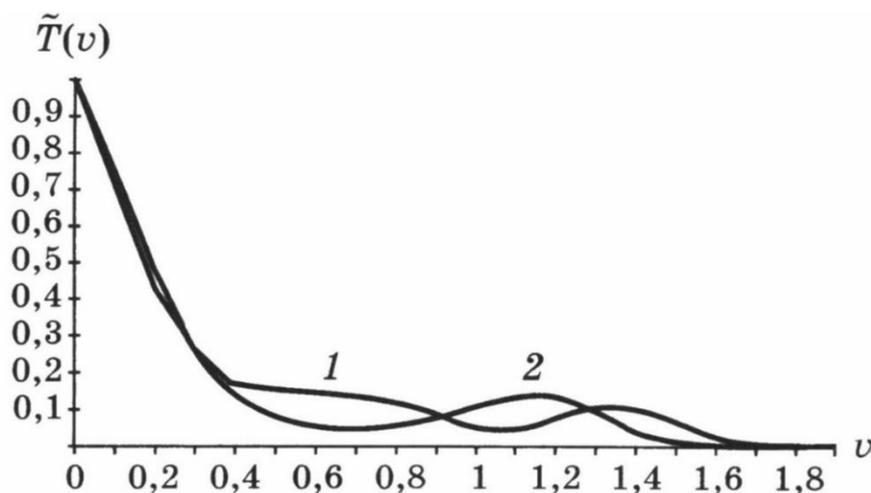


Рис. 48. ЧКХ исследуемого объектива, полученные при преобразовании Фурье-функции деформаций волнового фронта (график дан в каноническом масштабе по двум сечениям)

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрение совокупности работ позволяет наметить некоторые основные направления повышения качества контроля оптических систем в условиях производства:

1. внедрение новых принципов построения методов и средств контроля, открывающих возможности получения измерительных данных, недостижимых традиционными средствами и методами. Примерами могут служить метод изофотометрической фоторегистрации и интерферометр с рассеивающей пластинкой;
2. применение современных средств регистрации, обработки и интерпретации изображения, позволяющих фиксировать и подвергать всестороннему анализу большие объемы измерительной информации, намного превышающие возможности непосредственного человеческого восприятия. Особую, все возрастающую роль играют взаимодополняющие друг друга средства специальной фоторегистрации и прикладного телевидения;
3. использование современных достижений в области обработки изображений и ввода графической информации в компьютер для количественного анализа. Как видно из опыта повышения точности метода Гартмана и интерференционного метода, здесь имеются большие резервы снижения погрешностей измерений при одновременном уплотнении измерительной информации, значительной экономии машинного времени;
4. широкое применение компьютера при обработке измерительных данных создает условия для наиболее полного их использования при технологическом контроле и аттестации оптических систем. При этом резко возрастает производительность на операциях контроля, которые с повышением точности выпускаемой оптики требуют все большего объема трудозатрат;
5. широкое использование средств лазерной техники и голографии, открывающих пути развития новых методов и оптико-измерительных систем, усовершенствования традиционных систем и методов.

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

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Этапы изготовления оптической системы.
2. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований.
3. Прямые и косвенные способы оценки качества изображения.
4. Факторы, влияющие на прямые и косвенные способы оценки качества изображения.
5. Тест-объект «светящаяся точка».
6. Интерферометр Тваймана.
7. Оптические измерительные наводки.
8. Ограничения порога чувствительности оптического измерительного прибора.
9. Погрешности оптических измерительных наводок.
10. Практическая чувствительность поперечных наводок.
11. Методы повышения диапазона и точности оптических измерений.
12. Экспериментальная оценка качества изображения исследуемой системы.
13. Направления развития средств контроля и аттестации оптических систем и элементов.
14. Передача изображения через оптическую систему.
15. Критерии оценки качества оптического изображения.
16. Экспериментальное исследование качества оптического изображения.
17. Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния.
18. Фотографическая фотометрия.
19. Функция преобразования метода контроля оптической системы.
20. Методы фотоэлектрического сканирования изображения светящейся точки.
21. Классический ПЗС-формирователь изображения.
22. Методика видеофотометрии пятна рассеяния.
23. Метод изофотометрии.
24. Изофотометрия с изменяющимся временем накопления.
25. Телевизионная изофотометрия ФРТ.
26. Компьютерный метод измерения ФРТ по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления.
27. Математические основы метода компьютерной изофотометрии ФРТ с изменяющимся временем накопления.
28. Алгоритм выделения изофоты.
29. Алгоритм определения ФРТ.

30. Структура и компоненты программы «КИЗО».
31. Установка контроля качества изготовления оптических систем на основе программы «КИЗО-ФРТ».
32. Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния.
33. Компьютерная изофотометрия ФРЛ с изменяющимся световым потоком.
34. Алгоритм определения ФРЛ по методу изофотометрии.
35. Структура и компоненты программы «КИЗО-ФРЛ».
36. Обработка изображения с помощью программы «КИЗО-ФРЛ».
37. Экспериментальные исследования качества изображения объектива по ФРЛ.
38. Устройство интерферометра с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом.
39. Методика проведения измерений на интерферометре с дифрагированным эталонным (опорным) волновым фронтом.
40. Принципы обработки интерференционных картин.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Часть 1. Введение и общие вопросы. Точность оптических измерений. Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Университет ИТМО, 2016. – 49 с.
2. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Часть 2. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. Учебное пособие. – 2-е изд., стер. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 65 с.
3. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Часть 4. Оценка качества оптического изображения и измерение его характеристик. Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2017. – 86 с.
4. Кирилловский В.К., Точилина Т.В. Оптические измерения. Часть 5. Аберрации и качество изображения. Учебное пособие. – СПб.: Университет ИТМО, 2019. – 94 с.
5. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. – М.: Машиностроение, 1987. – 264 с.
6. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. – М.: Машиностроение, 1978. – 224 с.
7. Кирилловский В.К. Контроль качества объективов. Учебное пособие. – Л.: ЛИТМО, 1984. – 70 с.
8. Кирилловский В.К., Ле Зуи Туан. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для аппаратуры контроля качества изображения оптических систем // Изв. вузов. Приборостроение. – 2007. – Т. 50. – № 7. – С. 52–56.
9. Вейко В.П., Вознесенский Н.Б., Воронин Ю.М., Дряхлушин В.Ф. Ближнепольные оптические зонды: методы изготовления, основные характеристики и контроль аппаратуры // Оптический журнал. – 1998. – Т. 65. – С. 31–57.
10. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 231 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>3</b>
<b>РОЛЬ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, ИЗМЕРЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ.....</b>	<b>6</b>
Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований.....	6
<b>ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ.....</b>	<b>8</b>
Анализ ФРТ.....	8
Интерферограмма .....	10
<b>ТРАДИЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ НАВОДКИ.....</b>	<b>13</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОПЕРЕЧНЫХ НАВОДОК.....</b>	<b>18</b>
<b>СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ДИАПАЗОНА И ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</b>	<b>21</b>
<b>ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ.....</b>	<b>27</b>
<b>КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ.....</b>	<b>31</b>
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ.....</b>	<b>34</b>
Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния...	34
Фотографическая фотометрия.....	34
<b>МЕТОДЫ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СКАНИРОВАНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ СВЕТЯЩЕЙСЯ ТОЧКИ.....</b>	<b>40</b>
<b>ВИДЕОМЕТОД.....</b>	<b>41</b>
Классический ПЗС-формирователь изображения.....	41
Методика видеофотометрии пятна рассеяния.....	43
<b>МЕТОД ИЗОФОТОМЕТРИИ.....</b>	<b>47</b>
Изофотометрия с изменяющимся временем накопления.....	48
<b>КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ С НАКОПЛЕНИЕМ.....</b>	<b>51</b>

Телевизионная изофотометрия ФРТ.....	51
Компьютерный метод измерения ФРТ по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления.....	54
<b>РАЗВИТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ ФРТ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВРЕМЕНЕМ НАКОПЛЕНИЯ.....</b>	<b>59</b>
Математические основы.....	59
Алгоритм выделения изофоты.....	62
Алгоритм определения ФРТ.....	64
<b>ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ «КИЗО».....</b>	<b>66</b>
Установка. Конструкция и работа установки.....	68
Тест-объект.....	69
Микрообъектив.....	70
Экспериментальные исследования структуры пятна рассеяния....	70
Выводы.....	74
<b>КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ ФРЛ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ.....</b>	<b>75</b>
Математические основы.....	75
Алгоритм определения ФРЛ по методу изофотометрии.....	76
Программа «КИЗО-ФРЛ».....	77
Установка. Конструкция и работа установки.....	79
Расчет основных узлов в схеме установки.....	79
Тест-объект.....	80
Микрообъектив.....	80
Фотометрический клин.....	81
Экспериментальные исследования качества изображения объектива по ФРЛ.....	82
<b>ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С ДИФРАГИРОВАННЫМ ЭТАЛОННЫМ (ОПОРНЫМ) ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ.....</b>	<b>84</b>
Устройство.....	84
Методика проведения измерений.....	86
Принципы обработки интерференционных картин.....	88
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....</b>	<b>89</b>
<b>ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ.....</b>	<b>90</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА.....</b>	<b>92</b>

**Владимир Константинович Кирилловский  
Татьяна Вячеславовна Точилина**

**Оптические измерения.  
Часть 6. Инновационные направления в  
оптических измерениях и исследованиях  
оптических систем  
Учебное пособие**

В авторской редакции

Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

Зав. РИО

Н.Ф. Гусарова

Подписано к печати

Заказ № 4394

Тираж 20

Отпечатано на ризографе

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