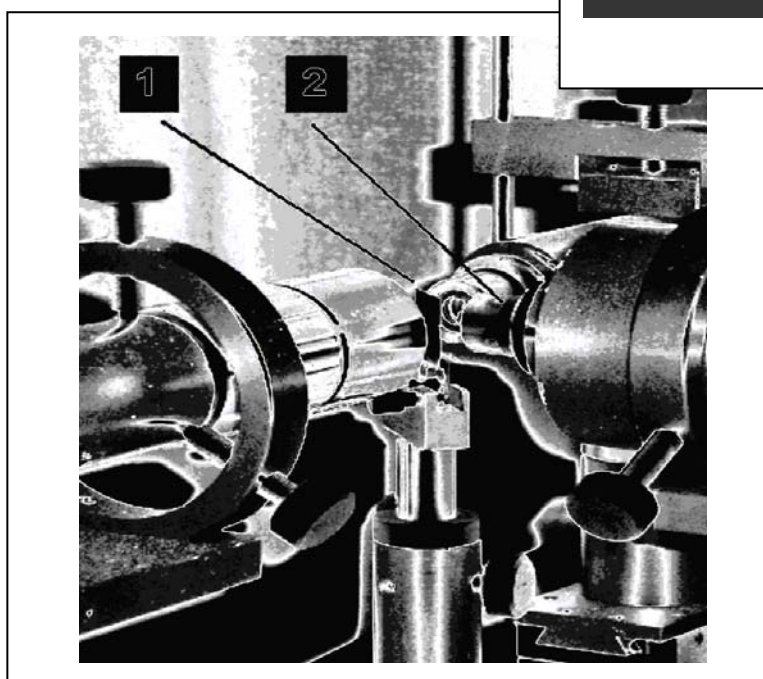
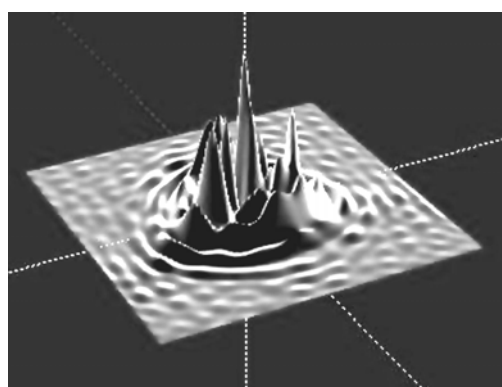


**В.К.Кирилловский, Ле Зуи Туан**

## **ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

**Часть 6**



**Санкт - Петербург**

**2008**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

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

КАФЕДРА ПРИКЛАДНОЙ И КОМПЬЮТЕРНОЙ ОПТИКИ

В.К.Кирилловский, Ле Зуи Туан

## **ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ**

Часть 6

Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях  
оптических систем



Санкт-Петербург

2008

УДК 535.317.2.

В.К.Кирилловский, Ле Зуи Туан. Оптические измерения. Часть 6.

Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях оптических систем

СПб ГУ ИТМО. 2008.- 131 с.

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

В Части 6 рассматриваются 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. В пособии 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.

Одобрено на заседании кафедры Прикладной и компьютерной оптики .....  
..... 2006 г., протокол N .....

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

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

2006

©В.К.Кирилловский  
2006

## 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, даваемого 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 (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, дифракционных изображений светящейся точки или линии и т.д.

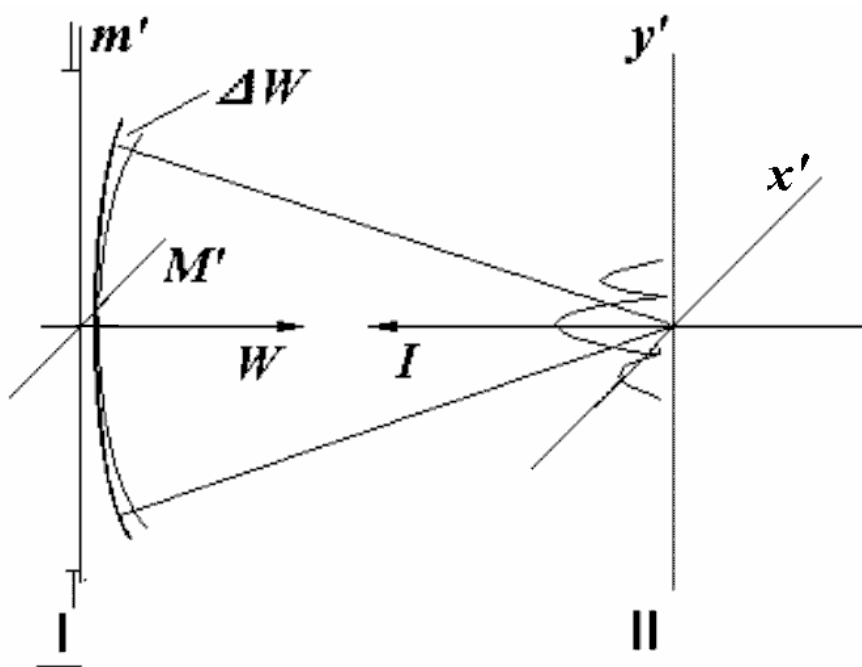


Рис. 1. Обобщенная схема комплекса методов оптических измерений и исследований

## **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).

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

Рассмотрим волновой фронт, сформированный исследуемым оптическим элементом в схеме контроля (рис.1).

Здесь  $M'$  и  $m'$  - координаты на выходном зрачке оптического элемента в схеме,

$x'$  и  $y'$  - координаты в плоскости изображения тест-объекта,

$W$  – координата формы волнового фронта;

$I$  - относительная освещенность в изображении тест-объекта.

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

1) В зоне изображения 2; 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 изображения первого рода**, *подобное объекту и несущее информацию в первую очередь о его геометрических параметрах и внешней структуре.*

2) В зоне зрачка 1; 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 аберрациях 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*[1].

## **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, то есть 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 в изображении точечного тест объекта служат на практике количественными характеристиками качества изображения оптической системы.

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

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

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

К таким факторам относятся:

- мелкоструктурные дефекты оптических поверхностей (например, возникающие при ретуши крупногабаритной оптической поверхности малым полировальником), а также их остаточная шероховатость;
- мелкоструктурные дефекты оптических сред (свилы, неоднородности, включения, мутность);
- дефекты оптических покрытий,
- дефекты склеек,
- рассеянный свет в системе,
- блики в оптической системе,

- свет, отраженный от элементов оправы оптической системы и элементов внутренней конструкции оптического прибора.

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

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

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**.

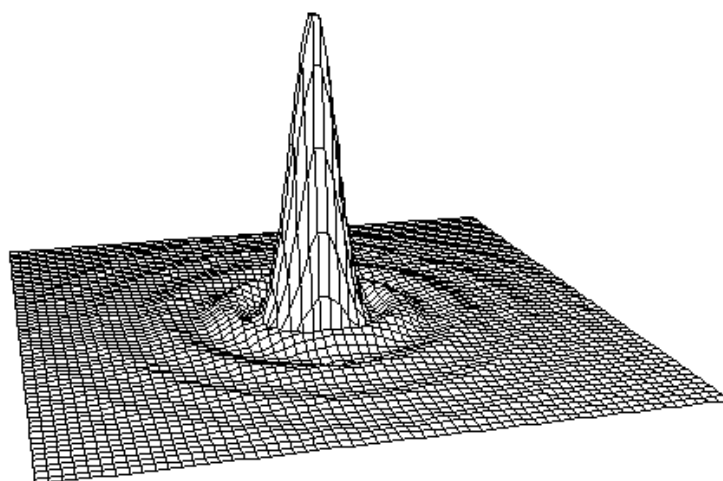
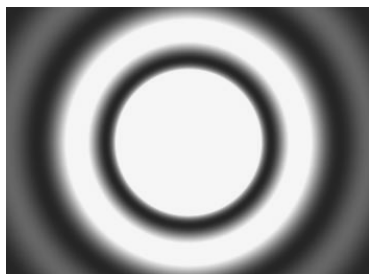


Рис.2. Дифракционный кружок

Рис.3. Функция рассеяния точки

Наблюдение дифракционного кружка, формируемого исследуемой системой, позволяет обнаруживать аберрации 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).

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

т.д. С помощью ФРТ в осредненной и мгновенной форме можно учитывать флюктуации оптических характеристик воздушного тракта, непрерывно изменяющиеся во времени по сложному случайному закону. ФРТ позволяет надежно аттестовать качество изображения системы с несколькими зрачками. ФРТ, являясь первичной характеристикой качества изображения, позволяет перейти к другим требуемым характеристикам качества изображения, таким как ФРЛ, 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 [1] сообщил о методе интерферометрии aberrаций объективов и ошибок оптических поверхностей. Суть состояла в сравнении плоского опорного волнового фронта с фронтом от исследуемой системы или поверхности, форма которого приведена к плоской для случая отсутствия ошибок. Таким образом проблема исследования оптической системы ставится как задача непосредственного выявления и измерения деформаций, претерпеваемых поверхностью волнового фронта. Интерферометрия позволяет, при точно сфокусированном интерферометре, получить интерференционную картину, подобную топографической карте профиля ошибок исследуемой волновой поверхности, где горизонталы (изолинии уровня) представлены в виде полос с интервалом, кратным длине световой волны.

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

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

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

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

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



Такие решения экономически неоправданны 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.

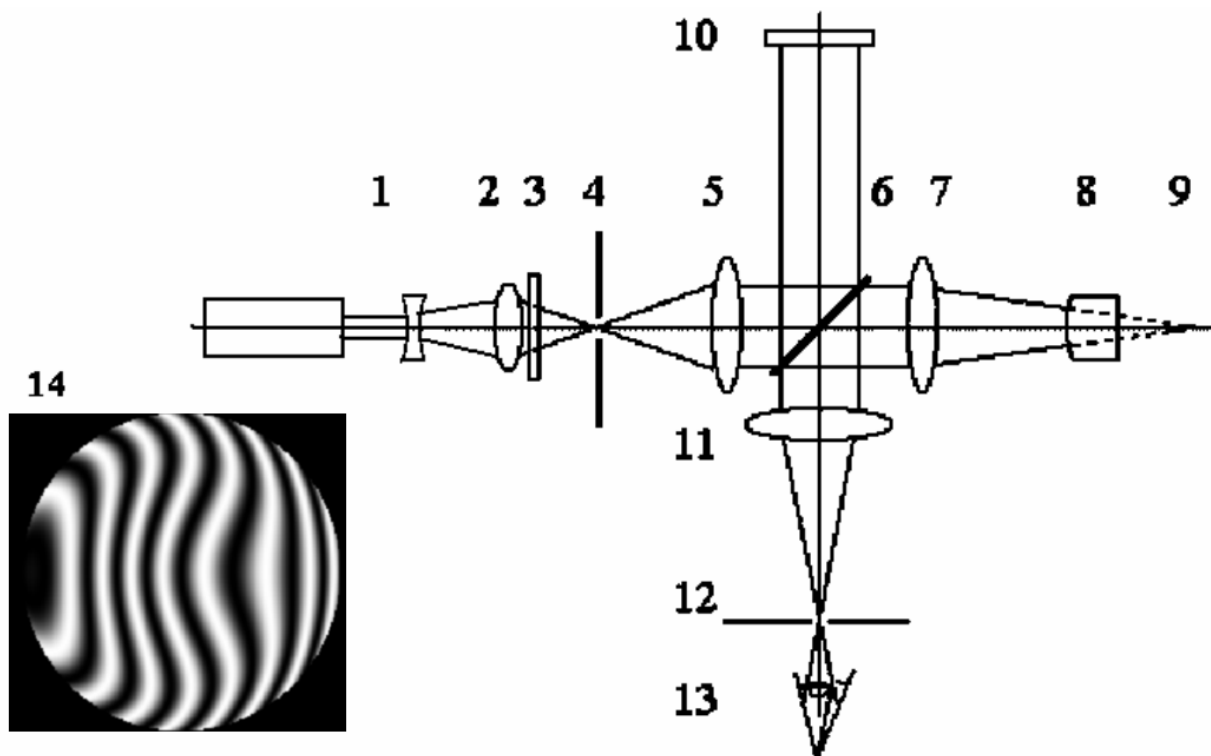


Рис.4. Интерферометр Тваймана для исследования объектива

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

## ТРАДИЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ НАВОДКИ

Основное свойство оптического прибора - построение оптического изображения.

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

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

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

чувствительной площадке приемника изображения (при визуальных измерительных наводках – на сетчатке глаза).

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

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

Продольная наводка - совмещение двух оптических измерительных изображений вдоль оптической оси.

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

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

Однако, в силу действия дифракционных явлений в процессе формирования любого оптического изображения, существует явление фундаментальной нерезкости оптического изображения (даже при использовании оптической системы, в которой практически отсутствуют 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 [2] .

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, то есть совмещения, элементов двух изображений:

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

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

Оптическое измерительное изображение марки строится окуляром оптического измерительного прибора.

Например, при измерительной наводке визирным микроскопом на край изображения предмета, мы имеем: (а) - изображение края и (б) - изображение перекрестия окулярной сетки, наблюдаемое в окуляр.

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

Часто в оптических измерительных наводках участвует изображение шкалы. Напомним, что физическая величина выражается 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, то есть к определению длин и углов. Даже в опто-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.

Поэтому изображение марки для приемника (в том числе и для глаза) обычно является совершенно резким, то есть 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, то есть созданного прибором, оптического изображения, в заданном направлении с применением приемников - анализаторов изображения, в том числе и компьютерных.

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

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

Чувствительность измерительного прибора, оснащенного идеальной (безабберационной) оптической системой, в принципе обусловлена (ограничивается) геометрическими параметрами дифракционного изображения объекта. Зная, от чего зависит размер такого изображения, можно сконструировать или правильно выбрать для выполнения измерений прибор, обладающий заданной точностью (см., например, [3]).

Распределение интенсивности оптического излучения, обусловленное влиянием дифракции, характеризуется плавными функциональными зависимостями (например, ФРТ, ФРЛ или структура изображения линейной решетки) [1]. 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, то есть 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 идеальной (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, то есть отклонения волновой поверхности на краю зрачка (рис. 5).

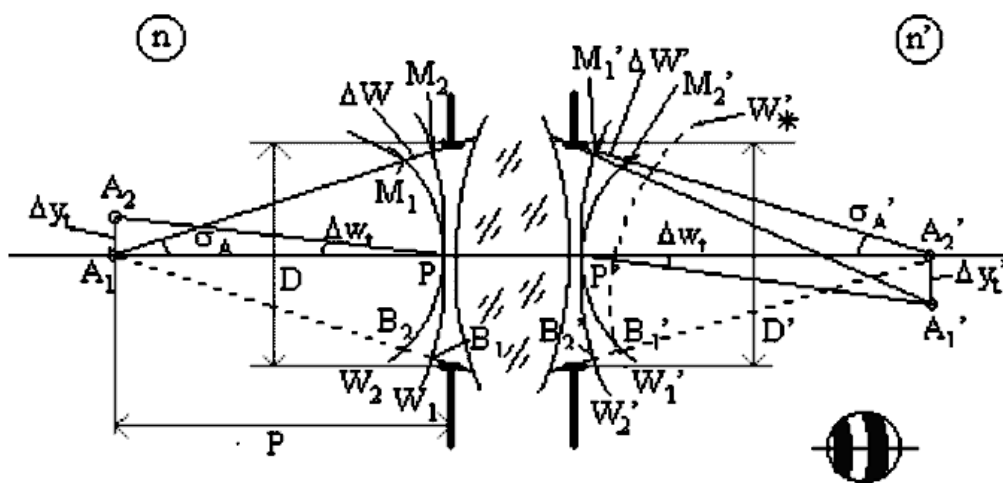


Рис. 5. Порог чувствительности определяется смещением предмета и, соответственно, изображения

## **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, 3].

Поперечная наводка предусматривает выполнение следующих операций:

- смещения изображения анализатора (например, сетки) относительно изображения элемента объекта;
- фиксации момента совмещения этих двух изображений;
- выполнения измерительного отсчета, то есть 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.

Например: совмещение штриха с биссектором характеризуется формированием суммарного изображения, структура которого показана в [1]. 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 (см. табл.1).

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.2 цифры с угловым разрешением глаза; она при диаметре зрачка, равном 2 мм составляет:

$$\varphi_{\text{гл}} = (120/2)'' = 60'' \quad (1)$$

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

Таблица 1

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

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

$$\tau_{\text{гл}} = (0.5 - 0.1) \varphi_{\text{гл}}. \quad (2)$$

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 [1], 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  $\Delta E_{\text{П}}$  двух смежно расположенных полей очень высока:

$$\Delta E_{\text{П}} = (0,02 - 0,03) \quad (3)$$

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

$$\tau = (0.5 - 0.1) \varphi \quad (4)$$

где  $\varphi$  - угловой предел разрешения прибора (15).

Или, в линейной мере для плоскости объекта

$$T = (0.5 - 0.1) \varepsilon_{\text{р}} \quad (5)$$

где  $\varepsilon_{\text{р}}$  - линейный предел разрешения прибора для плоскости предмета.

В среднем, если коэффициент принять равным 1/6, получим

$$T = (1/6) \varepsilon_{\text{р}} = 0.29/6A, \quad (6)$$

то есть:

$$T=0.05/A, \text{ мкм} \quad (7)$$

Для зрительных труб  $\tau = (120/6D_p)''$ , или

$$\tau = (20/D_p)'' \quad (8)$$

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

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

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

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

Наличие остаточных aberrаций у оптической системы прибора снижает чувствительность наводок. Опыт показывает [3], что если наличие у зрительной трубы волновой сферической aberrации и вторичного спектра до  $1\lambda$  практически не снижает чувствительность поперечных наводок, то уже при aberrациях в  $2\lambda$  она уменьшается в 1,5 раза.

## **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, 3], 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 aberrаций 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 испытателя. Кроме того, визуальные методы нельзя использовать для непосредственного определения оптических характеристик объективов, применяемых для создания изображения в невидимой области спектра.

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

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 все более высокого качества.

Одновременно развиваются и средства контроля оптических параметров. Все более широко применяются методы, позволяющие получить полную топограмму формы волнового фронта. ЭВМ дают возможность путем расчета предсказать большинство параметров системы, 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 ЭВМ, большого объема кропотливых и трудоемких работ. Подчас на практике затруднительно продолжать эту работу за пределами того этапа, на котором получается удовлетворительное качество.

До недавнего времени не было экспериментальных средств, при помощи которых можно было бы точно определить распределение энергии в пятне рассеяния [4]. А это значит, что невозможно было установить, какое распределение освещенности в пятне рассеяния соответствует оптимальному качеству изображения того объекта, для регистрации которого предназначена данная система.

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

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

Далее возможны три способа оценки:

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

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

3) можно рассчитать распределение освещенности в изображении светящейся точки.

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

По распределению освещенности в дифракционном изображении точки можно судить о разрешающей силе. В то же время, по указанным выше

причинам, всегда сохраняется необходимость экспериментальных оценок качества изображения исследуемой системы, которые могут быть выполнены, например, следующими способами [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, 5, 12];

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

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. Поэтому полученные результаты, несмотря на их численную форму, пригодны лишь для сравнительной качественной оценки в сопоставимых условиях, чаще всего для наблюдения изменений структуры изображения в ходе обработки данной поверхности.

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

Оценивая форму центрального максимума и дифракционных колец, судят о характере aberrаций системы. Дифракционный кружок системы, удовлетворяющей критерию Релея, т.е. имеющей отклонение волнового фронта от сферической формы не более чем на  $\lambda/4$ , содержит центральный максимум и одно различимое дифракционное кольцо правильной круглой формы, без 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 (АСУ ТП) изготовления оптических деталей и систем. Эти задачи успешно решаются благодаря все более широкому применению средств, рожденных современными научно-техническими достижениями: лазеров, научной и прикладной фотографии, цифровой фотографии, телевизионной техники, устройствам связи с ЭВМ, средств компьютерных технологий.

Таким образом, речь идет о постепенной замене существующих отдельных контрольных операций, часто дающих субъективные и недостаточно полные данные, на сквозной канал контроля при помощи специализированной оптико-

измерительной системы, автоматизированной на большинстве стадий получения и переработки данных.

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

## **ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ**

Значение функции рассеяния  $h(x',y')$ , характеризующей закономерность распределения освещенности в изображении светящейся точки, дает возможность рассчитать распределение интенсивности в изображении  $I(x',y')$  при заданном распределении яркости объекта  $O(x,y)$  [1, 4].

Изображаемый предмет рассматривается как совокупность светящихся точек при некоторых исходных условиях [2].

Распределение освещенности в плоскости изображения есть свертка функций распределения освещенности в объекте и в пятне рассеяния оптической системы.

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

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

$f(y)$  можно записать как:

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

где  $F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(y) e^{-i\omega y} dy$ ,  $\omega = 2\pi\nu$  - 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:

$$O(\mu, \nu) = \int_{-\infty}^{\infty} \int o(x, y) e^{-2\pi i(\mu x + \nu y)} dx dy. \quad (9)$$

Эту операцию можно записать сокращенно:

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

Аналогично для функции двумерного изображения и для

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

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

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

$$i(\mu, \nu) = o(\mu, \nu) D(\mu, \nu), \quad (10)$$

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

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

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

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

Теперь рассмотрим более подробно оптическую передаточную функцию. Из уравнения (10) видим, что преобразование Фурье распределения освещенности в изображении  $i(\mu, \nu)$  отличается от преобразования Фурье функции распределения яркости в объекте  $o(\mu, \nu)$  коэффициентом  $D(\mu, \nu)$ , который назван оптической передаточной функцией (ОПФ) и является

преобразованием Фурье от ФРТ. Таким образом, ОПФ может быть представлена в виде:

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

Для одномерного тест-объекта (освещенной щели) имеем:

$$D(\mu) = \int_{-\infty}^{\infty} h(y) e^{-2\pi i\mu y} dy \quad (12)$$

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:

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

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

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

Модуль ОПФ характеризует способность системы передавать контраст объекта при изображении структур различной частоты и называется модуляционной передаточной функцией (МПФ) или частотно-контрастной характеристикой (ЧКХ) системы. Вторая часть выражения является аргументом ОПФ

$$\varphi(\mu) = \arg d_{\bar{E}}(\mu),$$

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

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

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

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

Распределение освещенности в изображении объекта

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

Выражения (13) и (15) отличаются появлением фазового угла  $\varphi$ , показывающего смещение изображения - фазовый сдвиг, и изменением амплитуды  $b_I$  в  $T_\mu$  раз.

Используем формулу для определения контраста синусоидального объекта:

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

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

Определим контраст объекта

$$K_O = \frac{b_1}{b_0}$$

Для изображения

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

отсюда коэффициент изменения амплитуды

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

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

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

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

## **КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ**

Практика оценок оптических систем в условиях их 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 1мм длины изображения:

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

где  $A'$  - задняя апертура исследуемой системы.

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

Для оценки по частотным критериям пользуются 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 кино-объективы, 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.

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

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

Критерий вычисляется по формуле

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

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

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

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

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

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

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

$$L_K = \frac{F_d}{F} \quad (20)$$

$$F_d = \int_0^{\frac{d}{2}=r} h(r) r dr \quad (21)$$

где  $D(r)$  – ФРТ.

С другой стороны, вся энергия в пятне рассеяния:

$$F = \int_0^{\frac{d}{2}=r} h(r) r dr \quad (22)$$

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

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

## **ЭКПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ 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, согласующиеся с визуальным восприятием изображения.

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

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

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

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

Традиционные методы экспериментального исследования и измерения ФРТ и ФРЛ реальных оптических систем обобщенно можно распределить 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 [4].

## Фотографическая фотометрия

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

1) двумерное воспроизведение исследуемой картины весьма доступным и надежными средствами, стабильность изображения во времени, возможность получения неограниченного количества копий;

2) простота системы регистрации, возможность переноса процесса анализа данных с рабочего места в цехе на универсальную лабораторную аппаратуру обработки изображения и ввода данных в ЭВМ;

3) возможность накопления световой энергии, регистрации малых световых потоков; возможность статистического осреднения освещенности по заданному отрезку времени (таким путем в методе Гартмана устраняются ошибки, вносимые атмосферной турбуляцией);

4) возможность обработки измерительных данных на устройствах двумерной обработки информации;

5) использование самого фотопроцесса в режиме двумерного преобразования информации; квантование по уровням плотности; выделение линий равной плотности; фильтрация пространственных частот при фотообработке; устранение оптических шумов, т.е. приведение измерительной информации к виду, оптимальному для ввода в ЭВМ.

Рассмотрим основные характеристики фотографического процесса применительно к задаче исследования структуры оптического изображения. Светочувствительность фотоприемника 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:

$$H = Et \quad (23)$$

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).

Вся характеристическая кривая может быть разделена на четыре участка. Качало характеристической кривой с постоянным почернением небольшой плотности - так называемая вуаль, которая появляется после проявления на участках фотоматериала, не подвергшихся действию света. Область недодержек характеризуется нелинейной зависимостью плотности от экспозиции. Рабочая часть - прямолинейный участок - характеризуется зависимостью

$$D_{\Pi} = \gamma \lg(Et) \quad (24)$$

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

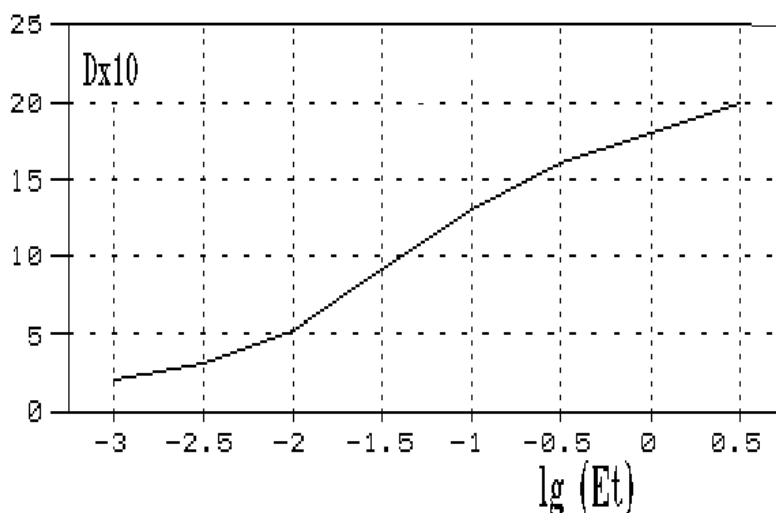


Рис.6. Характеристическая кривая фотографического материала

На практике, как правило, в выражении (24) значение  $t = \text{const}$ , т.е. экспонируется все изображение целиком и время экспозиции всех его участков одинаково. В этом случае характеристическая кривая отражает зависимость:

$$D_{\Pi} = f(\lg E), \quad (25)$$

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

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

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

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

Спроецируем линейный участок на ось  $\lg E$  графика распределения освещенности. Как видно из рис. 7, диапазон пропорционального воспроизведения не позволяет произвести регистрацию распределения освещенности в идеальном дифракционном кружке. В этот диапазон  $\Delta \lg E$ , называемый фотографической шириотой 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, требуется не менее двух снимков для того, чтобы воспроизвести распределение освещенности идеальной дифракционной точки на фотоматериале.

Для восстановления по фотографическим изображениям функции распределения освещенности в оптическом изображении, прежде всего измеряют распределение оптической плотности в фотоизображении, используя для этой цели микрофотометр. 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  $D_{II}(y')$ . Далее, исходя из характеристической кривой, по значениям плотностей определяют уровни освещенности, после чего график  $D_{II}(y')$  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  $D_{II}=f(E)$ . 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  $D_{II}=f(\lg E)$ .

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. 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. 1.6 показаны кривые ЧКХ фотообъектива, вычисленные по ФРТ, определенной для различных диапазонов освещенности.

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

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

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 светящейся точки**

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

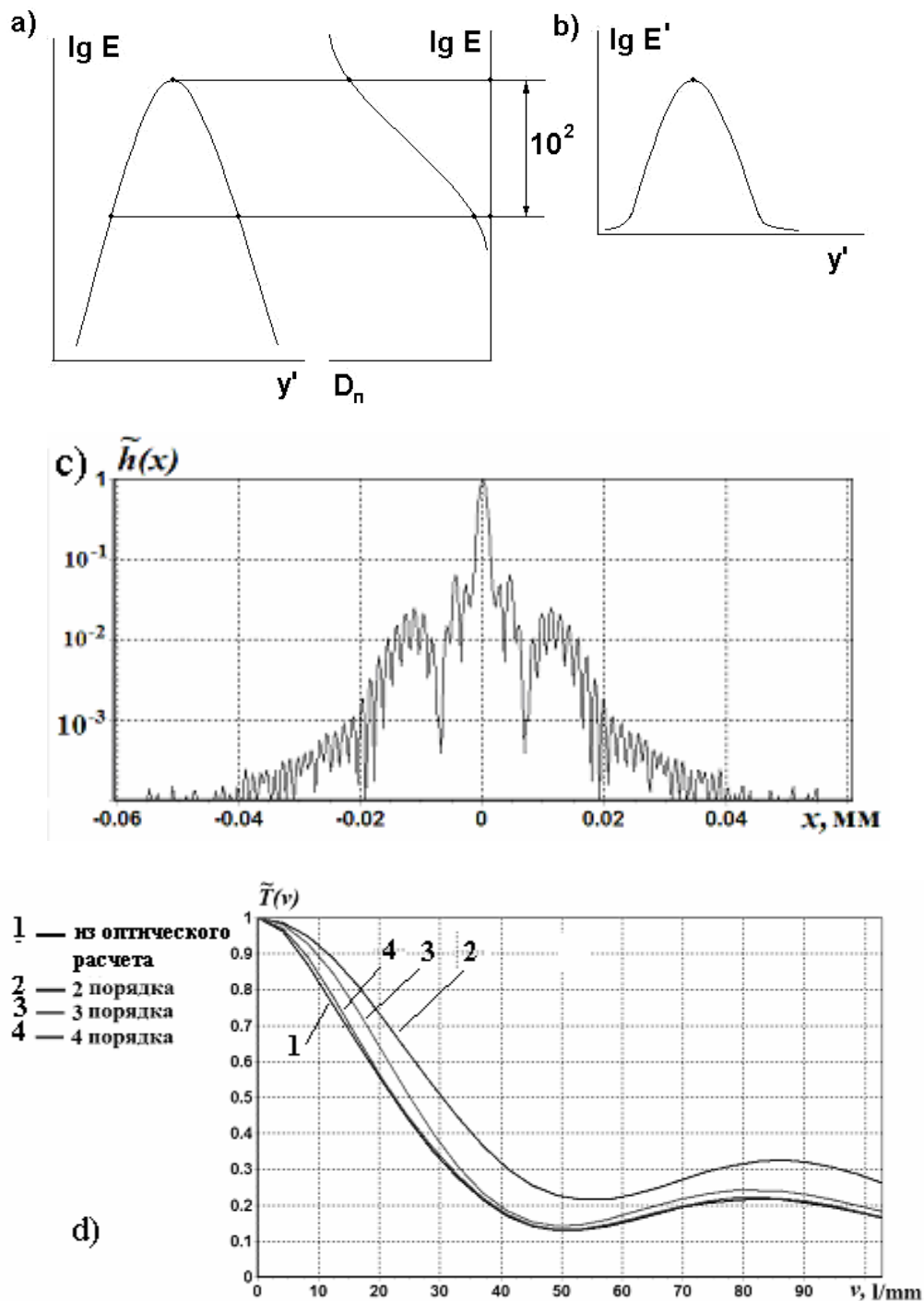


Рис. 7. Схема метода фотографической фотометрии пятна рассеяния для определения ФРТ.  
 а) ограничение регистрируемого диапазона интенсивностей пятна рассеяния протяженностью рабочего участка световой характеристики приемника изображения; б) результат регистрации ФРТ в условиях ограниченного динамического приемника изображения; в) ФРТ фотообъектива Гелиос-44 в логарифмическом масштабе; д) ЧКХ, вычисленные по ФРТ, измеренной при различном диапазоне освещенностей



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 [4, 9, 15] 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.

## **ВИДЕО МЕТОД**

### **Введение в 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. 8). Каждая из них способна хранить фотогенерированный электронный заряд.

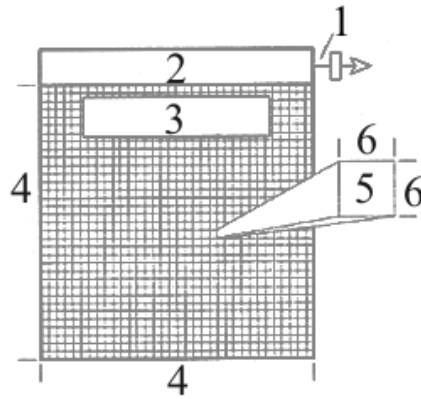


Рис. 8. Типичный матричный фотоприемник ПЗС для научных исследований.

1 - выходной усилитель; 2 - последовательный регистр; 3 - параллельный регистр (262144 пиксела); 4 - 52 пикселов (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.

$$Q_c \div H_0 = \int_0^{T_n} E(t) dt \quad (26)$$

где  $H_0$  – экспозиция оптического излучения, лк·с;

$T_n$  – 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  $D$ .

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

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

Однако указанная линейная зависимость остается справедливой, пока ПЗС не достигнет уровня накопления, близкого к режиму насыщения  $Q_c \leq 0,7 \div 0,8 Q_{нас}$  (рис. 9). За пределами рабочего линейного участка световой характеристики уровень серого непропорционально уровню освещенности, причем отклонение от пропорциональности изменяется по нелинейному закону. Поэтому 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 2-х порядков) интенсивность изображения не регистрируется и информация о структуре ФРТ оказывается потерянной.

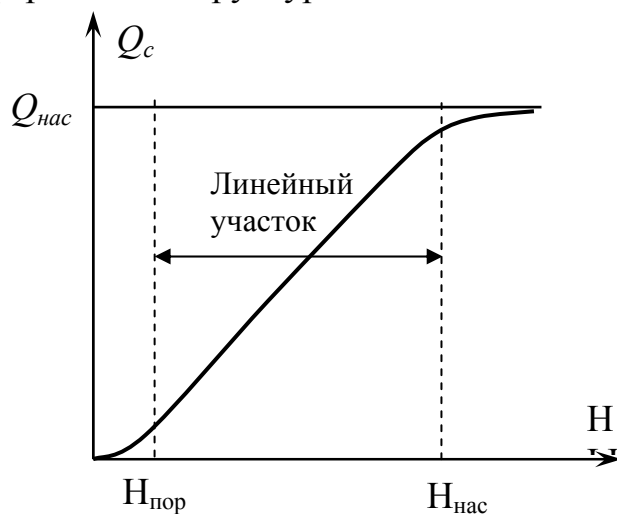


Рис.9 . Характеристика накопления ПЗС – фотоприемника

### Методика видео-фотометрии 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 должен быть зарегистрирован фотометрический клин с известным законом изменения плотности. Анализ полученного изображения дает соотношение между освещенностями и уровнями серого (рис. 10)

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

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

Спроецируем линейный участок на ось  $lgE$  графика распределения освещенности. Как видно из рис. 7а, диапазон пропорционального воспроизведения не позволяет произвести регистрацию распределения освещенности в идеальном дифракционном кружке.

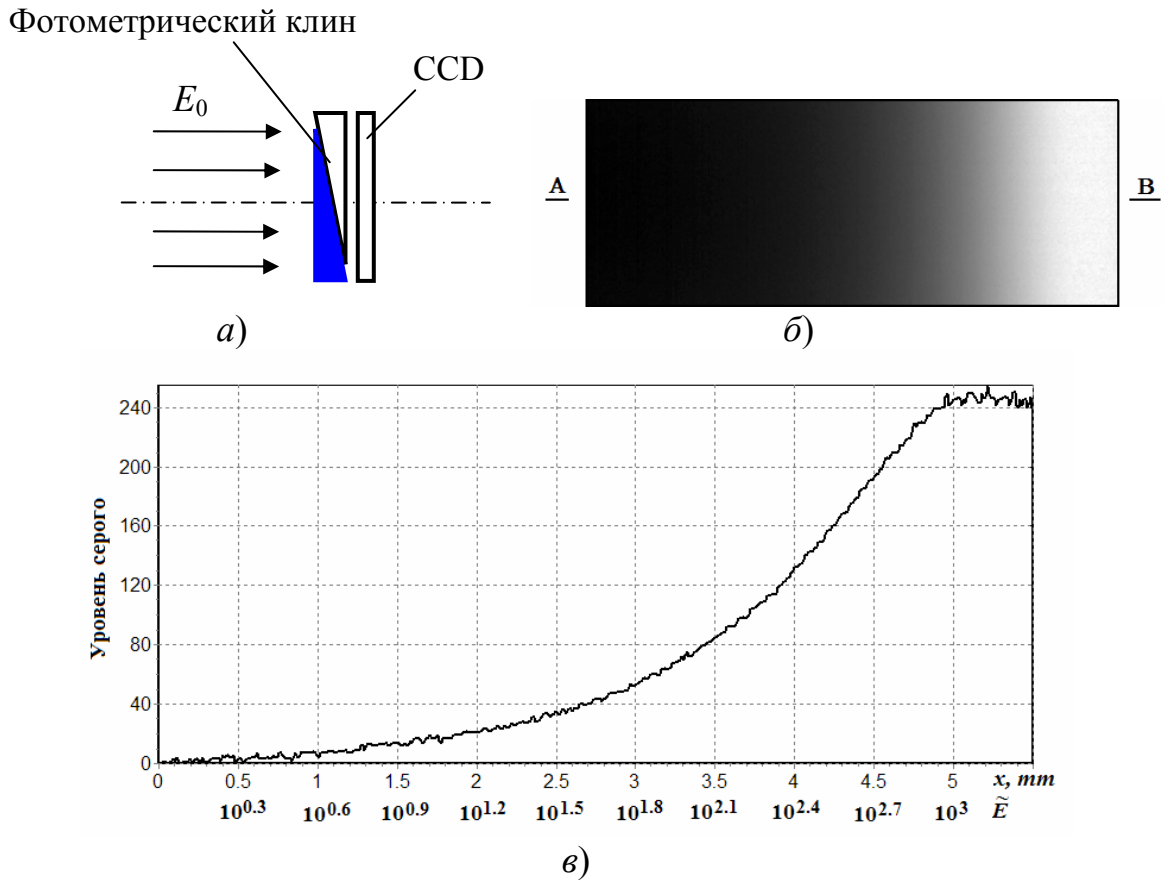


Рис. 10. Исследование световой характеристики матрицы  
 а) схема регистрации фотометрический клин; б) полученное изображение; в)  
 фотометрическая структура в сечении АВ и соответствие освещенности, модулируемой  
 клином.

В этот диапазон  $\Delta \lg E$ , называемый фотографической шириотой 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. 12 в). Таким образом, требуется не менее двух снимков для того, чтобы воспроизвести распределение освещенности идеальной дифракционной точки на фотоматериале.

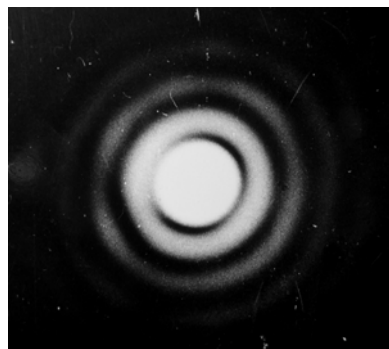


Рис. 11. Дифракционный кружок, близкий к идеальному

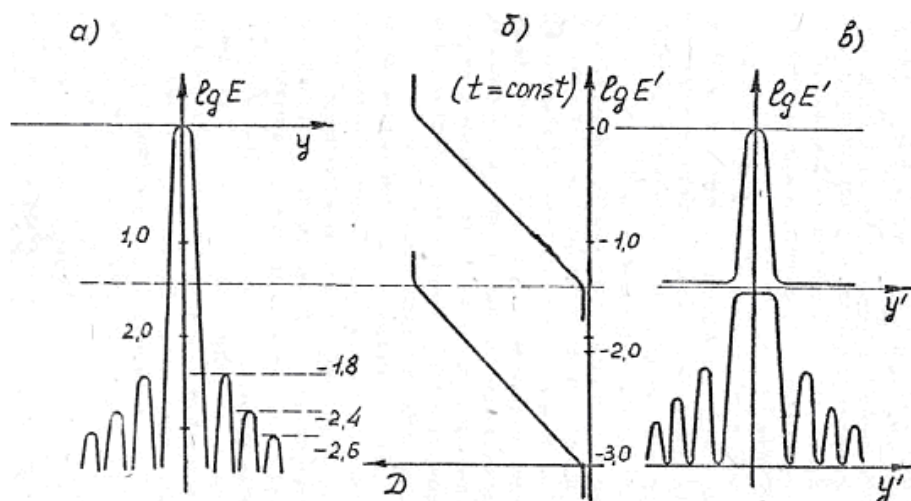


Рис. 12. Схема фотографической фотометрии дифракционного кружка

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. 12). Эта величина для реальных ПЗС соответствует перепаду регистрируемых освещенностей на величину, не превышающую  $10^2$ .

В то же время, как показывают исследования (рис.7 - d), 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 в мире телескопа БТА и ряда других крупных астрономических систем [4, 24]. Эти методы нашли применение для контроля (по функции концентрации энергии в пятне рассеяния) оптических материалов, проведения контроля оптики прецизионных микроскопов, оптических систем для фокусировки лазерных пучков, объективов для передающей телевизионной аппаратуры, для микролитографии и других различных оптических систем.

Изобразим в логарифмическом масштабе распределение относительной освещенности, полученное от объекта (рис. 13). Наложим на изображенную совокупность распределений шкалу равномерно и достаточно часто расположенных фотометрических сечений. 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  $D_{II}=f(\lg E)$  при  $H=Et=const$ , где  $t$  - время.

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

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

## **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. 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 ФУНКЦИЮ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ (ФП) типа "гребенка" (по латински - COMB) (рис. 13). 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  $D_{II} = f(\lg E)$  при  $t = \text{const}$  каждой отдельной кривой соответствует соотношение из следующей серии:

$$E_1 = H/t_1; \quad E_2 = H/t_2 \dots \quad E_n = H/t_n \quad (27)$$

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

$$E_{отн} = H/t_{отн}; \quad (28)$$

или, в логарифмической форме

$$-\lg E_{отн} = \lg t_{отн}$$

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

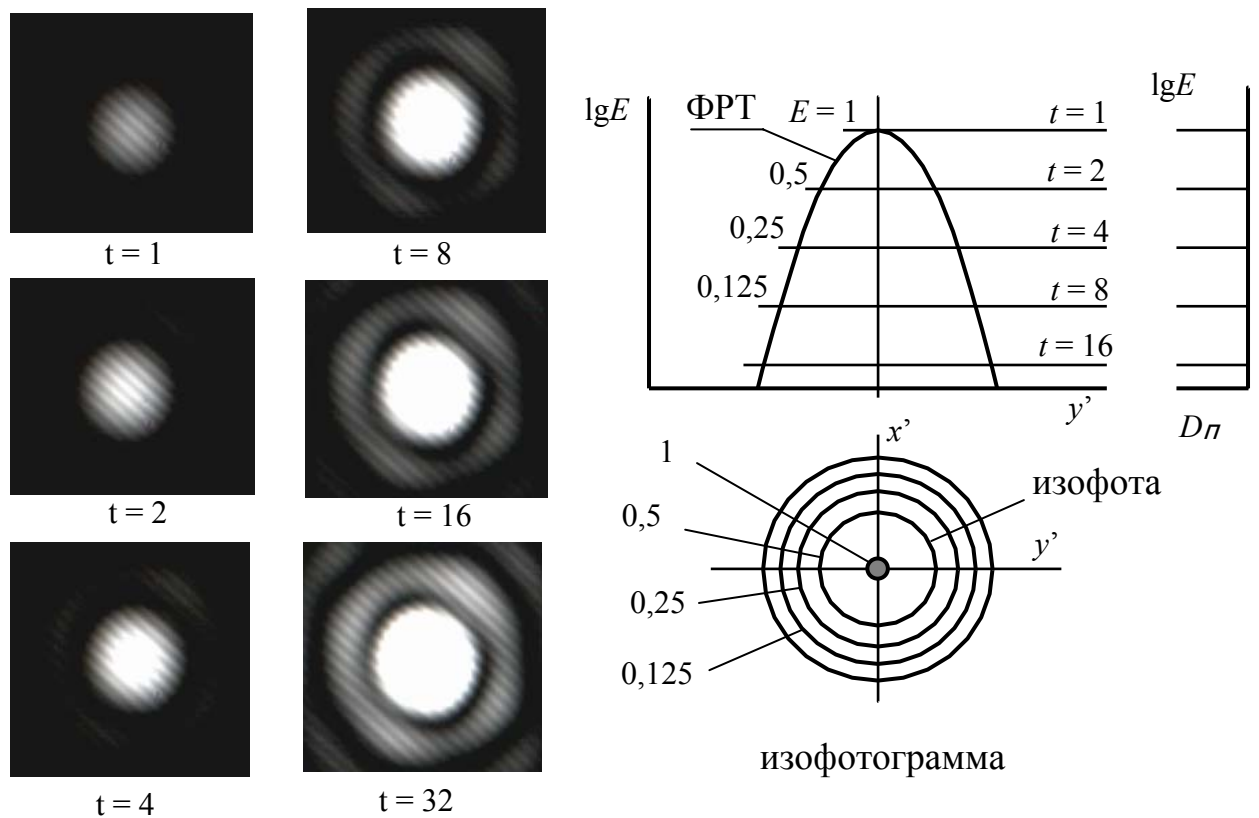


Рис. 13. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления и вид изофотogramмы

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:

$$t_i = 2^i, \quad (29)$$

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 (изофотogramму).

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 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 резком 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, 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 изображения 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 нано-электроники.

### **Компьютерная изофотометрия ФРТ**

Схема установки для контроля ФРТ фото - видео-объектива в положении наименьших аберраций показана на рис.14.

ФРТ характеризуется плавным распределением освещенности. В то же время, при проведении изофотометрии 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".

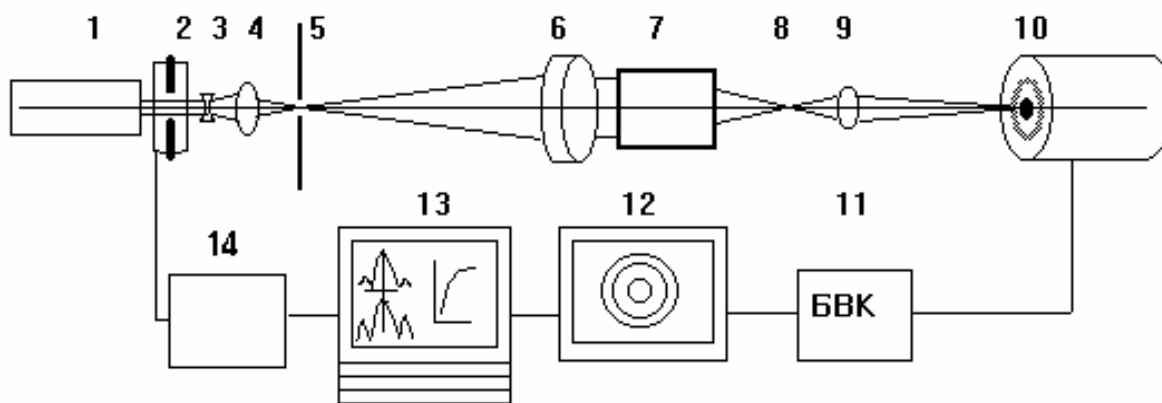


Рис. 14. Установка для измерения ФРТ объектива фото-видеокамеры в положении наименьших aberrаций методом изофотометрии с накоплением  
 1 - лазер, 2 - световой затвор, 3 и 4 - объектив для фокусировки лазерного пучка, 5 - точечная диафрагма, 6 - объектив of коллиматор, 7- исследуемый объектив, 8 - изображение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

Как показывают проведенные исследования, для получения системы изофот исследуемого распределения освещенности необходимо использовать функции преобразования типа "гребенка" (по латински - СОМВ) (рис. 13). Эта функция имеет вид ряда равномерно расположенных импульсов.

Применение компьютера создает возможности обработки результатов изофотометрии ФРТ в программе, разработанной совместно со студентом А.Федоровым.

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. Далее программой выполняется расчет функции концентрации энергии и ее отображение в табличной и графической форме.

На рис. 15 и 16 показаны результаты компьютерной обработки результатов изофотометрии ФРТ в программой, разработанной совместно со студентом А. Федоровым. Программа дает возможность, после ручного данных в процессе измерения семейства изофот, отображать ФРТ в виде графиков в логарифмическом и линейном масштабе по оси относительных освещенностей.

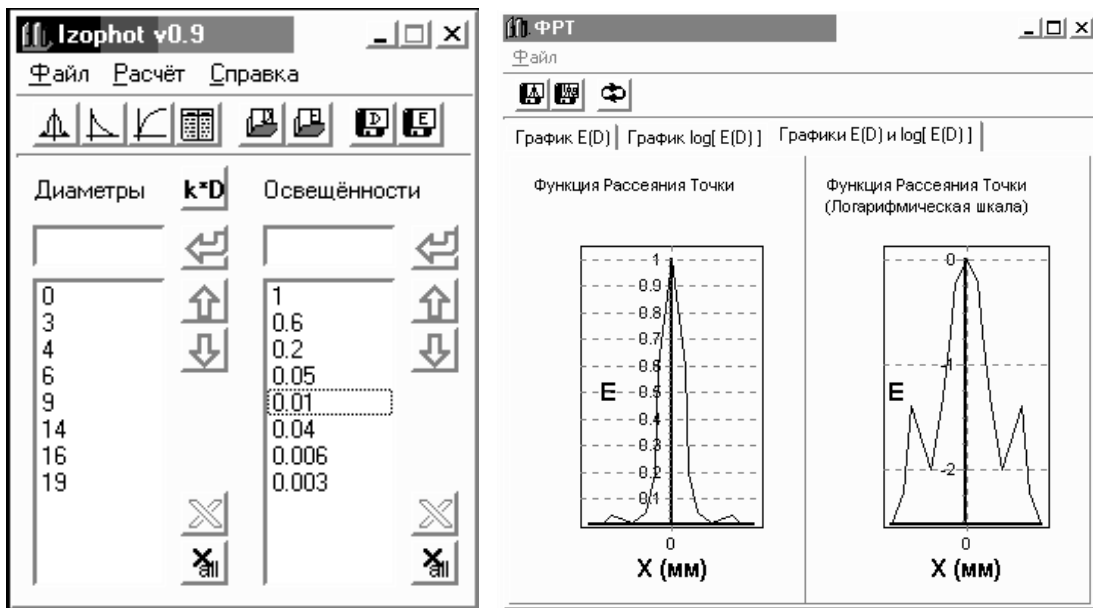


Рис.15. Применение компьютера создает возможности обработки результатов изофотометрии ФРТ

Далее, программой выполняется расчет функции передачи модуляции (ЧКХ) для исследуемой оптической системы, функции концентрации энергии и их отображение в табличной и графической форме.

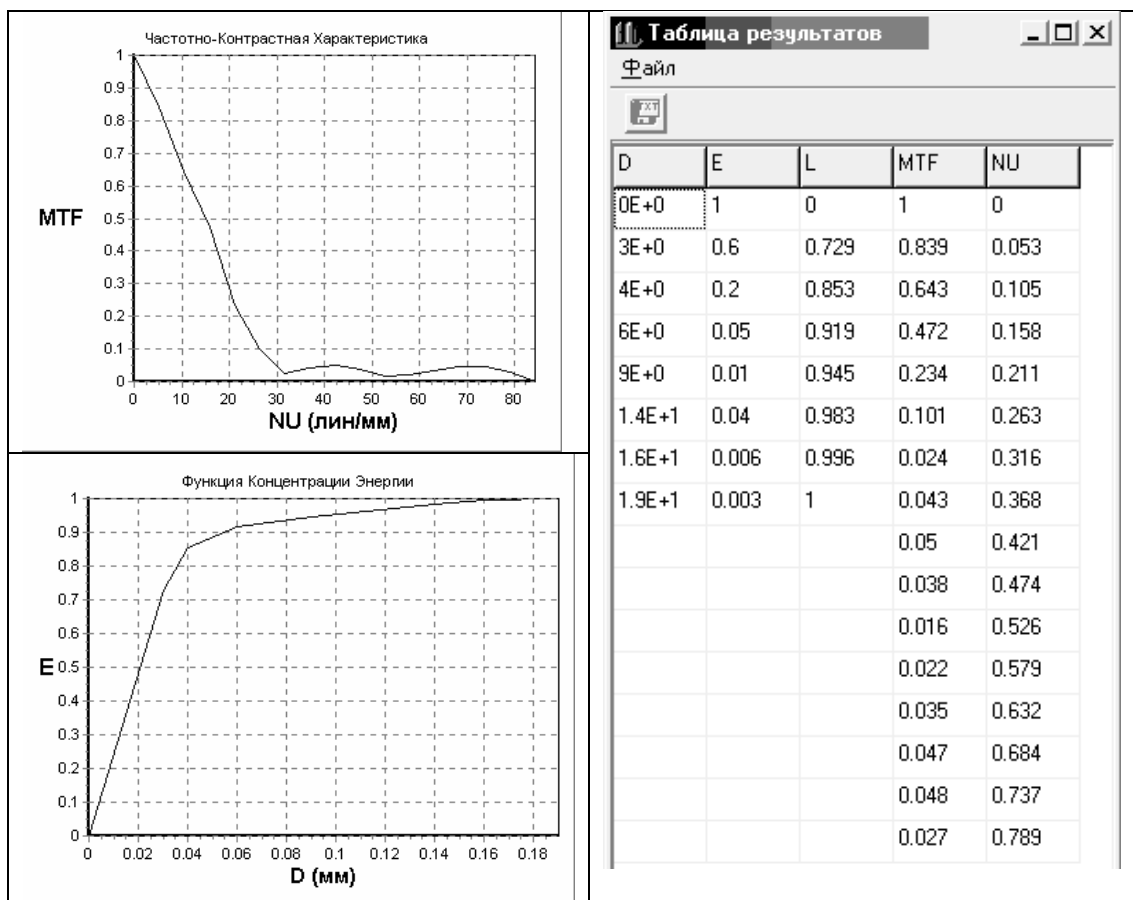


Рис.16. Программой А.Федорова выполняется расчет функции передачи модуляции (ЧКХ) для исследуемой оптической системы, функции концентрации энергии и их отображение в табличной и графической форме

## 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 [25]. Нашими исследованиями показано, 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  $1/50 \div 1/100000$  сек, 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  $1 \div 240$ .

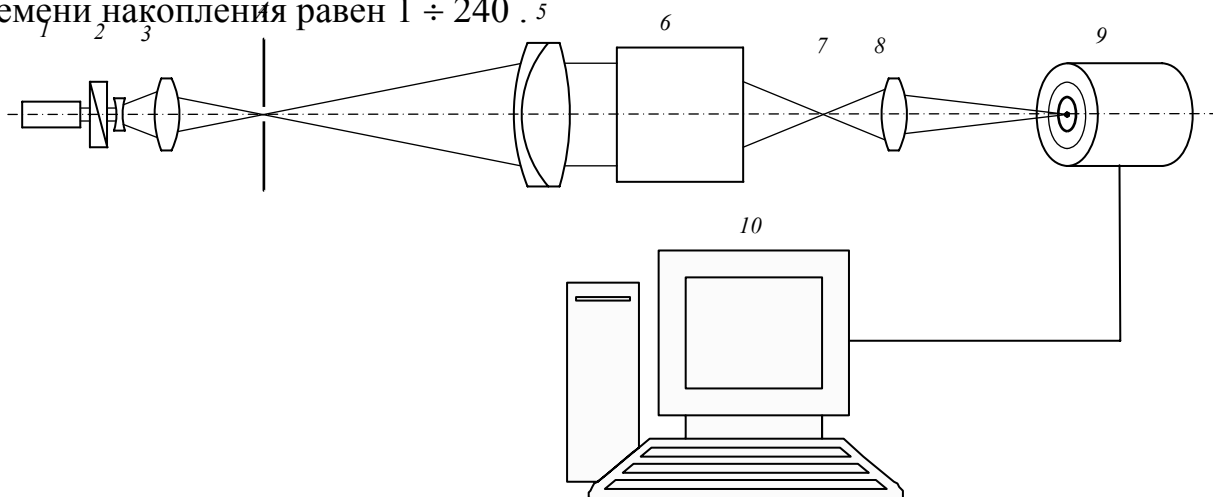


Рис. 17. Схема установки для измерения ФРТ фотообъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления при помощи WEB-камеры. 1 - лазер, 2 - фотометрический клин; 3 - система для фокусировки лазерного пучка, 4 - точечная диафрагма, 5 - объектив коллиматора, 6 - исследуемый объектив, 7 - изображение точечного тест-объекта (пятно рассеяния), 8 - проекционный микроскоп, 9 - WEB-камера (приемник изображения), 10 - компьютер.

На рис.17 изображена принципиальная схема устройства. Оно содержит осветительную систему, в которую входят лазер 1, расширительная линза и объектив 3, формирующий точечный источник света. 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



Рис 18. Алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением при помощи USB – камеры, управляемой компьютером.

площадку приемника изображения 9 (ПЗС WEB-камеры). WEB-камера превращает изображение пятна рассеяния в видео сигнал и посылает в компьютер через порт USB. Программа “Videoprocess”, разработанная аспирантом Ле Зуи Гуаном, 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 функции концентрации энергии (ФКЭ) и функции передачи модуляции (ФПМ или ЧКХ) в качестве характеристик качества изображения исследуемой оптической системы (рис. 21).

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.

Алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением показано на рис. 18. В исходном состоянии параметр “exposure” WEB - камеры установим на минимальное значение; фотометрический клин введен так, что световой поток в схеме контроля формирует изображение, дающее изофоту в виде точки (первая изофота). Эта изофота соответствует максимуму освещенности  $E_l$ , которое принимаем равным единице.

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

В следующий цикл время экспозиции увеличивается на единицу и получается второе сечение. Когда  $t$  превышает максимальное значение  $t_{max}$ , работа программы кончится, на мониторе получится график ФРТ.



Рис 19. Регистрация общего вида пятна рассеяния оптической системы

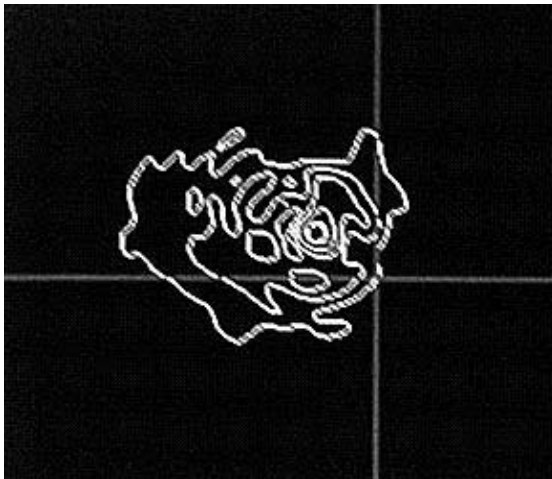


Рис 20. Изофотограмма пятна рассеяния оптической системы в компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением

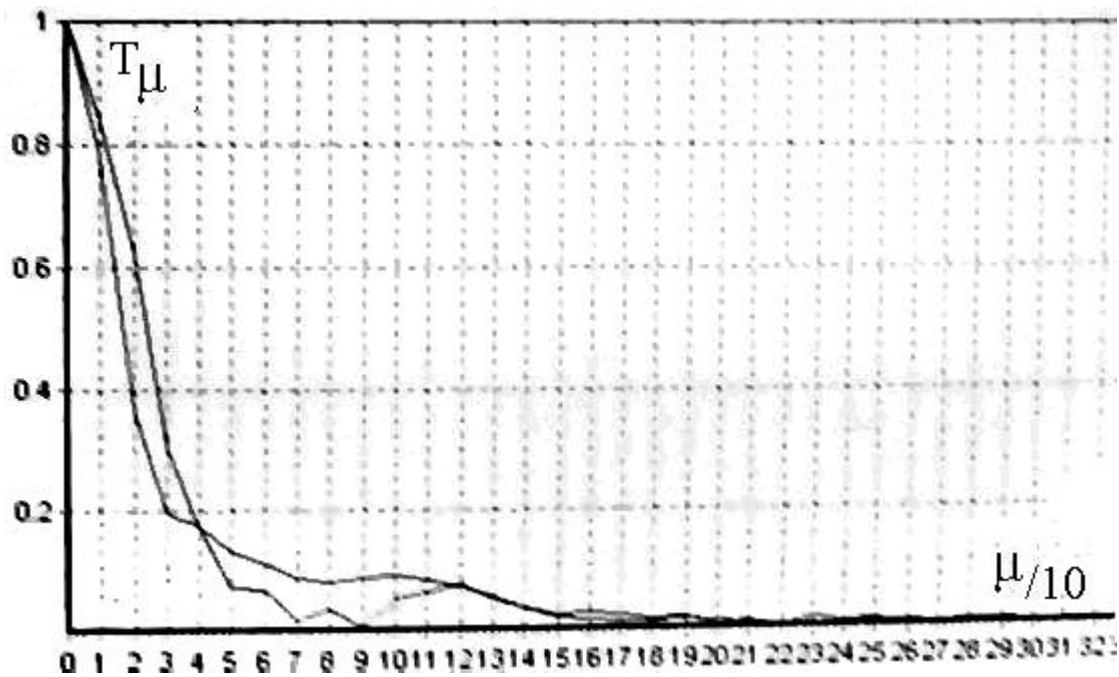


Рис 21. График ФПМ по результатам изофотометрии

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.

Таблица 2 . Цифровые фото- и USB - камеры, имеющие способность изменения времени накопления

<i>Фотоапараты фирмы Canon</i>	Выдержки (время накопления)	Диапазон регистрация
PowerShot G3	15 – 1/2000 сек	$10^{4,48}$
PowerShot A520	15 – 1/2000 сек	$10^{4,48}$
EOS 350D	30 – 1/4000 сек	$10^{5,08}$
EOS 5D	30 – 1/8000 сек	$10^{5,38}$
EOS 30D	30 – 1/8000 сек	$10^{5,38}$
<i>Цифровые видеокамеры</i>		
CB-3803S	1/50 ÷ 1/100000 сек	$10^{3,30}$
CC-8606S	1/50 ÷ 1/100000 сек	$10^{3,30}$
ВЕБ-камера Creative	1 ÷ 240 (в относительной шкале)	$10^{2,38}$

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 скоростью (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

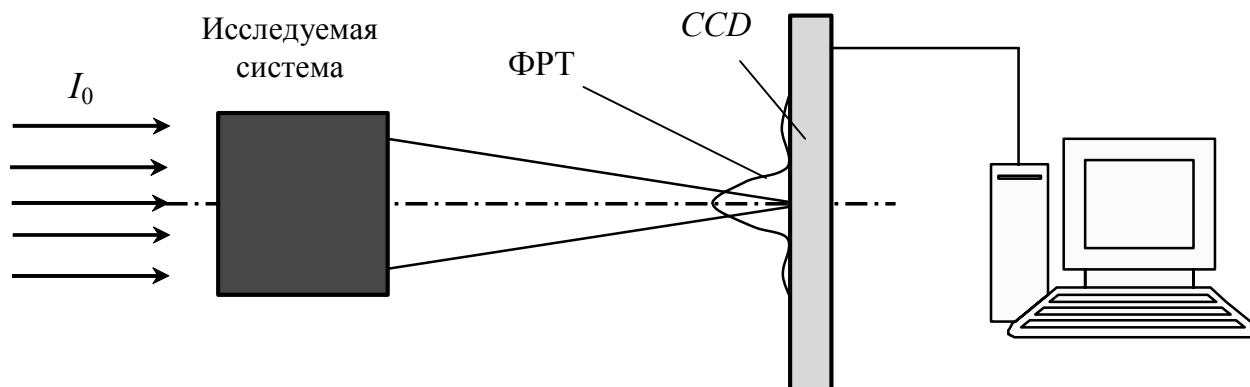


Рис. 22. Схема регистрации пятна рассеяния

Пусть в исследуемую систему (рис. 22), 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 - 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  $d_{ij}$ :

$$D = [d_{ij}]_{n \times m}, \quad (30)$$

где  $d_{ij}$  - уровень серого

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

Координата  $(x, y)$  любой точки определяется по формуле

$$\begin{cases} x = (i - i_0) \cdot dx \\ y = -(j - j_0) \cdot dy \end{cases} \quad (31)$$

где  $(i_0, j_0)$  - положение начала координат на матрице

$(i, j)$  - положение текущего пикселя.

Уровень серого в пикселях (распределение потенциала в электронном изображении) пропорционален экспозиции  $H$  (глава 2):

$$\begin{aligned}
 f(x, y) &= F[H(x, y)] = F[E'(x, y)t_0] \\
 f(x, y) &= F[I_0 h(x, y)t_0]
 \end{aligned}
 \tag{32}$$

Если в изображении мы найдем множество точек  $P_i | i = 0, 1, 2, \dots$ ,

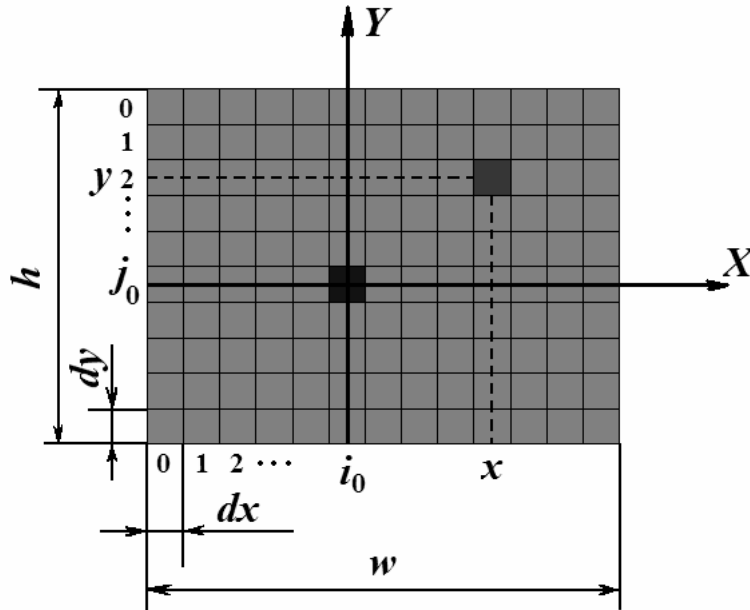


Рис. 23.. Определение координаты точки на ПЗС – матрице

имеющих уровень серого  $d_0$ , то в этих точках можно определить значения функции  $h(x, y)$  по формуле

$$h_{P_{0i}} = \frac{F^{-1}(d_0)}{I_0 t_0} = \frac{K}{t_0} \quad (i = 0, 1, 2, \dots)
 \tag{33}$$

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

$$h_{P_i} = \frac{F^{-1}(d_0)}{I_0 t_1} = \frac{K}{t_1}
 \tag{34}$$

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, чтобы постоянными  $K$  не менялся.

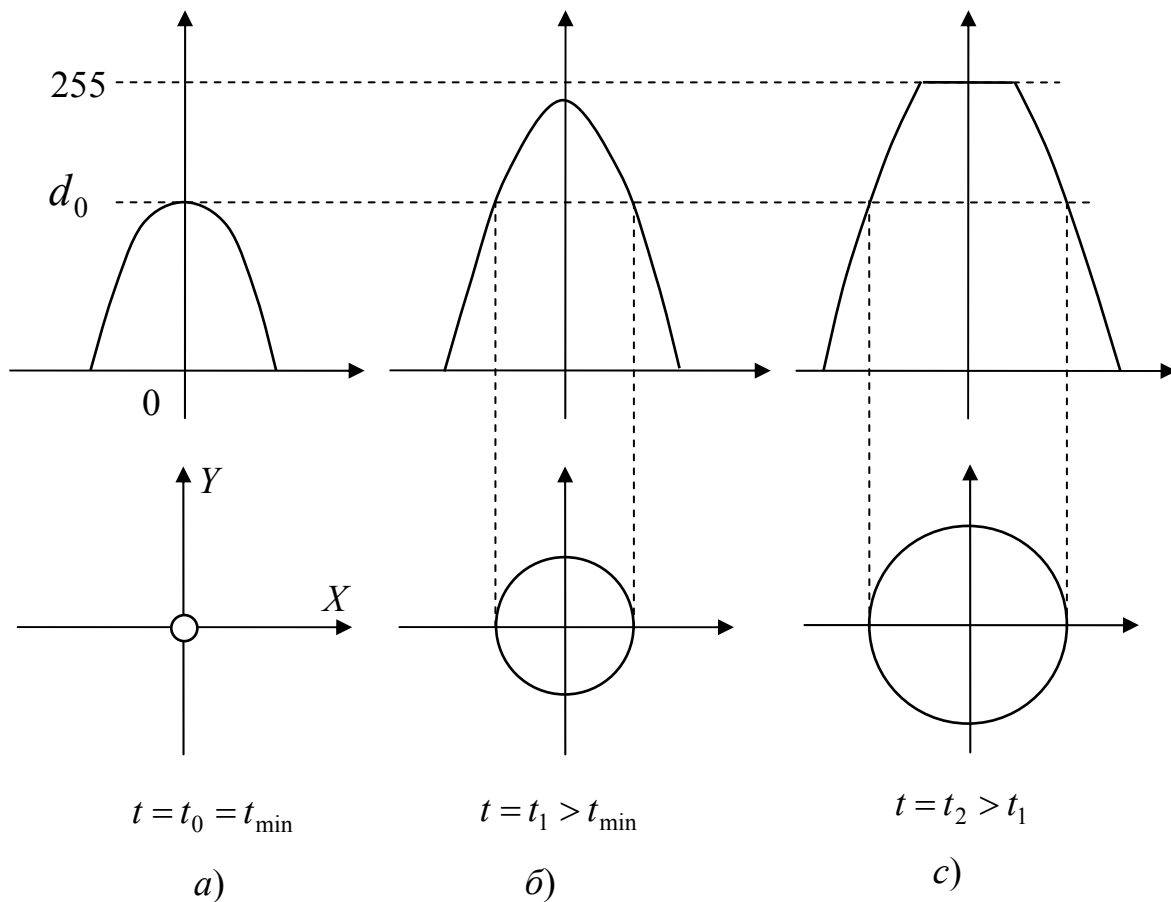


Рис. 24. Серия фотографий с изменением экспозиции и формирование изофот соответствующих диаметров

В камере может меняться время экспозиции в определенном диапазоне ( $t_{\min} \div t_{\max}$ ). Для определения максимального значения ФРТ нужно установить минимальное значение  $t = t_{\min}$ , тогда  $h_{\max} = K/t_{\min}$  (рис. 24 а), а если  $t > t_{\min}$  значение ФРТ будет  $h = K/t$  (рис. 3.3 б, с).

ФРТ в относительных единицах для ряда изофот определяется по формуле:

$$h_p = \frac{h}{h_{\max}} = \frac{K}{t} \cdot \frac{t_{\min}}{K} = \frac{t_{\min}}{t} \quad (35)$$

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

### Алгоритм выделения изофоты

На основе 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. 24).

Поэтому изофота имеет следующие черты:

- представляет собой тонкие и сплошные линии

- разделяет трехмерное отображение ФРТ на две части  $D < D_0$  и  $D \geq D_0$

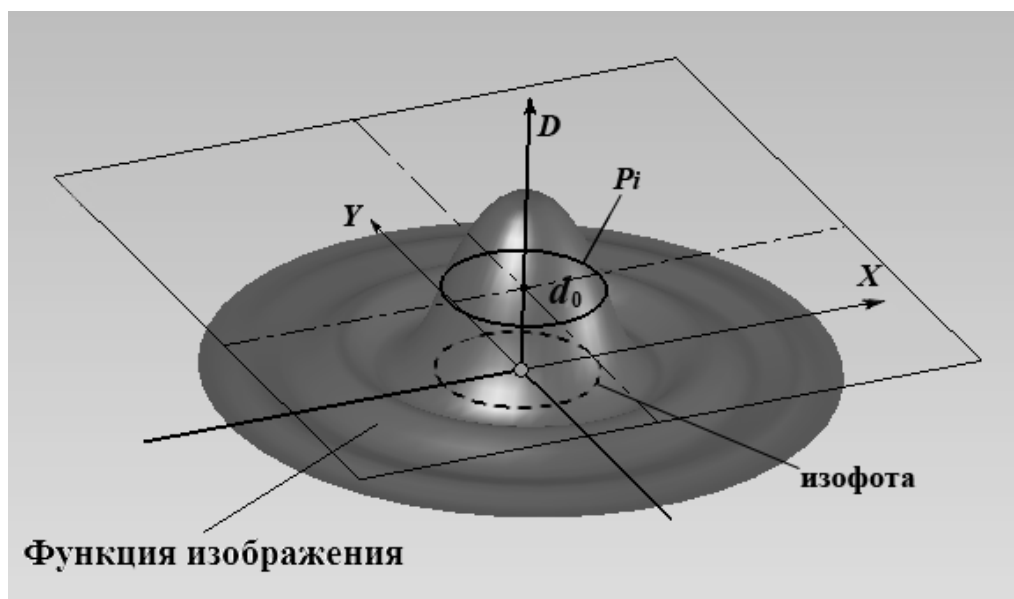


Рис. 25. Принцип формирования изофоты

На основе этих признаков можно предложить алгоритм выделения изофоты, который основан на рассмотрении с отношением 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. 26.

На рис. 27 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 мы назовем изофотометрическим сканированием ФРТ. Модулем «сканирование ФРТ» является ядро программы «КИЗО» для оценки качества изготовленных оптических систем [25].

В процессе измерения, после установки увеличенного времени экспозиции  $t_2 = k \cdot t_1$  программа выполняет регистрацию фотографии пятна рассеяния и

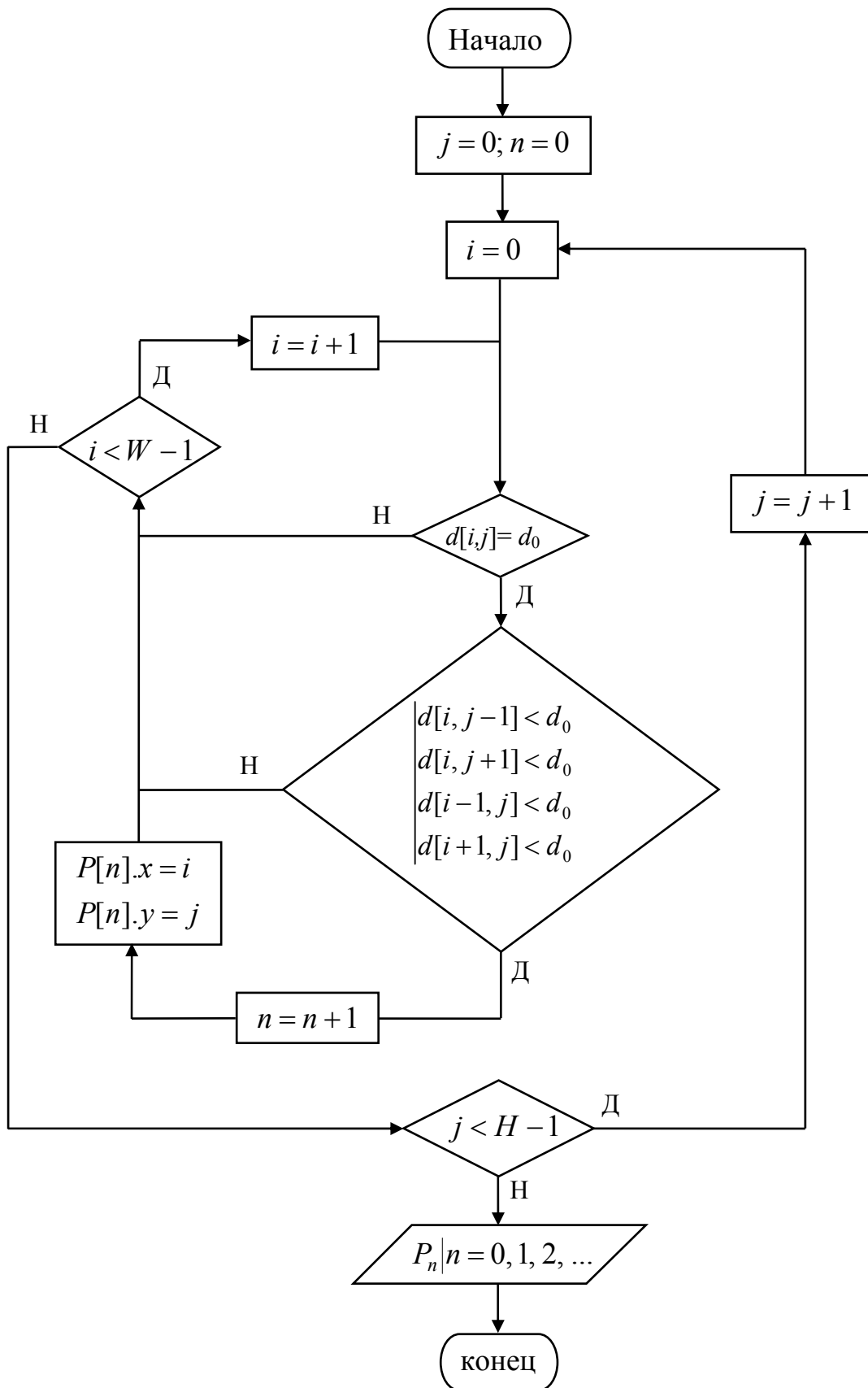


Рис. 26. Алгоритм выделения изофоты

## Алгоритм определения ФРТ

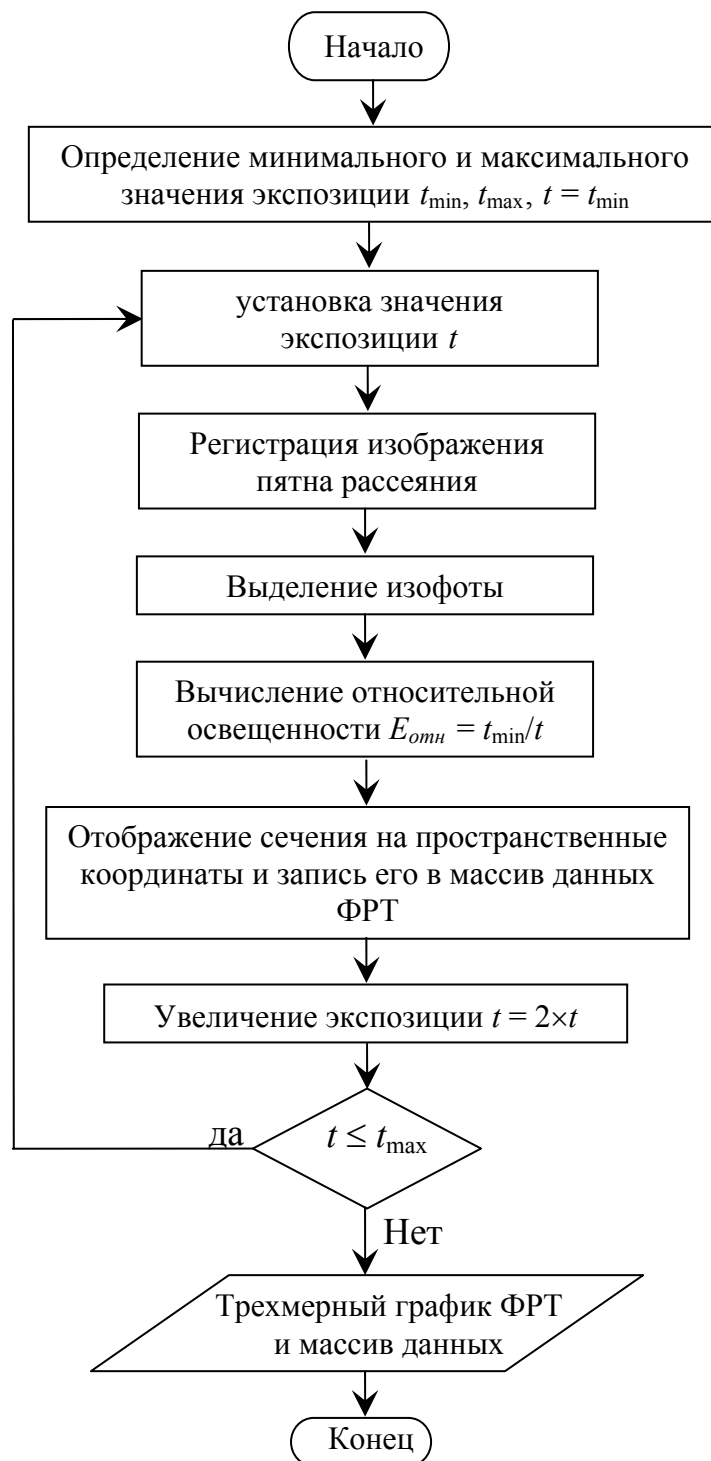


Рис. 27. Алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением.

вводит ее в модуль выделения изофоты. Эта изофота является контуром фотометрического сечения, соответствующего новому уровню относительной освещенности  $E_{отн2} = t_1 / t_2$ .

Таким образом,  $E_{отн n} = 1 / t_{отн n} = t_1 / t_n$ , поэтому помещаем изофоту в систему координат на уровень  $E_{отн n}$  и записываем его в память. Когда  $t$  превышает максимальное значение  $t_{max}$ , 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 3 компонентов:

- компонент управления камерой;
- компонент сканирования ФРТ;
- компонент анализа результат измерения.

контраст, и позволяет получить время накопления из модуля сканирования ФРТ и устанавливает его в камеру, передавать изображение из камеры и посылать изображение на экран РС.

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:

- функция рассеяния точки;
- функция рассеяния линии: интегрирование ФРТ по направлению  $y$  ;
- функция концентрации энергии: интегрирование ФРТ по радиусу  $r$  ;
- пограничная кривая: интегрирование ФРЛ ;
- частотно – контрастная характеристика: двухмерное преобразование Фурье для ФРТ.

Схема структуры программы показана на рис. 28. Его особенности:

1) Модуль «управление камерой» использует драйвер, позволяющий потребителю ввести основные параметры, такие как чувствительность, яркость,

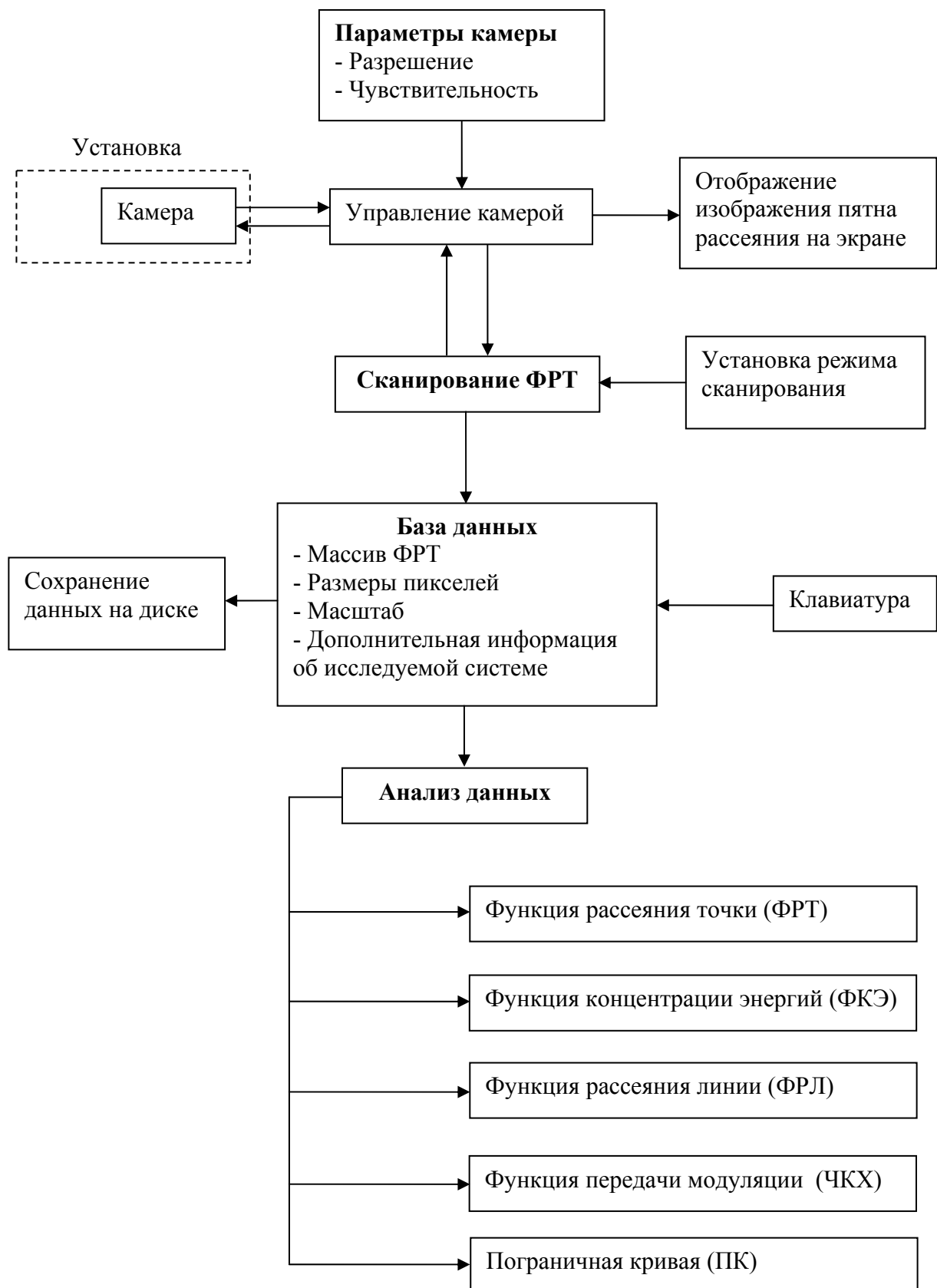


Рис. 28. Структура программного обеспечения «КИЗО»



## Установка

### Конструкция и работа установки

На основе программы КИЗО-ФРТ была разработана установка контроля качества изготовления оптических систем. 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%.

На рис. 3.1 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 (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 микрообъектива 8 на чувствительную площадку приемника изображения 9 (ПЗС – камеры). Камера преобразует изображение пятна рассеяния в видео сигнал 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.

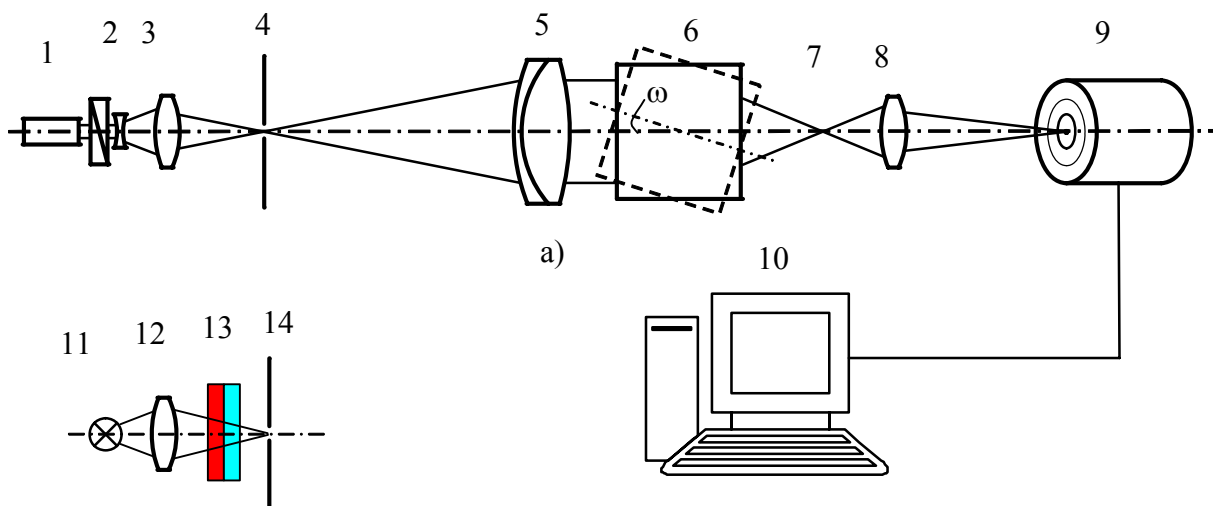


Рис. 29. Схема установки для измерения ФРТ фотообъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления при помощи ПЗС-камеры:

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 микро-объектив; 9 – видеокамера (приемник изображения); 10 – компьютер; 11 – лампа накаливания; 12 – конденсор; 13 – светофильтр; 14 – точечная диафрагма

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 на рис. 29 б). 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.

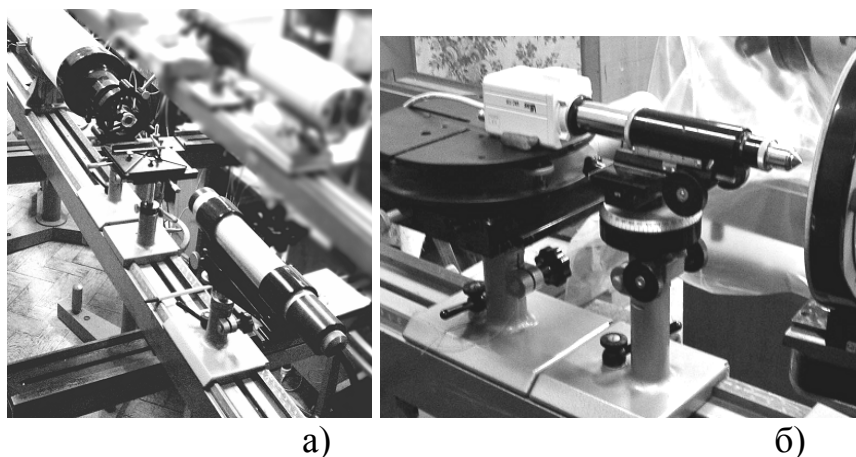


Рис. 30. Общий вид установки  
а) лазер и коллиматор; б) микрообъектив и ПЗС камера

### 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:

$$d = \frac{1,22\lambda}{A}, \quad (37)$$

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

$$A = \sin \sigma \approx \frac{D_k}{2f'_k} \quad (38)$$

где  $D_k$  - диаметр объектив коллиматора

$f'_k$  - фокусное расстояние коллимационного объектива

В данной работе  $D_k = 150$  мм,  $f'_k = 1600$  мм, тогда найдем  $d = 4,11 \cdot 10^{-3}$  мм.

Отверстие диафрагмы, которая устанавливается в фокальной плоскости коллиматора, должно быть меньше 4  $\mu$ м.

## 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  $10^{\times}$  -  $40^{\times}$ , 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

$$\sin \sigma_m = \sin(\sigma'_0 + \beta') \quad (39)$$

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», разработанная нами, 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.

Табл. 3.

Конструктивные параметры исследуемого объектива «Гелиос-44»

№	Радиус	Осевые расст.	Высоты	Марки	$n_D$
Пред.	0	$\infty$	$\infty$	Воздух	1
1	38,07	4,81	29,5	ТК14	1,613002
2	136,365	2,26	29,5	Воздух	1
3	25,33	9,07	22,0	ТК14	1,613002
4	-124,225	1,31	22,0	LF7	1,578297
5	15,995	9,33	22,0	Воздух	1
6	-16,62	1,32	19,0	LF7	1,578297
7	66,085	6,25	19,0	ТК14	1,613002
8	-22,21	0,5	19,0	Воздух	1
9	191,54	4,94	25,0	BF16	1,670899
10	-52,725	37,185	25,0	Воздух	1

Успешное применение современного метода изофотометрии для измерения ФРТ в диапазоне до  $4 \div 5$  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.

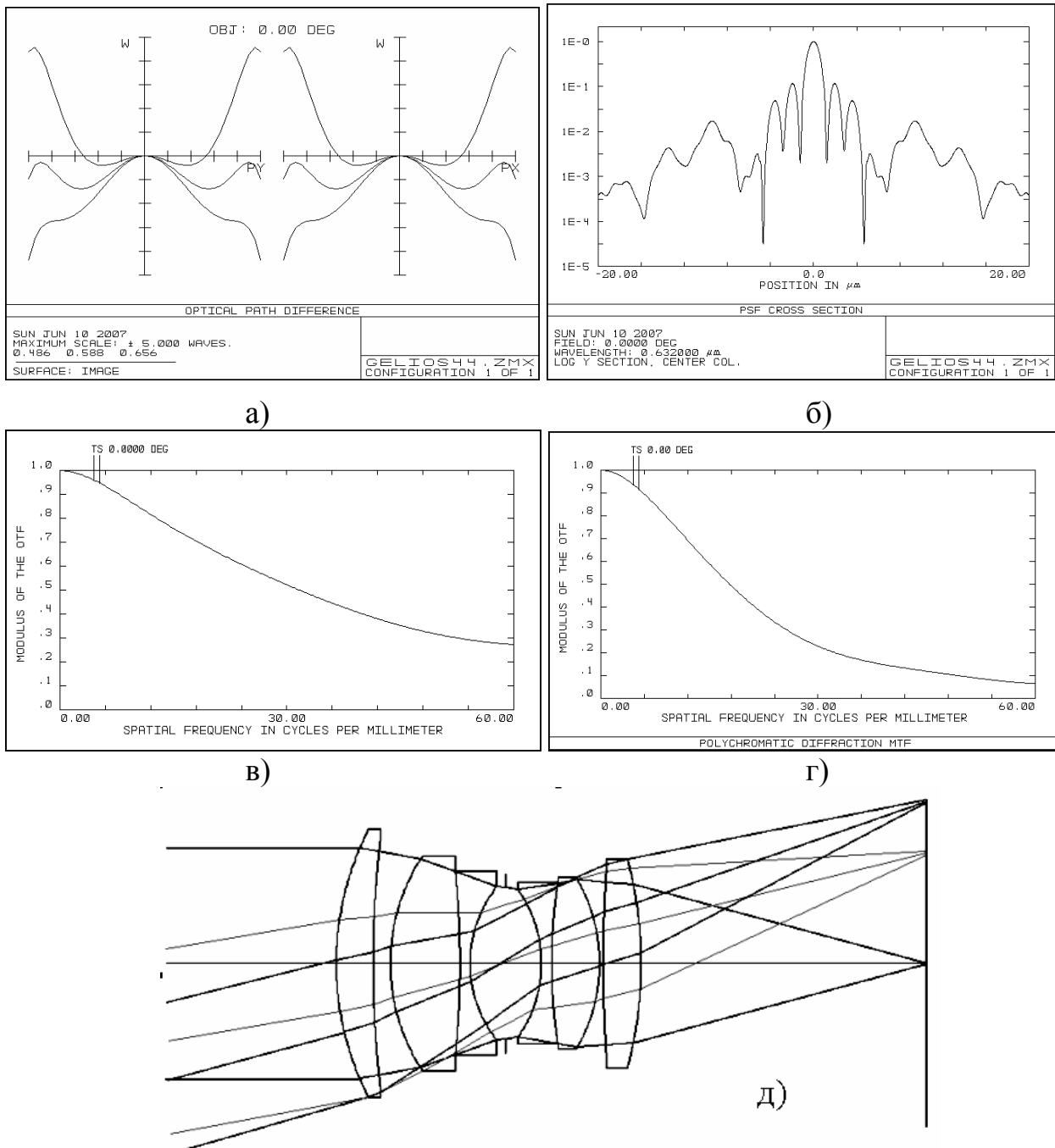


Рис. 31. Расчетные характеристики качества изображения объектива Гелиос-44  
 а) волновая aberrация; б) ФРТ в логарифмическом масштабе; в) ЧКХ с  $\lambda = 0,6328$ ; г) ЧКХ с белым светом в спектральном диапазоне  $\lambda = 0,48 \div 0,7$ ; д) схема объектива

На рис.31, а), б), в) и г) показаны характеристики качества изображения, определенные по методу изофотометрии. На рис. 32 – изофотограмма и изображение пятна рассеяния, восстановленного из изофотограммы (результат при лазерном источнике  $\lambda = 0,632$  мкм, тест-объект лежит на оптической оси). Оценивая изображения пятна рассеяния на рис. 32, заметим, что в исследуемом объективе существует aberrация типа кома на оси. Причина этого в том, что объектив не достаточно хорошо центрирован. Поэтому коэффициент передачи контраста (КПК) снижается сравнительно с расчетом (рис. 33).

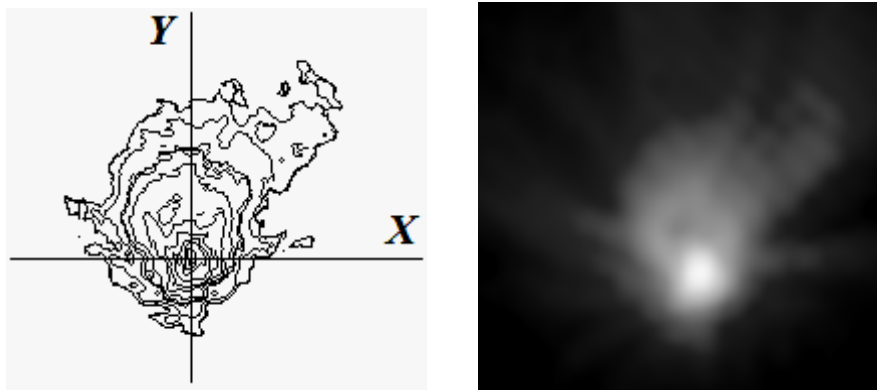
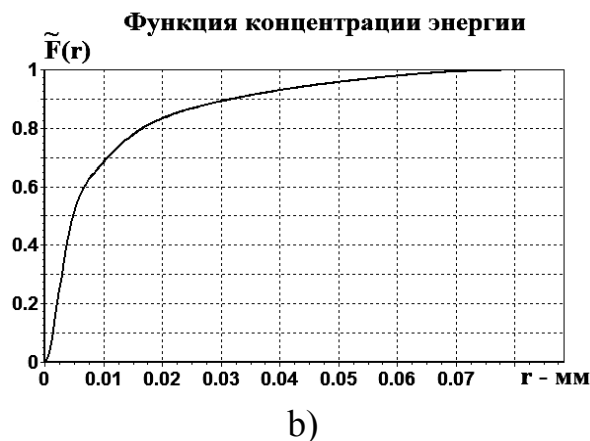
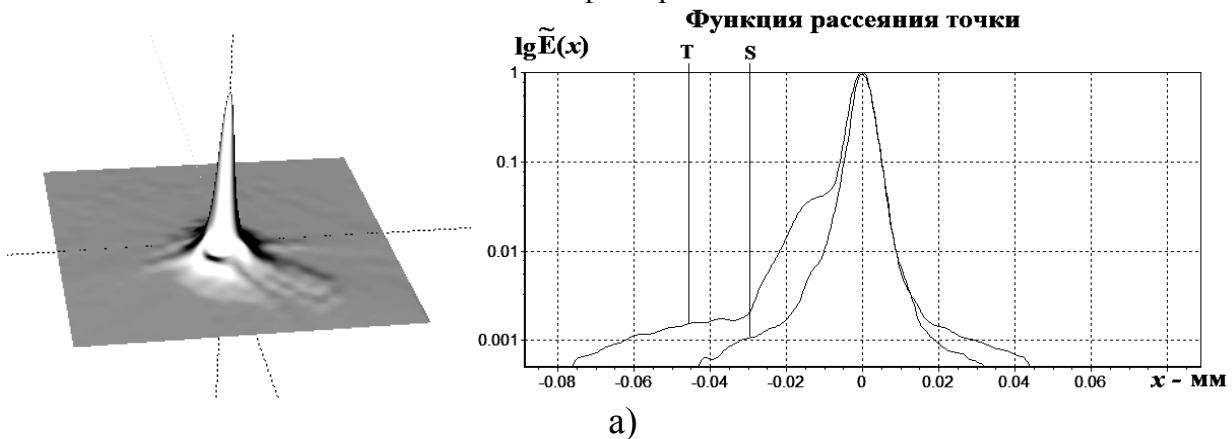
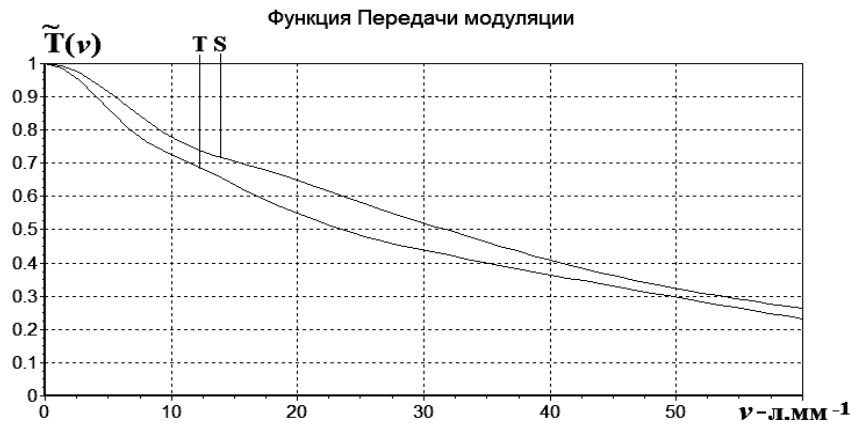


Рис. 32. Изофотограмма и изображение пятна рассеяния, восстановленного из изофотограммы





с)

Рис. 33. Характеристики качества изображения фотообъектива Гелиос-44 при использовании лазерного источника  $\lambda = 0,632$  мкм.

- а) функция рассеяния точки; б) функция концентрации энергии в пятна рассеяния;
- с) частотно -контрастная характеристика

На рис. 34 представлены графики ФРТ и ЧКХ при использовании источника белого света (лампа накаливания). Из-за влияния хроматической аберрации 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.

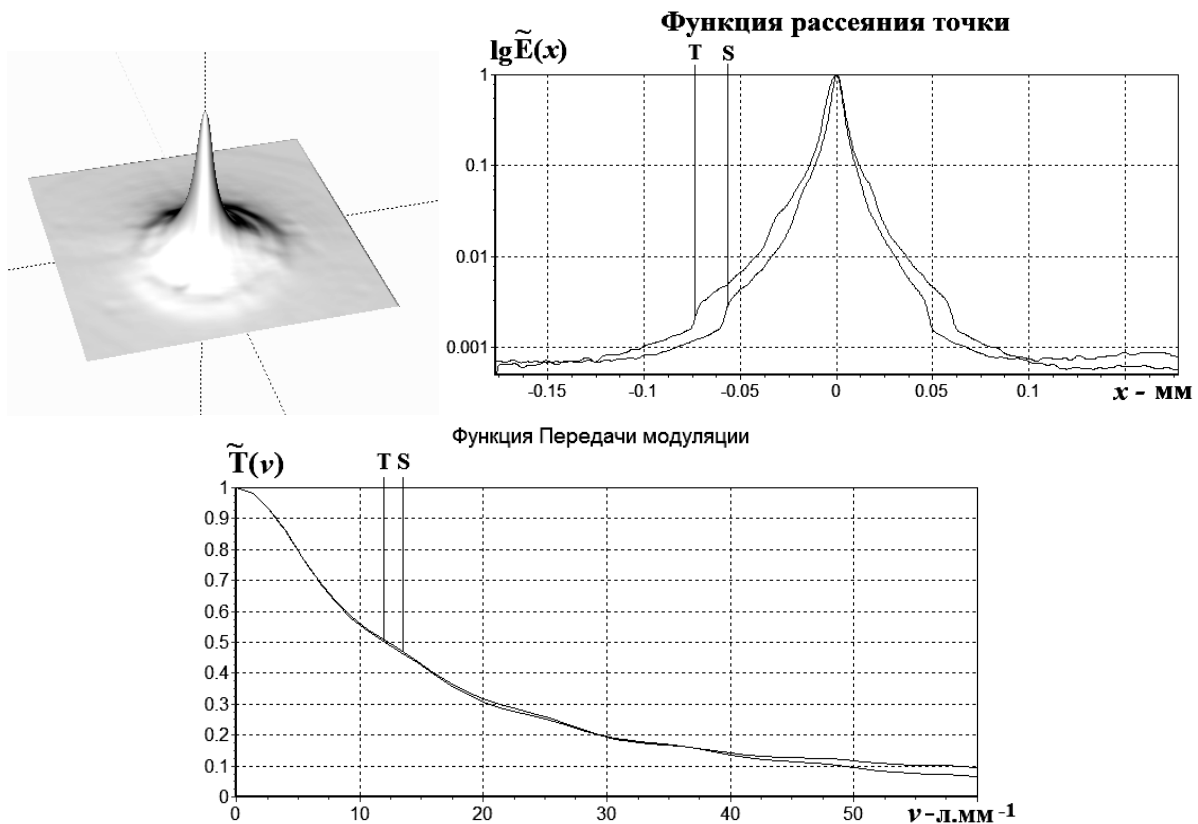


Рис. 34. Характеристики качества изображения фотообъектива Гелиос-44 при использовании белого света; точка предмета лежит на оптической оси

На рис. 35 и 36 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  $20 \text{ мм}^{-1}$

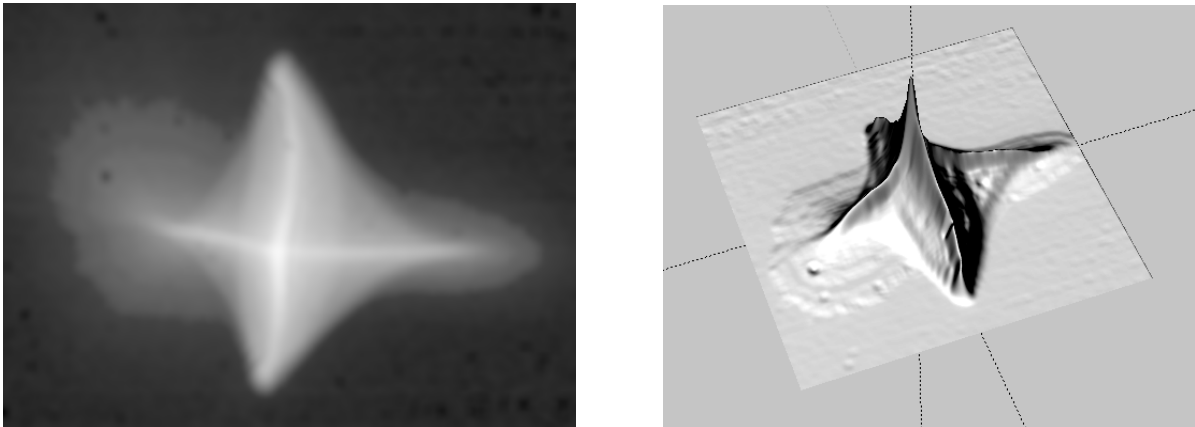


Рис. 35. Внеосевое изображение пятна рассеяния и распределение освещенности в нем.

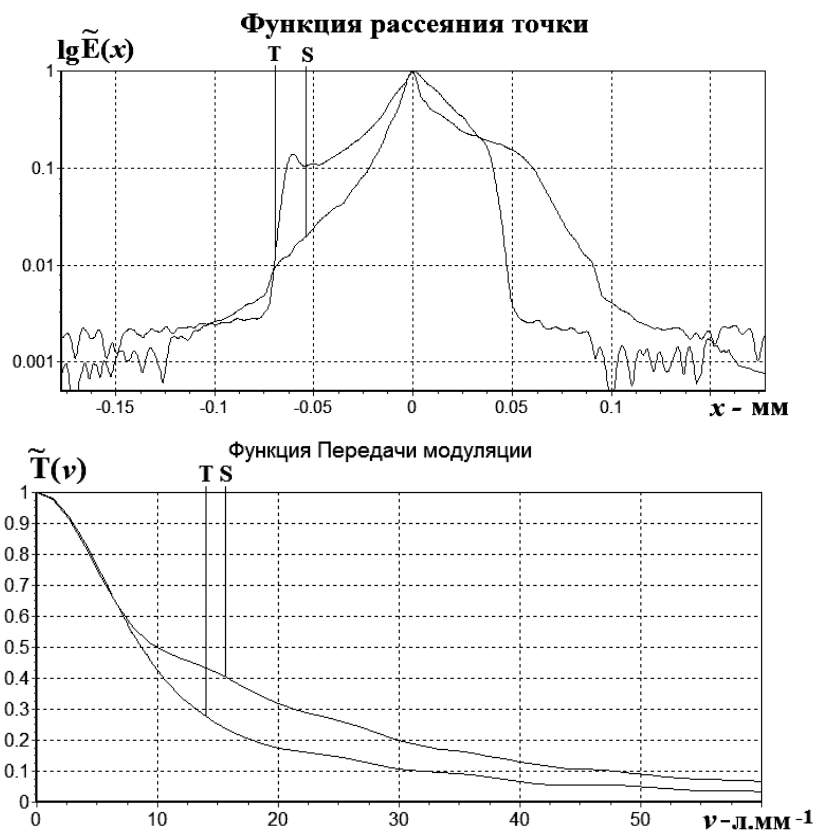


Рис. 36. Характеристики качества изображения фотообъектива Гелиос-44 при использовании белого света; точка предмета лежат на поле  $\omega = 10^\circ$ .

### ***Погрешности методов анализа и синтеза структуры изображения средствами изофотометрии, пути повышения точности измерений и оценок***

Для иллюстрации работы и демонстрации достоинств установки и программы КИЗО-ФРТ проведены исследования качества изображения фотообъектива «Гелиос-44». Его параметры представлены в таблице 3. и рисунке 31.

Расчетные характеристики качества изображения объектива получены известной программой ZEMAX и показаны на рисунке 32.

Для оценки факторов, которые могут вызывать отклонение результатов измерения, рассмотрим основную формулу, по которой значения ФРТ на изофоте определяются как:

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

Заметим, что на точность измерения влияют две основные причины:

- Погрешность определения координат точек  $P_i$  на изофоте
- Неустойчивость величины  $K$  (нестабильность чувствительности матрицы).

Так как мы используем матрицу ПЗС как линейку для определения размера пятна рассеяния, увеличенного микрообъективом, отклонение увеличения приводит к ошибке определения координат точек  $P_i$ . Кроме того, имеется погрешность градуирования пикселей. Для уменьшения погрешностей необходимо использовать эталонную линейку (объект-микрометр) для калибровки масштаба изображения на матрице ПЗС (рис. 37).

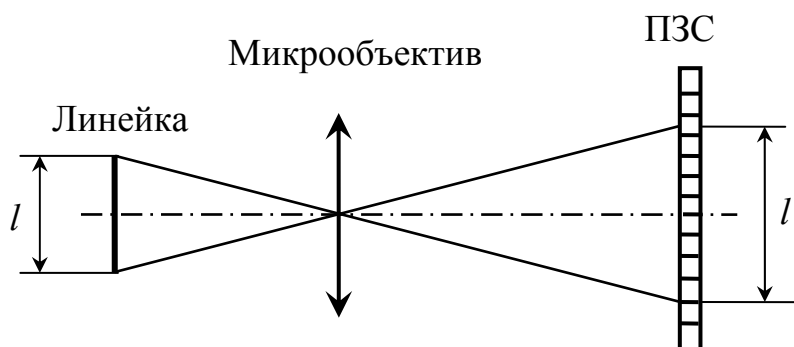


Рис. 37. Схема определения масштаба изображения

Из рисунка 37 увеличение микрообъектива определяется по формуле:

$$V_{\text{МК}} = \frac{l'}{l}, \quad (40)$$

где  $l$  – длина эталонной линейки,

$l'$  – величина изображения эталонной линейки на матрице ПЗС.

Погрешность  $\Delta V_{\text{МК}}$  определяется по выражению:

$$\Delta V_{\text{МК}\%} = \Delta l'_{\%} + \Delta l_{\%}, \quad (41)$$

где  $\Delta l_{\%}$  и  $\Delta l'_{\%}$  – погрешности линейки и его изображения.

Можно считать что  $\Delta l_{\%}$  незначительно, а  $\Delta l'_{\%}$  зависит от разрешения ПЗС и определяется следующим: величина изображения  $l'$  вычисляется по количеству пикселей, на которых лежит изображение:

$$l' = nw,$$

где  $w$  – цена одного пикселя в мм;  $n$  – количество пикселей.



Погрешность  $l'$  составляет несколько пикселей, потому что изображение конца линейки размыто. При этом максимальная величина изображения линейки равна размеру ПЗС, который обычно выше 1000 пиксели. Поэтому можно считать  $\Delta l' = 0,3\% \div 0,5\%$  и по формуле (..) погрешность увеличения микрообъектива, от которой определяет погрешность координаты точек  $P_i$ , составляет  $\approx 0,4\%$

Второй источник связан погрешностей с устойчивостью внутренних параметров камеры, к которым относятся:

- Неравномерность коэффициента оптико-электронного преобразования на всех элементах ПЗС в один момент;
- Неустойчивость коэффициента оптико-электронного преобразования каждого элемента в течение отрезки времени.

Оба этого факта связаны с качеством камеры и можно оценивать их через эксперимент.

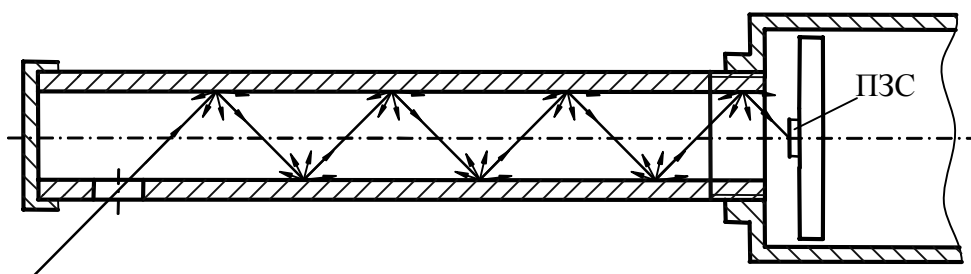


Рис. 38. Схема экспериментальной оценки устойчивости внутренних параметров камеры

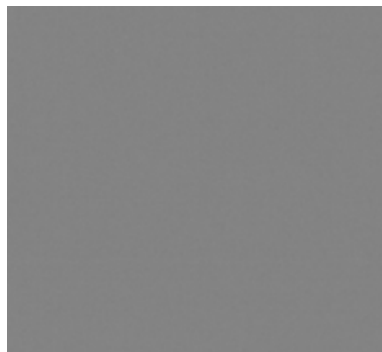


Рис. 39. Изображение, полученное по схеме на рисунке 38.

Из рис. 38 - 40 заметим, что неустойчивость внутренних параметров ПЗС-камеры составляет 1,5% .

Итак, измерение ФРТ по методу изофотометрии дает небольшую погрешность, которая постоянна на всем диапазоне регистрации освещенности, особенно на низком уровне освещенности. Однако при преобразовании Фурье для получения ЧКХ погрешность может увеличиваться, если диапазон освещенности, в котором определяется ФРТ не выше 3 порядка (см. в главе 1). В разработанной нами установке ФРТ определяется в диапазоне свыше 3 порядка, что соответствует погрешности ЧКХ примерно 5%.

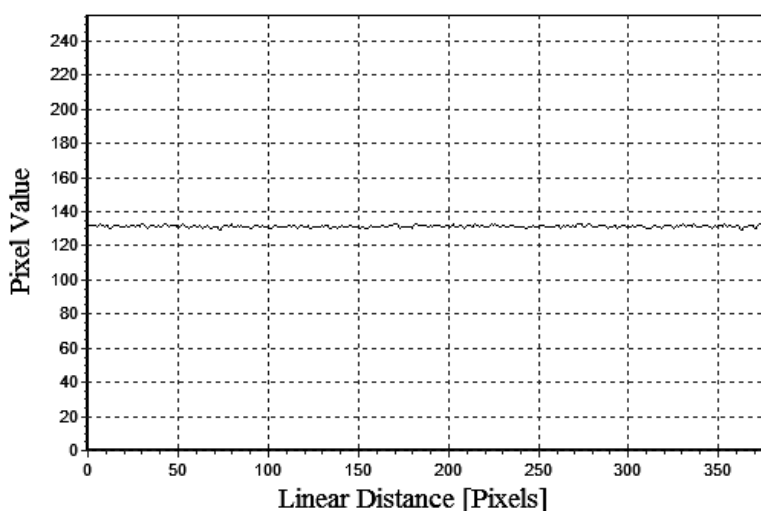


Рис. 40а. Изменение уровня серого по пикселям (главное сечение)

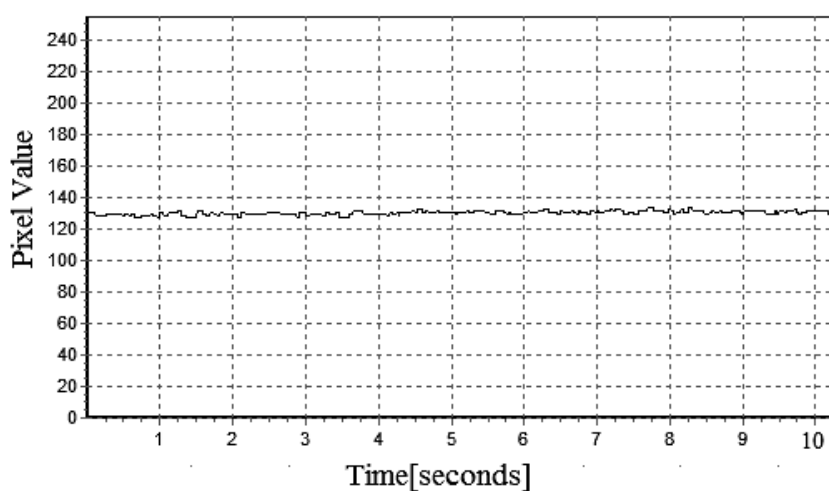


Рис. 40б. Колебание уровня серого центрального пиксела по времени

## **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 разработанной установке. Результаты соответствуют практике и согласованы с расчетом.

- Дана оценка погрешности метода изофотометрии ФРТ на основе математического анализа и экспериментов. Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРТ по методу изофотометрии ФРТ не выше 1,5%, погрешность после расчета ЧКХ не больше 5%.

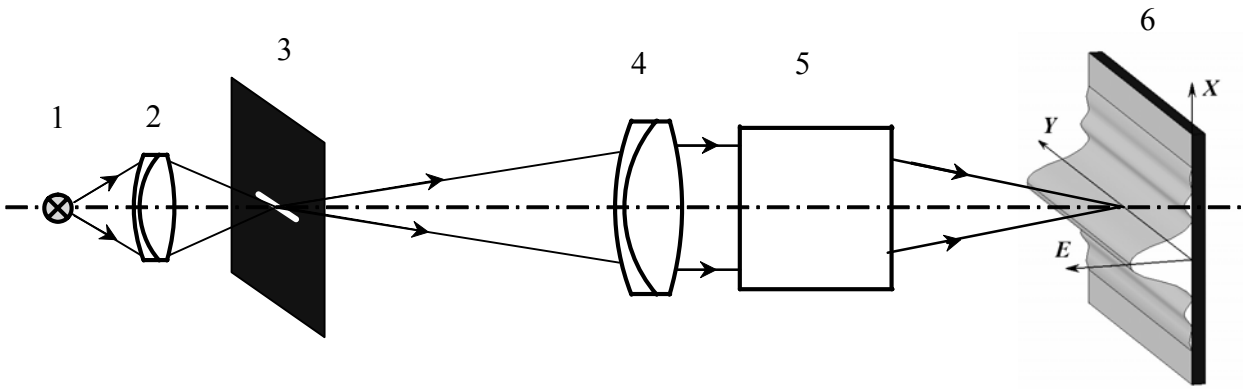


Рис. 41.Схема контроля оптической системы по ФРЛ

### **Разработка компьютерной изофотометрии ФРЛ с изменяющимся световым потоком.**

#### **Математические основы**

На рис. 41. представлена схема оценки качества изображения по ФРЛ. Пучок лучей, выходящий из лампы накаливания 1, собирается на узкой щели 3 с помощью конденсатора 2. Освещенная щель через коллимационный объектив 4 и исследуемой объектив 5 изображается в плоскости 6, на которой установлен приемник изображения. Распределение освещенности в изображении узкой щели соблюдает ФРЛ исследуемого объектива 5.

Пусть на зрачке исследуемого объектива 6 подает пучок лучей с интенсивностью  $I_0$ , распределение освещенности в плоскости изображения будет

$$E(x, y) = I_0 \cdot L(x) \quad (42)$$

1- лампа; 2 – конденсатор; 3 – узкая щель (тест – объект); 4 – объектив коллиматора; 5 - исследуемый объектив; 6 – ФРЛ исследуемого объектива

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

Пусть коэффициент пропускания фотометрического клина меняется по функции

$$\tau = \tau(y), \quad (43)$$

распределение освещенности в плоскости изображения будет

$$E(x, y) = I_0 \cdot \tau \cdot L(x) = I_0 \tau(y) \cdot L(x) \quad (44)$$

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

$$f(x, y) = F[E(x, y)] = F[I_0 \tau(y) \cdot L(x)] \quad (45)$$

Выделить из совокупности значения  $f(x, y)$  все точки  $P_i$ , имеющие одно и тоже значение  $d_0$ , на этих точках имеем

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

$$L(x) = \frac{F^{-1}(d_0)}{I_0 \tau(y)} = \frac{K}{\tau(y)}, \quad (46)$$

Где  $F^{-1}$  - обратная функция  $F$

Так как  $K$  постоянная величина, поэтому при переходе в относительную единицу можно ее пренебрегать, при этом ФРЛ будет

$$L(x) = \frac{\min[\tau(y)]}{\tau(y)} \quad (47)$$

Итак ФРЛ определяется по закону изменения коэффициента пропускания фотометрического клина. Формулы (46) и (47) представляют собой математические основы метода изофотометрии ФРЛ.

### Алгоритм определения ФРЛ по методу изофотометрии

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

- Определение функция фотометрического клина  $\tau(y)$
- Нахождения на изображении пятна рассеяния все точки, имеющие одно и тоже значение  $d_0$

Функцией  $\tau(y)$  является основная характеристика фотометрического клина, определенная изготовителем, а точек  $P_i$  представляет собой пересечение функции  $f(x, y)$  с плоскостью на высоте  $d_0$  (рис. 42). Контур пересечения формирует изофоту, поэтому можно использовать алгоритм выделения изофоты в главе 3. Из этого контура можно найти график ФРЛ по формуле (47), а затем найти другие характеристики качества изображения, такие как ЧКХ, ПК, ФКЭ.

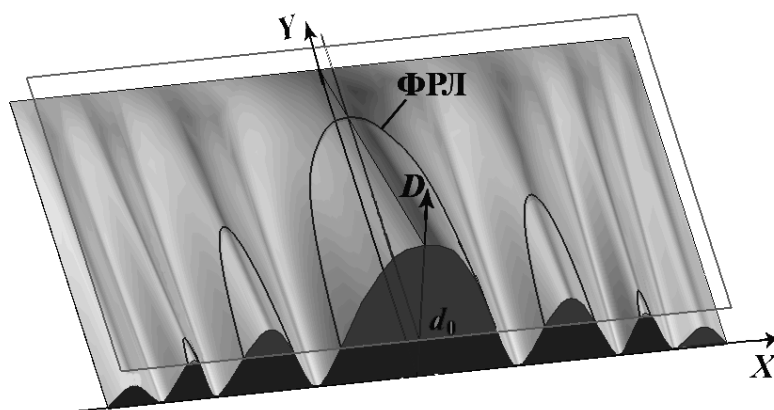


Рис. 42. Компьютерное моделирование принципа изофотометрии ФРЛ

### Программа КИЗО-ФРЛ

На основе предыдущего математического анализа разработана программа КИЗО-ФРЛ, которая непрерывно обрабатывает изображения, полученного из ПЗС камеры, для определения ФРЛ и других характеристик качества изображения оптических систем в реальном времени. Программа состоит из 4 компонента:

- Компонент «управление камерой»

- Компонент «выделение контура»
- Компонент «Опознавание и расшифровка ФРЛ»
- Компонент «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.

алгоритму КИЗО, затем послать полученную совокупность точек в блок «Опознавание и расшифровка ФРЛ».

- Компонент «Опознавание и расшифровка ФРЛ» переходит координаты контурных точек в значения ФРЛ по формуле (4.6). Упорядочивает эти точки по очередь 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:

- Функция рассеяния линии:
- Функция концентрации энергий: интегрирование ФРЛ по направлению  $x$ .
- пограничная кривая: интегрирование ФРЛ по формуле (1.7)
- частотно – контрастная характеристика: одномерное преобразование Фурье ФРЛ.

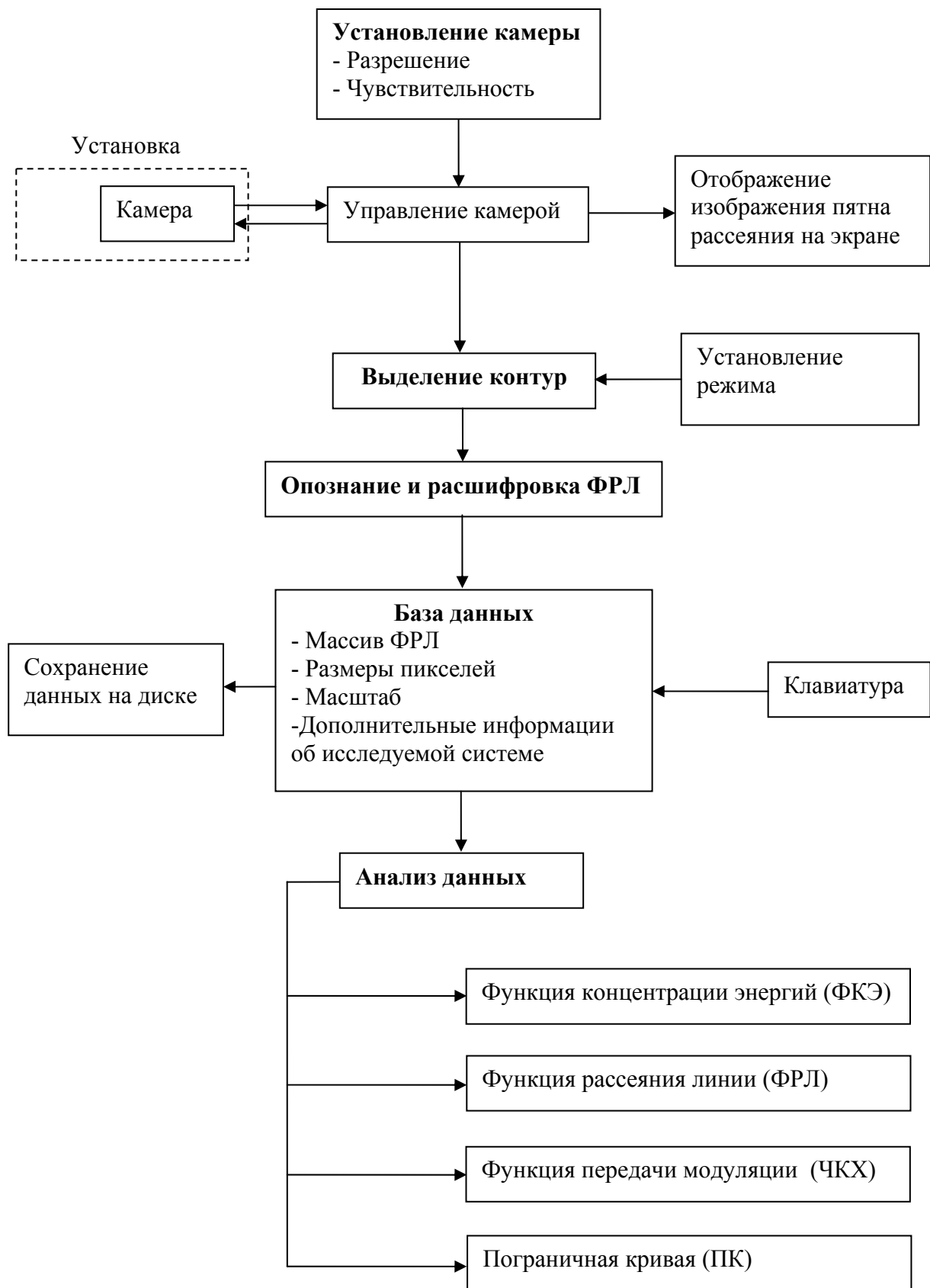


Рис. 43. Структурная схема программы КИЗО-ФРЛ

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

## 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 порядков и одновременно вычислять ЧКХ, КФЭ, ПК в реальном времени (со скоростью 15-30 измерений на секунду).

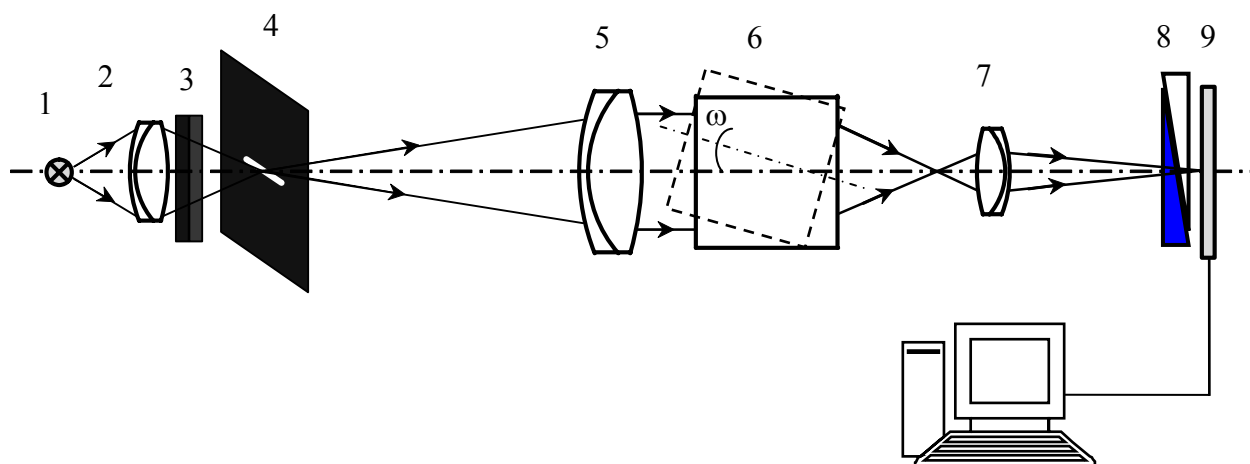


Рис. 44. Схема установки измерения ФРЛ по методу изофотометрии с изменяющимся световым потоком

На рис. 44 показана схема установки изофотометрии ФРЛ. Конденсор 2 собирает пучок лучей из лапы накаливания 1 на узкой щели 4, которая изображается через коллимационный объектив 5 и исследуемый объектив 6 на фокальной плоскости объектив 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 для дальнейшей обработки.

Исследуемая система закрепляется на специальном держателе, который может вращать вокруг ось, перпендикулярная оси измерительной системы, чтобы рассматривать точки на поле.

### Расчет основных узлов в схеме установки

Установка создана на базе скамьи ОСК-ЦЛ2. Фокусное расстояние коллимационного объектива 1600 мм, что позволит установке измерить объективы с фокусным расстоянием не больше 500 мм. Остальные оптические узлы в схеме должны выбираются корректно по требованиям того, чтобы они не влияют на качество исследуемого объектива.

- Тест - объект

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

$$d = \frac{1,22\lambda}{A}, \quad (49)$$

где  $D_k$  - диаметр объектив коллиматора

$f'_k$  - фокусное расстояние коллимационного объектива

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, должно меньше 10  $\mu\text{м}$ .

#### • *Микрообъектив*

Диаметр пятна рассеяния, сформированного исследуемым объективом, в общих случаях составляет несколько микрометров, соответствующих размеру одного пикселя на матрице ПЗС. Поэтому, необходимо использовать микрообъектив для увеличения пятна рассеяния того, чтобы центральный кружок падает на 10 – 20 пикселей. Таким образом, увеличение микрообъектива должен быть  $10^{\times}$  -  $40^{\times}$ , что зависит от типа исследуемого объектива.

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

$$\sin \sigma_m = \sin(\sigma'_0 + \beta') \quad (50)$$

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, что ФРЛ определяется через фотометрический клин. Диапазон освещенности, в котором измеряется ФРЛ, равен диапазону изменения коэффициента пропускания. По требованию этот диапазон должен быть выше 3 порядков, кроме того, функцию клина (закон изменения коэффициента пропускания) нужно определить.

Для созданной установки фотометрический клин склеен из двух призм, изготовленных из нейтрального стекла НС10 и бесцветного стекла К8 (рис. 45). По аспекту оптических действий фотометрический клин работает как плоскопараллельная пластинка, так как показатель преломления двух стекол одинаков.



Коэффициент пропускания фотометрического клина выражается как:

$$\tau_{\lambda}(y) = (1 - \rho) 10^{-k_{\lambda} h} = (1 - \rho) 10^{-k_{\lambda} y \operatorname{tg} \alpha}, \quad (51)$$

где  $\rho$  коэффициент отражения от поверхностей. В данном случае  $\rho$  постоянный  $k_{\lambda}$  показатель поглощения стекла HC10

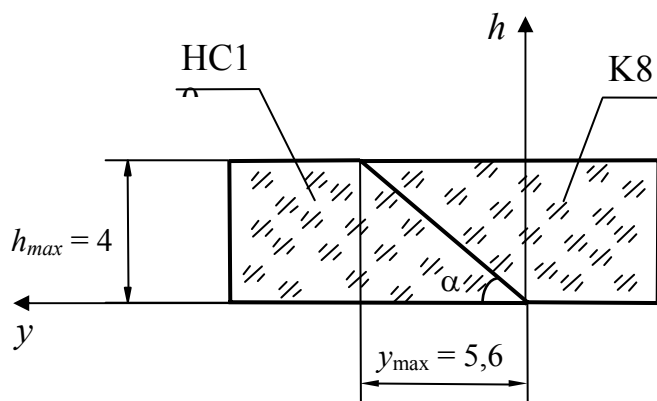


Рис. 45. Фотометрический клин

Показатель поглощения стекла HC10 в спектральном диапазоне  $\lambda = 0,48-0,656$  почти постоянен и можно принимать  $k_{\lambda} = 0,87$ , тогда

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

На рис. 45 толщина серого клина меняется в диапазоне  $0 \div 4$  мм, что соответствует диапазону освещенности  $1 \div 10^{3,7}$ , в котором можно определить ФРЛ.

Фотометрический клин работает как плоскопараллельная плоскость в сходящийся пучок лучей, созданный микрообъективом, поэтому он вносит свою aberrацию в схему. Однако толщина фотометрического клина незначительна (4 мм) и задний апертурный угол микрообъектива очень мало (почти параллельно), следовательно, фотометрический клин не влияет на результат измерений. Экспериментальные исследования показывают, что в этом случае aberrация измерительной системы меняется меньше  $\lambda / 100$ .

### Экспериментальные исследования качества изображения объектива по ФРЛ

Описанная выше установка построена в лаборатории оптических измерений кафедры ПиКО СПб ИТМО 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, ПК, ФКЭ. Скорость работы установки и программного обеспечения достигает  $15 \div 20$  измерений на секунду, что позволяет рассматривать оптические системы в реальном времени в разных условиях работы, например, следить изменение кривой ЧКХ во время фокусировки, при перемещении тест-объекта по полю или при регулировке детали в исследуемой системе. Такие возможности позволяют оценивать

исследуемую систему в процессе его сборки для получения наименьшего качества изображения.

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

На рис. 46 и рис. 47 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 .

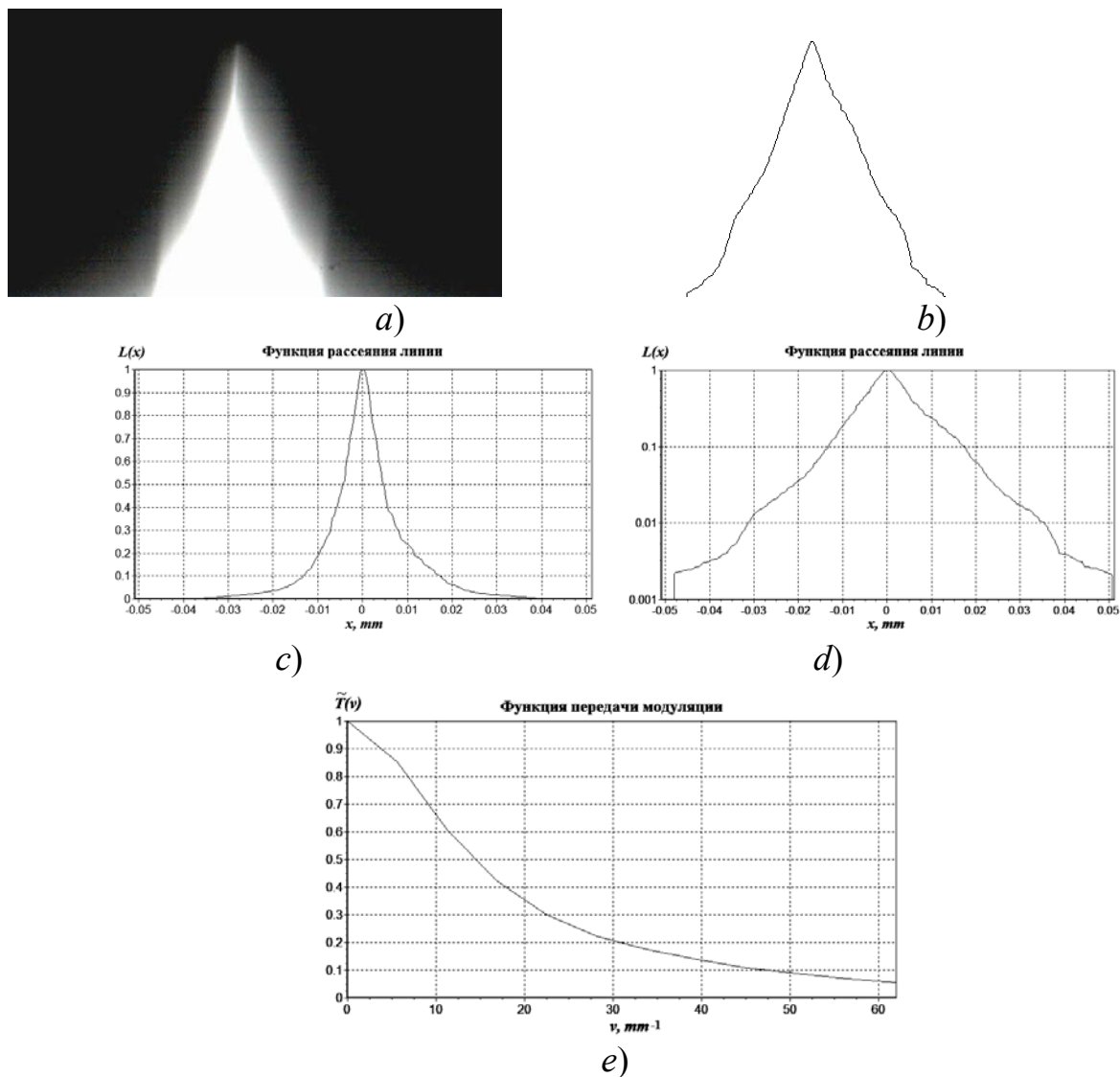


Рис. 46. Экспериментальная оценка качества изображения фотообъектива «Гелиос–44» для осевой точки по методу изофотометрии ФРЛ: а) изображение тест-объекта (светящаяся линия), зарегистрированное ПЗС-камерой; б) Контур ФРЛ после обработки изображения тест-объекта; в) ФРЛ в линейном масштабе; г) ФРЛ в логарифмическом масштабе; д) кривая ЧКХ, полученная методом преобразования Фурье ФРЛ.

## Погрешности методов анализа и синтеза структуры изображения средствами изофотометрии, пути повышения точности измерений и оценок.

Для нахождения источников, которые вызывают погрешность в методе изофотометрии ФРЛ, рассмотрим основную формулу (4.5), по которой определяется значение ФРЛ на координаты  $(x, y)$

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

где  $\tau(y)$  – функция коэффициент пропускания фотометрического клина, которая обычно является логарифмическим законом  $\tau(y) = 10^{-k_\phi y}$ , где  $k_\phi$  – постоянная фотометрического клина, тогда

$$L(x) = \frac{K}{10^{-k_\phi y}}$$

По сути дела в методе изофотометрии функция рассеяния линии определяется в логарифмическом масштабе, поэтому удобно преобразовать последнюю формулу в вид

$$\lg L(x) = \lg \left( \frac{K}{10^{-k_\phi y}} \right) = \lg K - \lg(10^{-k_\phi y}) = \lg K + k_\phi y, \quad (51)$$

или

$$L_{\lg}(x) = K_{\lg} + k_\phi y, \quad (52)$$

где  $L_{\lg}(x) = \lg L(x)$ ,  $K_{\lg} = \lg K$ , так как  $K = F^{-1}(d_0)$ ,  $K_{\lg} = \lg F^{-1}(d_0)$ ,  $K_{\lg}$  есть значение одной точки на кривой световой характеристики приемника изображения в логарифмическом масштабе.

Экспериментальные результаты определения характеристики качества фотообъектива «Гелиос–44» (рис. 3.14, 3.15 и рис. 4.16, 4.17) подтвердили, что методы изофотометрий ФРТ и ФРЛ дают соответствующие результаты.

В формуле (4.11) значение ФРЛ вычислено через величины  $K_{\lg}$ ,  $k_\phi$  и  $y$ . По числительному методу абсолютная погрешность  $\Delta L(x)$  определяется по формулу:

$$\Delta L_{\lg}(x) = \Delta K_{\lg} + \Delta(k_\phi y) \quad (53)$$

$\Delta K_{\lg}$  зависит от камеры и можно определить его экспериментом. Для камеры VAC-135, применяемой в разработанной нами установке,  $\Delta K_{\lg}$  можно определить из кривой световой характеристики камеры.

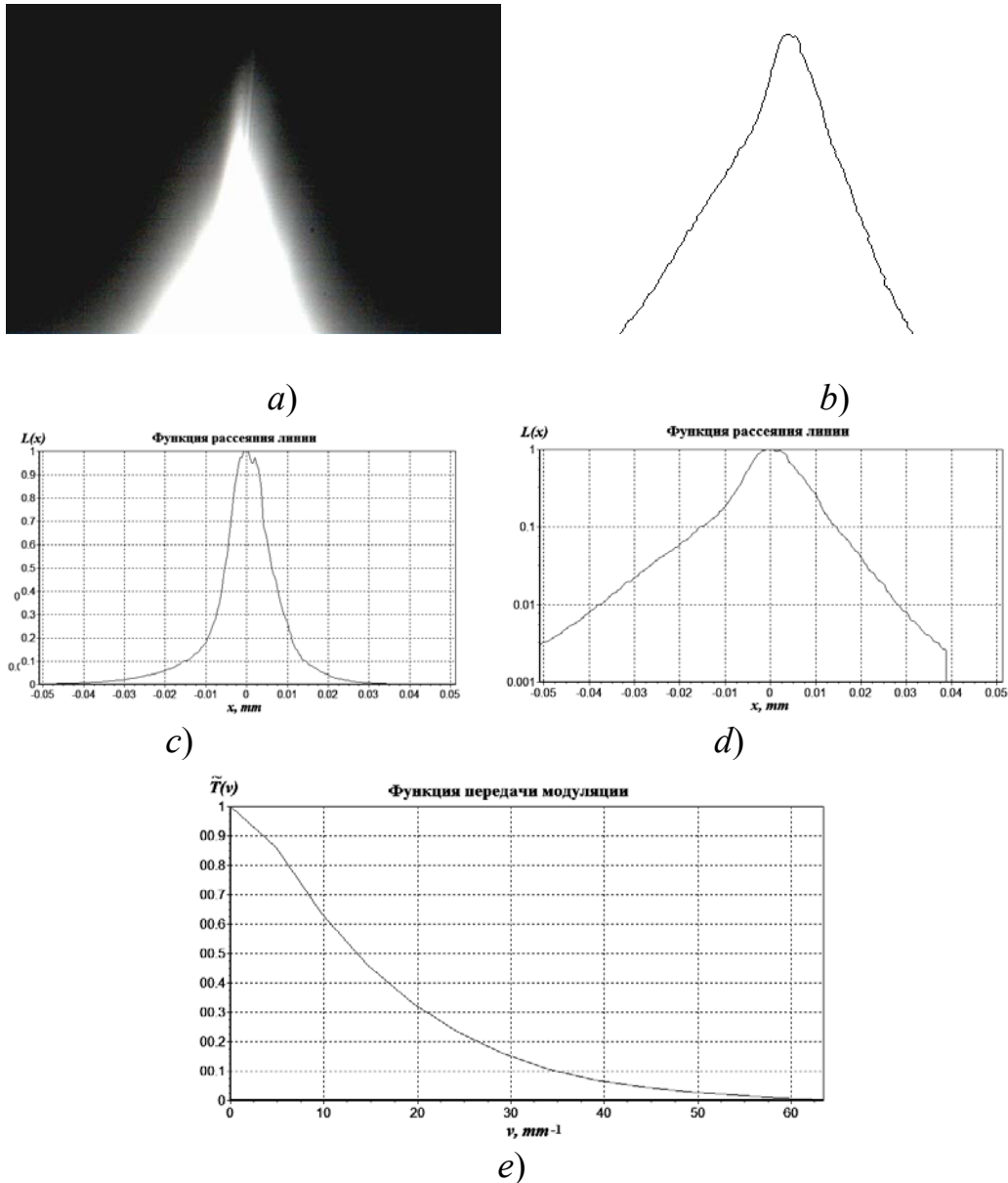


Рис. 47. Экспериментальная оценка качества изображения фотообъектива «Гелиос–44» для внеосевой точки ( $\omega = 10^\circ$ ) по методу изофотометрии ФРЛ: а) изображение тест-объекта (светящаяся линия), зарегистрированное ПЗС-камерой; б) контур ФРЛ после обработки изображения тест-объекта; в) ФРЛ в линейном масштабе; д) ФРЛ в логарифмическом масштабе; е) кривая ЧКХ, полученная методом преобразования Фурье ФРЛ.

Из таблицы 4 можно определить неустойчивость световой характеристики в рабочей точке примерно как  $1 \div 2$  пиксела, что соответствует  $\Delta K_{lg} \approx 0,01$ .

Абсолютная погрешность  $\Delta(k_\phi, y)$  определяется через относительную погрешность следующим образом:

$$\delta(k_\phi, y) = \delta k_\phi + \delta y$$

Постоянную фотометрического клина обычно измеряют с погрешностью меньше 1%, а координаты  $y$  на плоскости ПЗС можно определить с погрешностью меньше 0,3%.

Табл. 4. Значение некоторых точек, и, близлежащие к рабочей точке  $d_0 = 140$ , на кривой световой характеристики камеры VAC-135

Пиксели	$x$	Уровень серого	$\lg(\tilde{E})$
349	4.013	130	2.492
350	4.025	132	2.499
351	4.036	134	2.506
352	4.048	135	2.513
353	4.059	137	2.520
354	4.071	137	2.528
355	4.082	139	2.535
356	4.094	140	2.542
357	4.105	140	2.549
358	4.117	141	2.556
359	4.128	145	2.563
360	4.140	146	2.570
361	4.151	148	2.578
362	4.163	149	2.585
363	4.174	150	2.592
364	4.186	151	2.599
365	4.197	151	2.606
366	4.209	153	2.613
367	4.220	157	2.620
368	4.232	157	2.628

Тогда  $\delta(k_{\phi,y}) \approx 1,3\%$ , максимальное значение абсолютной погрешности  $\Delta(k_{\phi,y})$  получается на минимальном уровне освещенности ( $10^{-3}$ ):  $\Delta(k_{\phi,y}) = 0,0169$ .

Подставив значения  $\Delta K_{lg}$  и  $\Delta(k_{\phi,y})$  в формулу (53), имеем:

$$\Delta L_{lg}(x) = \Delta K_{lg} + \Delta(k_{\phi,y}) = 0,01 + 0,0169 = 0,0269.$$

Переходя к относительной погрешности, получаем:

$$\delta L_{lg}(x) = \frac{\Delta L_{lg}(x)}{|L_{lg\max}|} = \frac{0,0269}{|-3|} = 0,9\%.$$

Итак, измерение ФРЛ по методу изофотометрии содержит малую погрешность, особенно на низком уровне освещенности. Однако при преобразовании Фурье для получения ЧКХ погрешность может увеличиваться, если диапазон освещенности, в котором определяется ФРЛ, не выше 3 порядков. В разработанной установке ФРЛ определяется в диапазоне свыше 3 порядков, что соответствует погрешности ЧКХ примерно 5%.

## Выводы

- Теоретические основы методов изофотометрии ФРЛ глубоко проанализированы и интерпретированы применительно к задаче создания алгоритмов и программного обеспечения.
- Разработано алгоритмическое и программное обеспечение, которое позволяет измерить ФРЛ по методу изофотометрии и преобразовать

измеренные значения ФРЛ для получения различных характеристик качества изображения оптических систем, таких как ЧКХ, ПК, ФКЭ. Рабочая скорость программы достаточно высока, чтобы получить измеренные результаты в реальном времени.

- Разработана установка контроля качества изображения оптических систем на основе скамьи ОСК2ЦЛ. Выполнены расчеты основных узлов в схеме установки.
- Экспериментально исследовано качество изображения фотообъектива «Гелиос-44» на разработанной установке. Результаты соответствуют практике и согласованны с методом изофотометрии ФРТ.
- Дана оценка погрешности метода изофотометрии ФРЛ на основе математического анализа и экспериментов. Расчеты и практика показывают, что погрешность определения ФРЛ по методу изофотометрии ФРЛ не выше 1%, погрешность после перехода в ЧКХ не больше 5%.

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СУБМИКРОННОГО ОТВЕРСТИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ**

Здесь рассмотрены концепции использования функции распределения излучения, дифрагированного на малом отверстии, в качестве источника информации при моделировании структуры ближнего поля. Разработан метод исследования и отображения дальнепольного распределения интенсивности средствами его изофотометрического анализа. Разработан и реализован метод компьютерного моделирования структуры ближнего поля в зоне дифрагирующего отверстия

### **Введение**

Из теории дифракции [26] следует, что распределения электромагнитного поля в ближней и дальней зоне дифракции взаимосвязаны, что позволяет решать обратные задачи дифракции и оптического сверхразрешения при наличии соответствующих априорных данных.

Необходимость решения обратных задач такого рода возникла в ближнепольной оптике в связи с трудностями точного исследования субволновой апертуры на оконечности БРОМ зондов, изготовленных на основе оптических волокон. Эту апертуру нельзя различить в обычный оптический микроскоп, а другие методы микроскопии высокого разрешения (электронная сканирующая микроскопия – SEM, атомно-силовая микроскопия – SFM и др.) не могут дать однозначной информации об апертуре вследствие неоптической природы процессов наблюдения. Одним из методов, обеспечивающих получение необходимой информации, является метод исследования БРОМ зондов по характеристикам распределения излучения в дальнем световом поле [26].

## Форма и структура распределения излучения, дифрагированного на малом отверстии

Взаимосвязь прослеживается через распространение неоднородного скалярного потенциала  $f_e$ , определенного с учетом поляризации излучения [26]. Распределение амплитуды дальнего поля выражается наиболее строго через пространственно-частотный спектр указанного потенциала  $\tilde{f}_e$ , который может быть выражен также и в угловом измерении [1].

Это обстоятельство используется в дальнейшем для обоснования возможности разработки метода и аппаратуры регистрации распределения излучения от субмикронного отверстия с металлизированными краями с последующим исследованием структуры распределения интенсивности дальнеполюсного излучения на плоской поверхности приемника изображения (например, ССD – матрицы или фотоматериала).

Представим, что апертура зонда – это отверстие в тонком металлическом экране. В плоскости тонкого экрана с его тыльной стороны формируется рассеянное поле. Это ближнее поле, состоящее из неоднородных плоских волн, которые быстро затухают.

Энергия дальнего поля распространяется в дальнюю зону дифракции и регистрируется приемником. На практике доминирующей становится волна, распространяющаяся нормально от экрана. Моделируемое угловое распределение интенсивности имеет максимум в центре при гауссовом законе распределения, не достигающем нулевого значения в пределах телесного угла  $\pm 90^\circ$ .

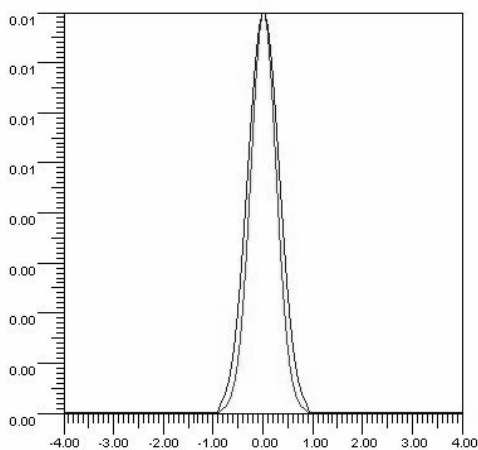


Рис. 48. Дальнеполюсное распределение интенсивности света, дифрагированного на отверстии диаметром 140 нм

На рис.1 – 2 показаны модельные дальнеполюсное и ближнеполюсное распределения интенсивности света при дифракции на апертуре диаметром 140 нм с учетом того, что экран имеет конечную проводимость.

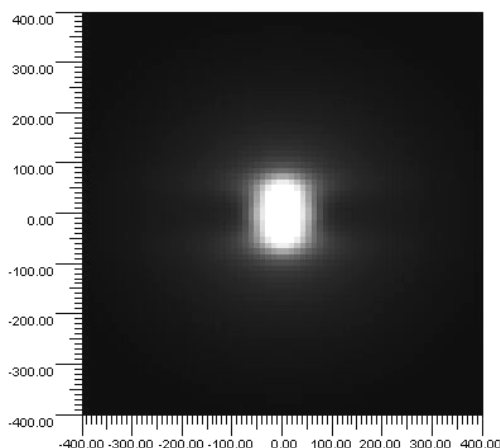


Рис. 49. Распределение интенсивности в ближнем поле - полутоновая картина

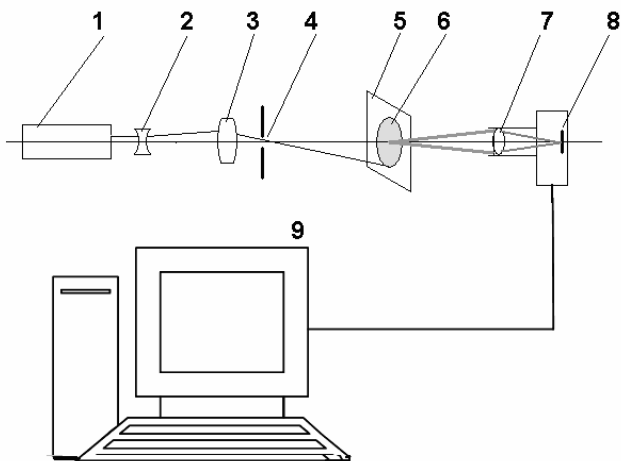


Рис. 50. Регистрация распределения излучения от субмикронного отверстия с металлизированными краями с последующим компьютерным исследованием структуры распределения интенсивности дальнеполюсного излучения на поверхности приемника изображения: 1 – лазер, 2 - 3 – объектив для фокусировки излучения на дифрагирующем отверстии, 4 - субмикронное отверстие с металлизированными краями, 5 – матовый экран проходящего света; 6 – первичное

распределение интенсивности дальнеполюсного излучения; 7 – объектив цифровой камеры, 8 – CCD – матрица камеры, 9 - компьютер

Разработана установка (рис. 50 и 51) для физического моделирования излучения от субмикронного отверстия. При помощи созданной установки выполнено экспериментальное исследование: регистрация распределения излучения от субмикронного отверстия с металлизированными краями с последующим исследованием структуры распределения интенсивности дальнеполюсного излучения на плоской поверхности приемника изображения.

На рис. 8 показан результат регистрации – дальнеполюсное распределение интенсивности на поверхности приемника изображения.

Определение функции распределения интенсивности в пятне дальнеполюсного распределения выполнялось методом изофотометрии с формированием карты распределения в форме изофотограммы.

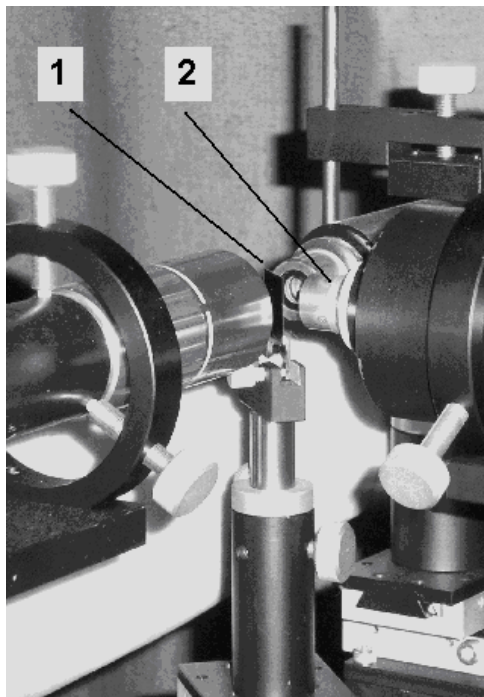


Рис. 51. Установка регистрации распределения излучения от субмикронного отверстия с металлизированными краями: 1 – пластина с субмикронным отверстием 2 –фокусирующая лазерная система

### **Анализ дальнеполюсного распределения интенсивности**

Традиционные методы экспериментального исследования и измерения ФРТ и ФРЛ реальных оптических систем обобщенно можно распределить на две группы [2]:

- 1) Методы фотографической фотометрии.
- 2) Методы фотоэлектрического

сканирования.



График световой характеристики для фотографического приемника изображения называется характеристической кривой фотоматериала (рис. 5). Ее рабочая часть - прямолинейный наклонный участок - характеризуется зависимостью:

$$D_p = \gamma \lg(Et),$$

где  $\gamma$  - коэффициент контрастности;

$D_p$  - оптическая плотность почернения в фотографическом изображении.

$$\gamma = \operatorname{tg} \alpha,$$

$\alpha$  - угол наклона прямолинейного участка характеристической кривой к оси абсцисс. На практике, обычно,  $t(y', z') = \text{const}$ , то есть время экспозиции всех участков изображения одинаково. В этом случае характеристическая кривая отражает зависимость  $D_p = f(\lg E)$ .

Рассмотрение процессов формирования оптических измерительных изображений приводит нас к необходимости использования понятия развитой *характеристики* или *функции преобразования* метода. При этом под характеристикой преобразования понимается функция одной или нескольких переменных, связывающая параметры структуры распределения излучения, построенного системой или деталью в схеме контроля, со структурой формируемого оптического измерительного изображения. Характеристическая кривая фотоматериала служит функцией преобразования при использовании фотоматериала для измерения структуры изображения.

Исходя из найденной для данного снимка характеристической кривой, по значениям плотности определяют искомые уровни освещенности, после чего график преобразуют в функцию распределения освещенности. Полученная функция будет верно отображать искомое распределение освещенности в исследуемом оптическом изображении только в пределах диапазона освещенностей, соответствующего протяженности проекции на ось  $\lg E$  прямолинейного участка характеристической кривой (рис. 6).

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

Как показано ранее, практика исследования характеристик качества изображения (функции рассеяния точки - ФРТ) в ответственных случаях, показывает, что достоверные значения пространственно-частотного спектра могут быть получены лишь в том случае, когда численные значения функции распределения известны в диапазоне перепада интенсивности не менее чем  $10^3$  -  $10^5$ .

Выполняется регистрация оптического распределения в виде серии последовательных кадров при экспозициях различной длительности, расположенных, например, по степенному закону возрастания. Равномерная шкала логарифмов экспозиции позволяет "наводиться" импульсной

характеристической кривой на равномерный ряд фотометрических сечений, расположенных по логарифмическому закону изменения интенсивности. Нормируя полученный ряд освещенностей к значению максимальной освещенности в распределении, получим выражение в относительных единицах:

$$E_{rel} = 1 / t_{rel} ,$$

Время удобно задавать в целых числах, а относительную освещенность - в долях от максимального значения, принятого за единицу.

Итак, используя приемник изображения с импульсной функцией преобразования и изменяя время накопления, достигаем эффекта перемещения импульсной функции преобразования в новые положения вдоль оси  $lg E$ .

В данной работе метод нашел новое эффективное применение для исследования работы БРОМ – зондов.



Рис. 52 . Дальнепольное распределение интенсивности на поверхности приемника изображения

Корректная работа программного комплекса требует, чтобы диаметр исходной интерферограммы (у нас - изофотограммы) составлял 100 мм. Поэтому экспериментально полученный диаметр пятна дальнепольного распределения, составлявший 10 мм, был масштабирован к величине 100 мм, и в этом масштабе выполнялась дальнейшая обработка. После расчета пространственно-частотного спектра (рис.12) диаметр ядра структуры апертуры зонда по шкале составил 0.005 мм. Итак, с учетом начального масштабирования исходной изофотограммы ( $10^x$ ) поперечник апертуры зонда (здесь – дифрагирующего отверстия)  $d_{br}$  определен как:

$$d_{br} = 0.0005 \text{ мм} = 500 \text{ нм}.$$

Этот результат хорошо согласуется с оценкой апертуры на оконечности БРОМ – зондов, изготовленных на основе оптических волокон [1].

Результат пиксельного сканирования изображения пятна дальнепольной засветки в программе “PixelProfile” хорошо согласуется с оценкой функции распределения интенсивности в программной системе “Зебра” (рис.11, а, б) [3], что подтверждает достоверность интерпретации результатов изофотометрии.



Рис. 53. Изофотограмма экспериментального дифрагированного пятна распределения освещенности в дальнем поле

Рис. 54. Автоматическая расшифровка координат точек полос изофотограммы в программной системе “ЗЕБРА”

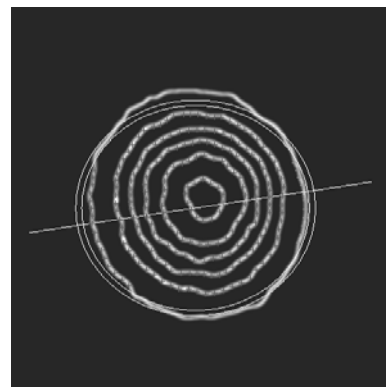
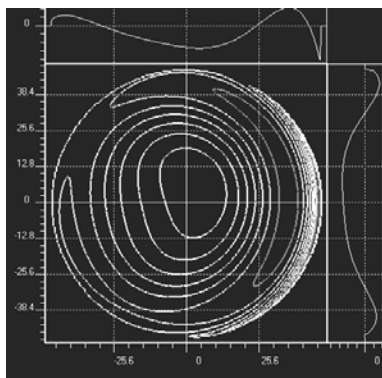
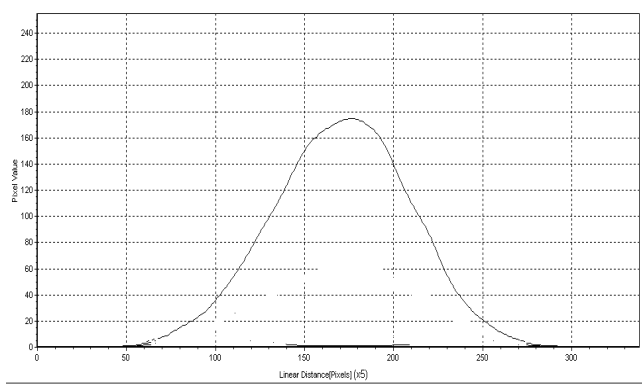


Рис. 55. Компьютерное моделирование структуры дальнепольного распределения освещенности:

а) аппроксимация функции поверхности значений освещенности в программной системе “ЗЕБРА”,



б) контрольная оценка формы профиля функции поверхности значений освещенности в программе “PixelProfile”

Рис. 56. Компьютерное моделирование структуры ближнего поля апертуры БРОМ – зонда (карта функции)

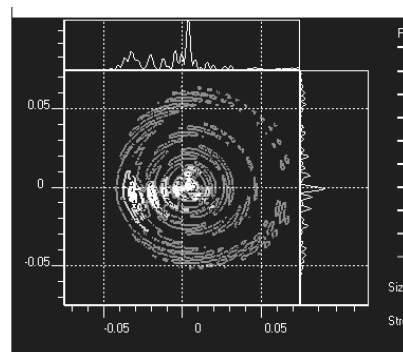
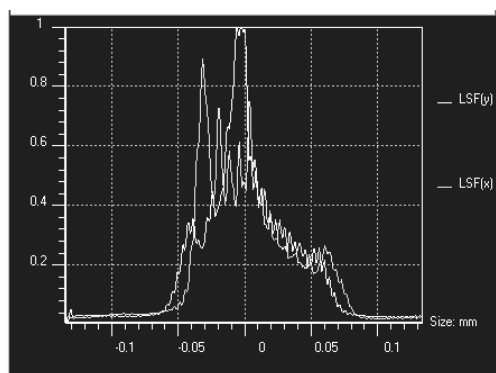


Рис. 57. Компьютерное моделирование структуры ближнего поля апертуры БРОМ – зонда (профиль функции в двух сечениях)

## **Выводы**

1. Исследована концепция экспериментального исследования распределения излучения, дифрагированного на малом отверстии, с целью его использования в качестве исходной информации при моделировании структуры ближнего поля.
2. Разработан метод исследования и отображения дальнепольного распределения интенсивности средствами его изофотометрического анализа.
3. Разработан и реализован метод компьютерного моделирования структуры ближнего поля.

## ***Регистрация волнового фронта дальнего поля бром-зонда и моделирование структуры апертуры зонда***

Рассмотрены концепции использования волнового фронта дальнего поля, дифрагированного на апертуре БРОМ зонда, в качестве информативной поверхности при моделировании структуры ближнего поля на апертуре зонда. Разработан метод и установка регистрации, исследования и отображения дальнепольного распределения интенсивности средствами его компьютерного анализа по модифицированной методике изофотометрии с формированием системы квазиинтерференционных полос и их расшифровкой в системе “ZEBRA-MATHOPTICS”.

Разработан и реализован метод компьютерного моделирования структуры ближнего поля в программе “ZEBRA - IMAGER” с целью определения структуры и размера апертуры БРОМ – зонда.

## **Введение**

В процессе разработки концепций использования волнового фронта дальнего поля, дифрагированного на апертуре БРОМ зонда, в качестве информативной поверхности при моделировании структуры ближнего поля на апертуре зонда были выполнены:

Этап 1 - Исследование структуры волнового фронта, дифрагированного на апертуре зонда, методом компьютерного моделирования распределения интенсивности в дальнем поле и его всесторонней компьютерной обработки.

Этап 2 - Использование экспериментально полученного реального волнового фронта, дифрагированного на апертуре зонда, в качестве информативной поверхности при моделировании структуры ближнего поля.

В свою очередь, этап 2 включал:

- Создание установки и экспериментальное исследование структуры волнового фронта.

- Разработку метода исследования и отображения дальнепольного распределения интенсивности средствами его изофотометрического анализа с получением квазиинтерферограмм структуры волнового фронта.

- Реализацию методов автоматической компьютерной расшифровки и моделирования структуры ближнего поля в программе “ZEBRA-MASTER” и дальнейшей обработки математической модели волнового фронта в программе

“ZEBRA - IMAGER” с целью определения структуры и размера апертуры БРОМ – зонда.

### Сканирующий ближнепольный оптический микроскоп

Предельное разрешение обычной оптики микроскопа определяется дифракционным пределом и не может превышать  $1.22 \lambda/2An$  ( $\lambda$  – длина волны света,  $n$  – показатель преломления,  $A$  – апертура микрообъектива).

Кардинальный шаг в исследовании физических полей со сверхвысоким пространственным разрешением был сделан благодаря созданию новой генерации изображающих систем, основанных на использовании наноразмерных зондов для детектирования разнообразных полей, в том числе - сканирующего ближнепольного оптического микроскопа (СБОМ) [4], называемого также “ближнепольный растровый оптический микроскоп (БРОМ).

Принцип работы СБОМ, как и других зондовых микроскопов, заключается в сканировании поверхности образца источником (или приемником) оптического излучения с размерами, много меньшими длины волны света, на столь же малом расстоянии от поверхности (в ближнем поле). Это позволяет преодолеть дифракционный предел. Достигнуто разрешение 30 нм. Это позволило впервые получить оптические изображения нового широкого класса микрообъектов, таких как большие органические молекулы, вирусы, отдельные элементы приборов микро- и нанoeлектроники, что невозможно методами обычной оптики. Локальная модификация поверхности с помощью СБОМ может найти применение в сверхплотной записи информации и создании приборов нанoeлектроники.

Ключевым элементом СБОМ является зонд. Апертура зонда определяет разрешение ближнепольных оптических устройств. Существует несколько видов зондов. Наиболее перспективным и широко распространенным является зонд на основе адиабатически суженного одномодового оптического волокна, покрытого тонкой металлической пленкой и имеющего малую апертуру на его острие.

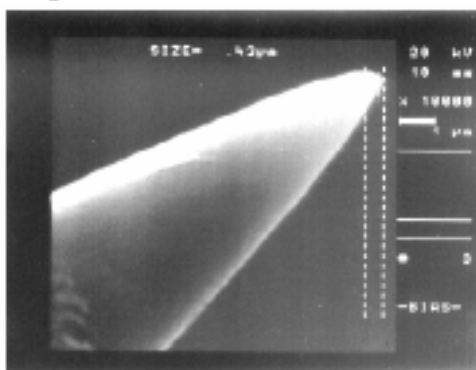
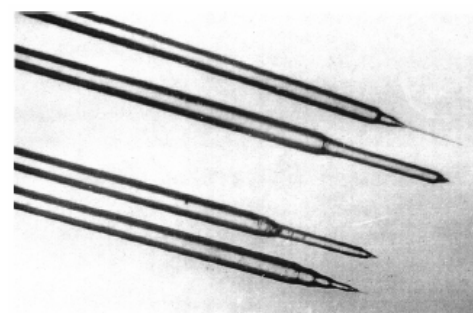


Рис.59 . Изображение острий на концах одномодовых волоконно—оптических световодов на разных стадиях химического травления.

Рис. 58. Зонд с субмикронными размерами острия на основе одномодового кварцевого волокна (диаметр световедущей жилы 9.5 мкм, диаметр кварцевой оболочки 125 мкм).



## Разработка концепций использования волнового фронта дальнего поля для определения аппаратной функции оптоволоконных СБОМ-зондов

Из теории дифракции следует, что распределения электромагнитного поля в ближней и дальней зоне дифракции взаимосвязаны, что позволяет решать обратные задачи дифракции и оптического сверхразрешения при наличии соответствующих априорных данных. Необходимость решения обратных задач такого рода возникла в ближнепольной оптике в связи с трудностями точного исследования субволновой апертуры на оконечности СБОМ зондов, изготовленных на основе оптических волокон. Эту апертуру нельзя различить в обычный оптический микроскоп. Одним из методов, обеспечивающих получение необходимой информации, является метод исследования СБОМ зондов по характеристикам дальнего светового поля [4].

Для получения информации о дальнем поле достаточно зарегистрировать угловое распределение интенсивности, поскольку при дифракции на субволновых апертурах изменение фазы в пределах угла охвата  $\pm 90^\circ$  пренебрежимо мало. Современные оптоволоконные СБОМ - зонды обладают хорошей световой эффективностью, при этом мощность на выходе зонда достигает нескольких милливатт, что позволяет применять стандартные ПЗС-приемники для научных исследований. В частности, могут быть использованы ПЗС-матрицы с чувствительностью порядка 1 лк для длины волны 632.8 нм.

### Экспериментальное исследование

На плоскость ПЗС-приемника (на схеме обозначен как USB) проецируется картина распределения интенсивности излучения, выходящего из зонда.

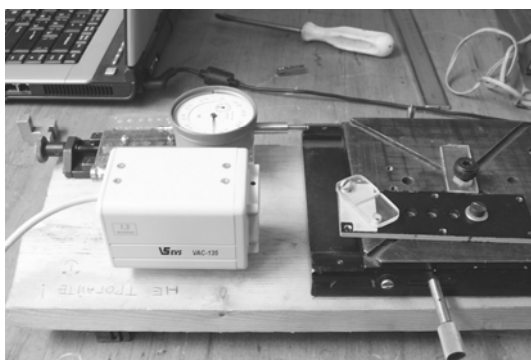


Рис.60. Общий вид измерительной установки.

На рис. 4 показан общий вид макета, а на рис.5 - схема взаимного расположения составных частей измерительной установки.

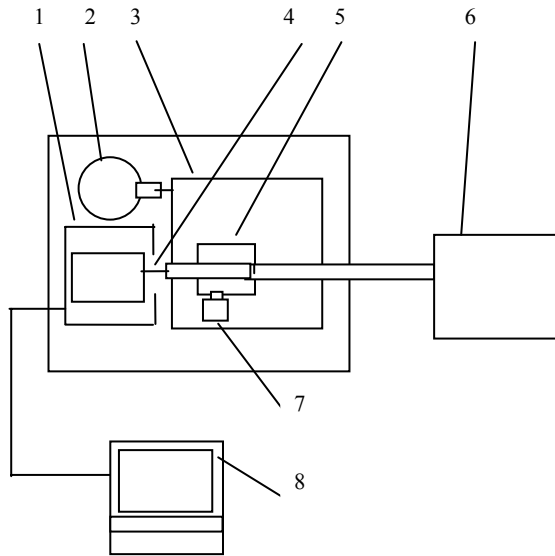


Рис. 61. Схема взаимного расположения составных частей измерительной установки.

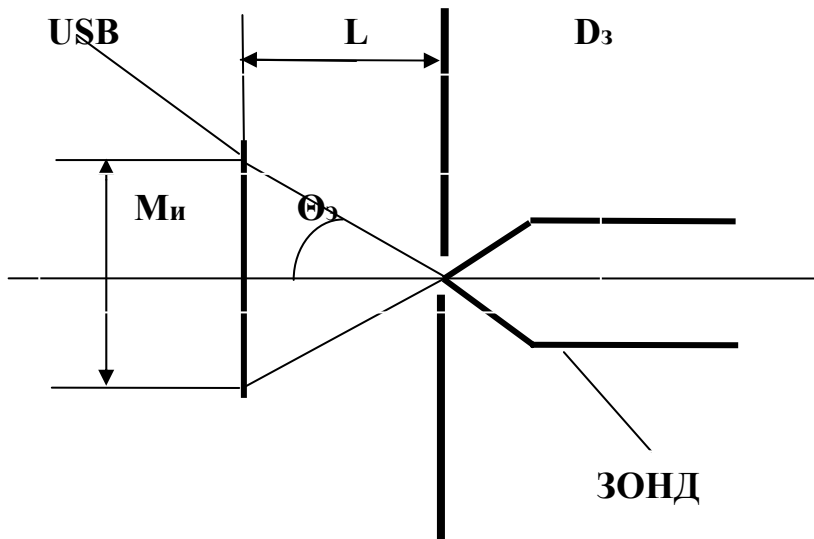


Рис.62. Схема эксперимента

$D_3$  – диаметр зрчка зонда,  
 $M_{и}$  – ширина дифрагированного пятна на матрице,  
 $\Theta_{н}$  - угловой радиус дифрагированного пятна,  
 $L$  – расстояние от зрчка зонда до центра матрицы.  
 $USB$  – чувствительная площадка CCD – камеры.

Если учитывать только действие дифракции Фраунгофера, угловой радиус

$\Theta$  дифрагированного пятна составит:

$$\theta_{\dot{Y}} = \frac{1.22\lambda}{D_{\zeta}},$$

где  $D_3$  - диаметр дифрагирующего зрчка.

Найдем  $D_3$  :

$$D_{\zeta} = \frac{1.22\lambda}{\theta_{\dot{Y}}}.$$

Здесь

$$\theta_{\dot{y}} = \arctg\left(\frac{M_{\dot{E}}}{2L}\right).$$

Пусть  $L = 4$  мм, длина матрицы 10 мм, высота – 7.5 мм, тогда диагональ матрицы составит 12.5 мм. Поперечник изображения на матрице (80 % от диагонали):  $M_{\text{И}} = 12.5 \cdot 0.8 = 10$  мм.

Угловой радиус пятна на матрице ( $L = 4$  мм):

$$\theta_{\dot{y}} = \arctg\left(\frac{M_{\dot{E}}}{2L}\right) = \arctg(1.25) = 0.896(\text{рад})$$

Тогда диаметр апертуры зонда (пороговый размер):  $D_{\zeta} = \frac{1.22 \cdot 0.6328}{0.896} = 0.862 \mu\text{м}$ .

### Компьютерная обработка экспериментальных данных методом изофотометрической квазиинтерферометрии

Метод изофотометрической квазиинтерферометрии разработан нами [1, 2] для исследования структуры неравномерности распределения освещенности на данной поверхности и первоначально был применен при экспериментальных исследованиях в области компьютерной графики и моделирования виртуальной реальности.

Рассмотрим метод на конкретном примере обработки зарегистрированного пятна дальнепольной засветки, полученной при помощи установки, показанной на рис.61.

Методика обработки состоит из следующих операций:

1. Фильтрация шумов исходного зарегистрированного изображения пятна дальнепольной засветки (Таблица 1 – а, б).
2. Наложение клина оптической плотности на изображение пятна дальнепольной засветки (Таблица 2 – а).
3. Обработка изображения пятна дальнепольной засветки с применением специально разработанной программы “Контур”, выполняющей преобразование полутонового изображения в систему контуров как карту изофот (изофотограмму) исследуемого пятна (Таблица 2 – б).

Для преобразования полутонового изображения в систему контуров применяется периодическая функция преобразования (ФП) типа "гребенка" (рис.6), которая может быть наглядно представлена выражением:

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

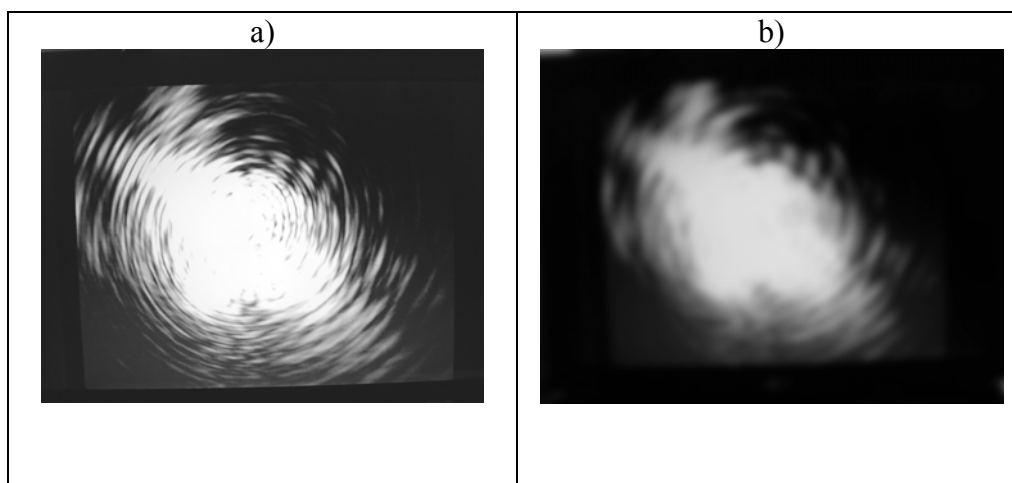
где  $\lambda_w \leq W \leq n \lambda_w$ ,

или, на практике:  $I(W) = I_{\text{max}}$  при  $W/\lambda_w = 0,1,2,3,\dots$

$I(W) = 0$  при  $W/\lambda_w \neq 0,1,2,3,\dots$



Таблица 1



Исследованиями показана глубокая аналогия характера преобразования информации в процессе дискретизации полутонового изображения между изофотометрией и интерферометрией [2]. Разница здесь лишь в природе физической величины, подвергаемой регистрации и исследованию. В случае интерферометрии это фазовая составляющая излучения как функция деформации данного волнового фронта. В случае изофотометрии - амплитудная составляющая излучения как функция неравномерности интенсивности волнового фронта.

Таблица 2

<p>a)</p>	<p>b)</p>	<p>Результат пиксельного сканирования изображения пятна дальнепольной засветки в программе “PixelProfile” хорошо согласуется с результатами изофотометрии и оценкой функции распределения интенсивности в программной системе “Зебра” (рис.9 и 10), что подтверждает достоверность интерпретации результатов изофотометрии.</p>
<p>c)</p>		

Наложение клина оптической плотности на изображение пятна дальнепольной засветки приводит к тому, что каждая полоса его изофотограммы формируется как график **профиля** распределения интенсивности в данном сечении (подобно формированию интерферограммы прямых полос).

Таким образом, полученная изофотограмма изображения пятна дальнепольной засветки рассматривается нами как **квазиинтерферограмма**. Такой подход позволяет выполнять компьютерную обработку полученной изофотограммы функции распределения интенсивности в пятне, применяя программное обеспечение для обработки интерферограмм. В данной работе использована программная система “ZEBRA MATHOPTICS”, разработанная в СПб ГУ ИТМО на кафедре ПиКО [ 3 ].

Итак, следующие этапы обработки дальнепольной информации связаны с программами пакета ZEBRA.

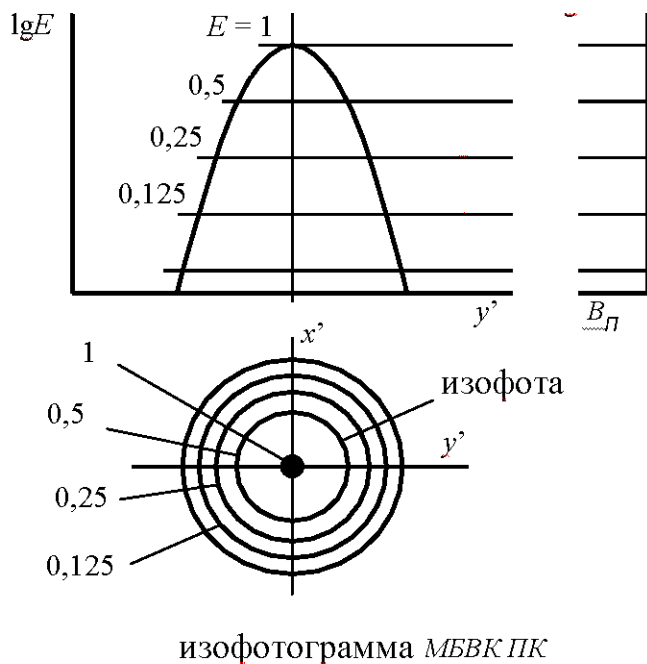


Рис. 63. Схема метода формирования карты функции распределения интенсивности программой МБВК-ПК

Рис.63. Схема метода изофотометрии поля неравномерной засветки: формирование системы параллельных полос как профилей поля неравномерной интенсивности

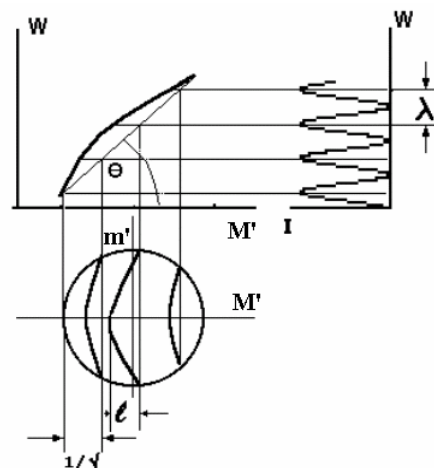
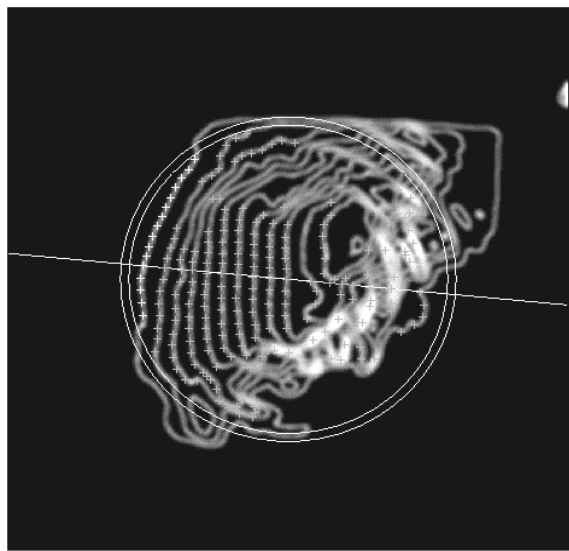
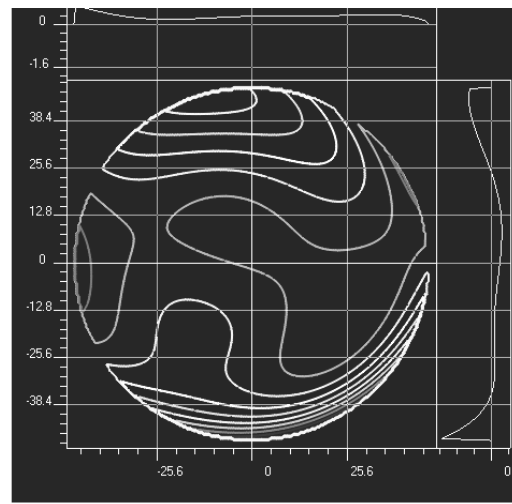


Рис.64. Автоматическое распознавание изофот как системы квазиинтерференционных полос



4. Обработка изофотограммы изображения пятна дальнепольной засветки с применением пакета ZEBRA – операция автоматического распознавания изофот как системы квазиинтерференционных полос (рис.65).

Рис.66. Аппроксимация поверхности функции распределения интенсивности в пятне дальнеполевой засветки (карта изоуровней распределения интенсивности – изофот, или изофотограмма).



5. Аппроксимация поверхности функции распределения интенсивности в пятне дальнеполевой засветки с определением системы коэффициентов Цернике, дающих математическую модель функции распределения (рис. 66).

6. Полутоновая картина компьютерной модели распределения интенсивности в дальнем поле (рис. 67).

Итак, в ходе данной работы получена информация о распределении интенсивности в пятне дальнеполевой засветки:

а) В табл.1а – в форме результата прямой регистрации распределения интенсивности при помощи матричной камеры; снимок показывает, что распределение интенсивности содержит плавную образующую и высокочастотную (шумовую) составляющую. Наличие последней повидимому связано с негладкостью поверхности апертуры БРОМ – зонда, возникающей по ходу технологических операций его изготовления, а также при интерференции паразитных пучков излучения, дифрагированных на торце зонда, на границах системы кор – металлическое покрытие.

На данном этапе исследования, как видно, выполнена обработка зарегистрированного изображения с целью разделения указанных составляющих структуры дальнеполюного излучения путем компьютерной фильтрации в программе Adobe Photoshop, опция Blur – Gauss Blur. В результате обработки высокочастотная составляющая структуры изображения устранена, и дальнейшей обработке подвергается плавная составляющая (табл. 1 - б). Полученное изображение показывает, что значительная часть дальнеполюной засветки характеризуется достаточно равномерным распределением освещенности.

б) Это наблюдение количественно подтверждается изофотометрическим анализом изображения (табл.1 - б), где, в результате применения ФП типа “гребенка - клин” [2], распределение интенсивности передается как система профилей интенсивности по ряду сечений поля засветки. Значительная часть полученной изофотограммы занята системой прямолинейных профилей, указывающих на равномерное распределение интенсивности.

в) Автоматическая расшифровка и аппроксимация в программе ZEBRA (рис.9) дает карту и графики профилей распределения интенсивности.

г) Дальнейшая обработка в программе ZEBRA – Imager позволяет получить отображение поверхности функции распределения интенсивности в пятне дальнепольной засветки в форме полутоновой картины компьютерной модели распределения интенсивности, также указывающей на достаточно равномерное распределение интенсивности по большей части поверхности пятна дальнепольной засветки (рис. 10).

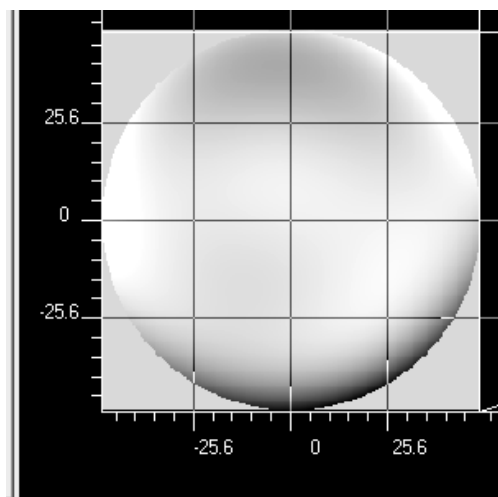


Рис. 67. Отображение поверхности функции распределения интенсивности в пятне дальнепольной засветки как полутоновой картины компьютерной модели распределения интенсивности

7. Взаимосвязь ближнего и дальнего полей устанавливаются на основе описания распространения и дифракции светового поля на субволновых структурах. Распределение амплитуды ближнего поля выражается наиболее строго через **пространственно-частотный спектр** [6]. Это обстоятельство принято использовать для реконструкции распределения интенсивности ближнего поля в зоне апертуры зонда по интенсивности поля в дальней зоне. На рис. 11 показан результат дальнейшей обработки полученной функции распределения интенсивности в пятне дальнепольной засветки в программе ZEBRA с выполнением двумерного преобразования Фурье. Полученная диаграмма и графики профилей сечений характеризуют структуру электромагнитного поля на апертуре исследуемого зонда.

Корректная работа программного комплекса требует, чтобы диаметр исходной интерферограммы (у нас - квазиинтерферограммы) составлял 100 мм. Поэтому экспериментально полученный диаметр пятна дальнепольного распределения, составлявший 10 мм, был масштабирован к величине 100 мм, и в этом масштабе выполнялась дальнейшая обработка. После проведения преобразования Фурье (рис.68) диаметр ядра структуры апертуры зонда по шкале составил 0.004 мм.

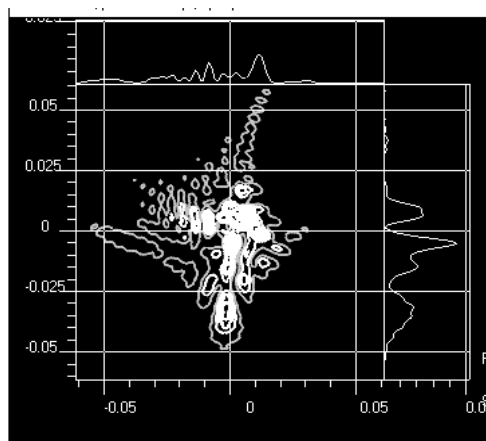


Рис. 68. Результат дальнейшей обработки функции распределения интенсивности в пятне дальнепольной засветки с выполнением преобразования Фурье характеризует структуру электромагнитного поля на апертуре исследуемого зонда

Итак, с учетом начального масштабирования исходной квазиинтерферограммы ( $10^x$ ) поперечник апертуры зонда  $d_{br}$  определен как:

$$d_{br} = 0.0004 \text{ мм} = 400 \text{ нм}.$$

## **Выводы**

1. Разработана и собрана установка для регистрации распределения интенсивности дальнего светового поля БРОМ зондов.
2. Выполнена регистрация распределение интенсивности на поверхности матричного приемника USB – камеры (VAC-135) и ввод изображения пятна дальнеполюсной засветки в компьютер.
3. Разработан и реализован метод исследования и отображения дальнеполюсного распределения интенсивности средствами его изофотометрического с получением квазиинтерферограммы функции неравномерности распределения интенсивности в дальнем поле.
4. Предложен метод компьютерного моделирования структуры ближнего поля на основе автоматической расшифровки и математической обработки полученной экспериментальной информации путем ввода квазиинтерферограммы дальнеполюсного распределения интенсивности в программу для обработки интерферограмм ошибок и аберраций оптических систем (ZEBRA-Mathoptics).
5. Полученные результаты подтвердили эффективность разработанного метода экспериментального исследования БРОМ зондов по характеристикам дальнего светового поля.

## **КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ**

### **Введение**

Как видно из вышеизложенного, сведения о структуре изображения, построенного изготовленной оптической системой, могут быть получены прямым и косвенным путями. В главах 2, 3, 4 показал что, способы прямой оценки позволяют определить значения таких критериев качества изображения, как разрешающая способность, пороговый контраст, концентрация энергии и т.д.

Эти величины могут быть получены и косвенным путем - при математической обработке данных о форме волнового фронта, сформированного в зрачке исследуемой системы [5, 12]. Преимущества косвенных методов состоят о 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.

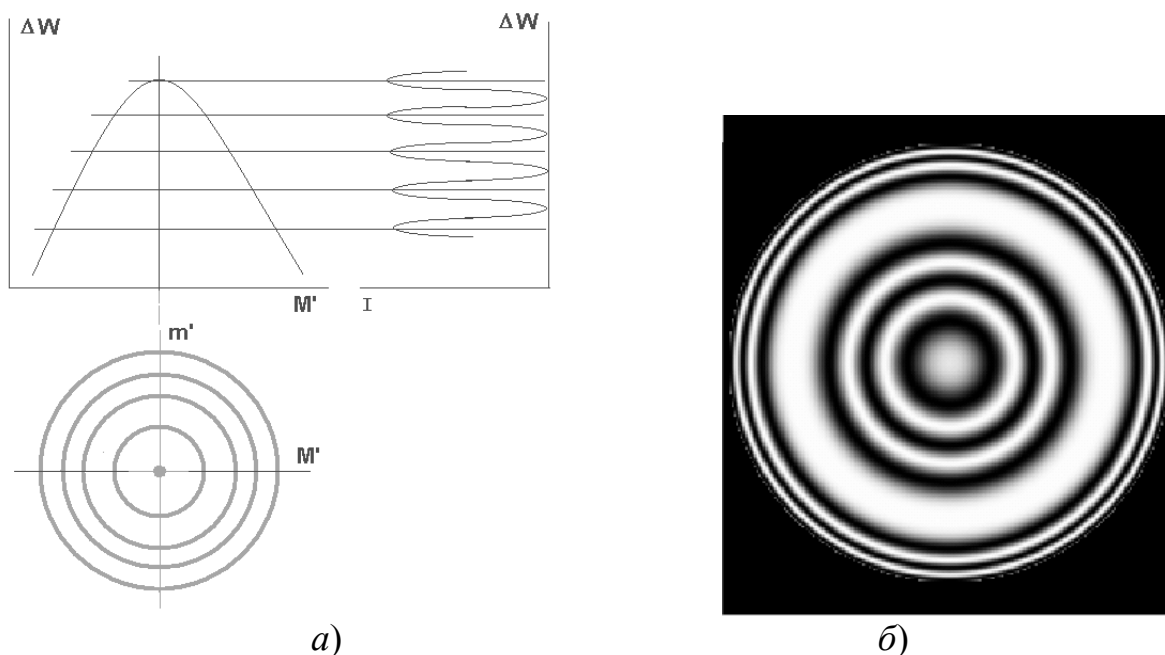


Рис. 70. Схема метода интерферометрии для варианта точной продольной настройки интерферометра (а) и вид интерферограммы, полученной в соответствии со ней (б).

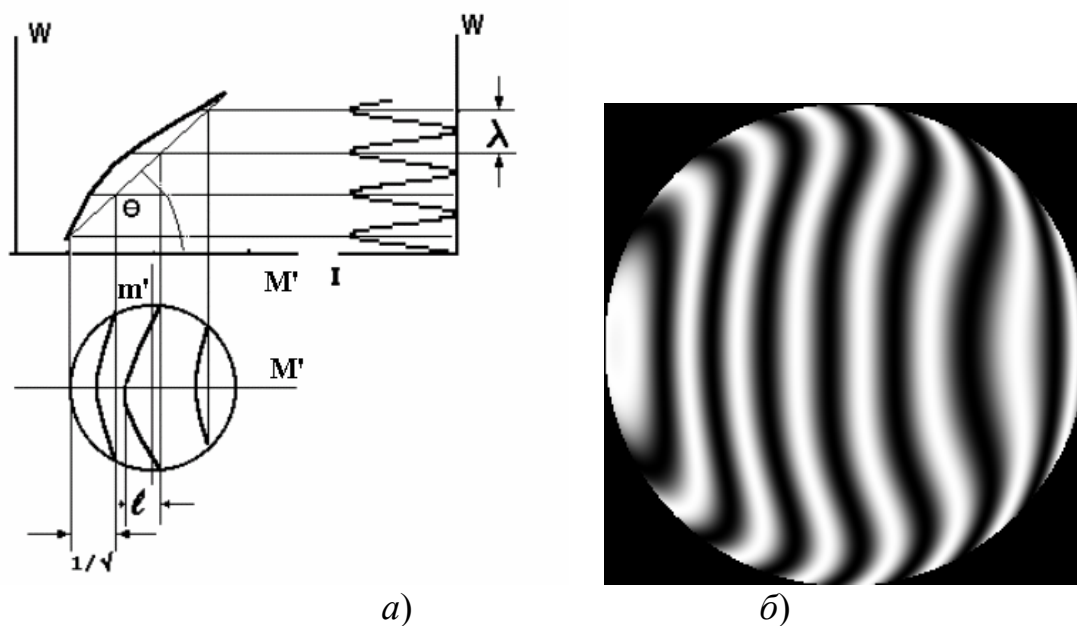


Рис.71. Схема метода интерферометрии для варианта поперечной настройки интерферометра (а) и вид интерферограммы, полученной в соответствии с ней (б)

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.

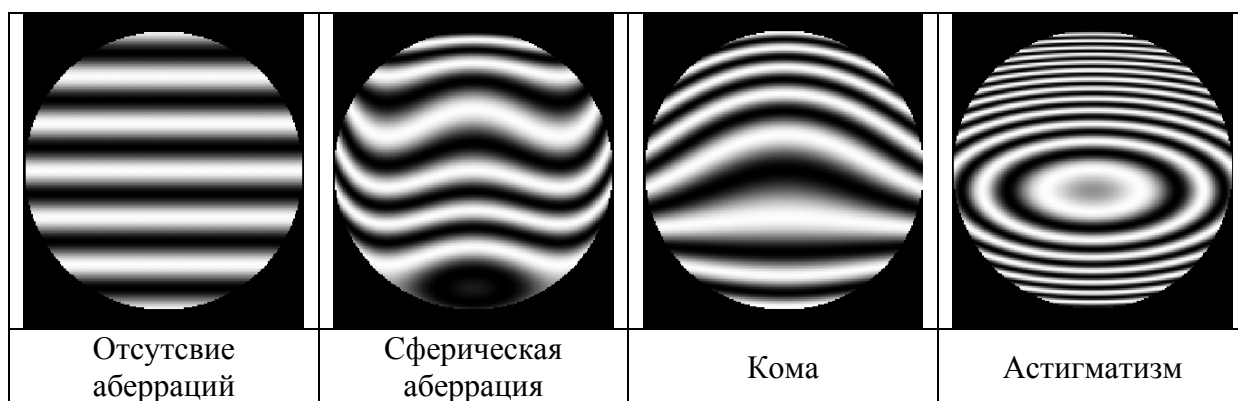
В настоящее время одним из наиболее надежных и точных методов получения деформаций волнового фронта является интерферометрический метод. Здесь

проблема исследования оптической системы ставится как задача о деформациях, претерпеваемых поверхностью световой волны [2].

Особое преимущество интерферограммы состоит в том, что при определенных условиях может быть получена интерференционная картина, подобная топографической карте исследуемой волновой поверхности, где изолинии уровня (горизонтالي) представлены в виде полос с разностью хода, кратной длине волны (рис.70, 71).

Таким образом, метод интерферометрии сочетает достоинство наглядности, подобно теневому методу, с достоинством возможности количественных оценок деформаций волнового фронта, связанных с аберрациями оптических систем и ошибками оптических поверхностей и элементов. Так, общий вид интерференционной картины часто позволяет опознать характер преобладающей аберрации для исследуемой системы (Табл. 5).

Табл. 5 . Вид интерференционных картин для круглого зрачка



Вид многочисленных интерференционных картин для круглого зрачка при аберрациях разного типа подробно рассмотрен в [12]. В табл. 5 рассмотрена форма интерференционной картины для ряда типовых аберраций.

Интерферометрический метод основан на измерении искривления интерференционных полос для определения отклонения между исследуемым и эталонным волновыми фронтами или отклонения между исследуемым волновым фронтом и его репродукцией со сдвигом. Поэтому погрешность интерферометрического метода зависит от двух причин:

- погрешность определения искривлений интерференционных полос;
- погрешность эталонного волнового фронта (для интерферометров с образцовым волновым фронтом);
- погрешность определения величины сдвига (для интерферометров сдвига).

Первая причина приводит к ограничению интерферометрического метода в его исходной форме, так как освещенность поперек полосы изменяется по синусоидальному закону, контуры полос неотчетливы и поэтому погрешность визуальной расшифровки не менее 0,1 ширины полосы [1]. Современные методы специальной регистрации дают возможность не только записать информацию, содержащуюся в той или иной картине при оптических

измерениях, но и преобразовать структуру изображения к виду, позволяющему повысить точность при его расшифровке на компьютере. При этом необходимо использовать оперативный алгоритм обработки интерферограмм, чтобы достичь максимальной точности.

Вторая причина является ограничением традиционных интерферометров (например, по схеме Физо или Тваймана – Грина), так как в их конструкции необходимо применение образцового оптического элемента (обычно – образцовой оптической поверхности, плоской или сферической) для формирования опорного волнового фронта. Такой элемент создает волновой фронт, который содержит остаточные ошибки (деформации). Эти ошибки порождаются рядом причин, в числе которых – следующие.

1) Остаточные ошибки изготовления: применяемые традиционно методы обработки и контроля точных оптических поверхностей не позволяют гарантировать, что погрешности формы оптических поверхностей будут меньше, чем  $\lambda/20$ .

2) Возможность неконтролируемого изменения формы оптической поверхности образцовой детали.

Поэтому в данной работе с целью повысить точность измерения волнового фронта на порядок мы решили две указанные проблемы:

- исследование и улучшение алгоритма обработки интерферограмм;
- исследование и развитие интерферометров, в которых не применяются эталонные поверхности, таких как интерферометр сдвига и интерферометры с дифрагированным эталонным волновым фронтом.

## ***Интерферометр сдвига***

### **Устройства**

Наряду с классическими интерферометрами, построенными по принципу деления амплитуды световой волны и создания рабочего и опорного волновых фронтов, создаются интерферометры, основанные на принципе сдвига раздвоенного по амплитуде рабочего волнового фронта, известные как интерферометры сдвига. Замечательная особенность таких интерферометров заключается в том, что они не требуют применения эталонных оптических деталей, так как в них контролируемый волновой фронт накладывается на точно такой же, но сдвинутый. Сдвиг может быть боковым, поворотным, реверсивным или радиальным. Интерферометры сдвига мало чувствительны к вибрациям, так как интерферирующие лучи проходят практически один и тот же путь. Основным недостатком интерферометров сдвига является меньшая наглядность и сравнительная сложность расшифровки интерференционной картины при количественной оценке погрешностей исследуемой системы, особенно при определении поверхности деформаций волнового фронта. Данная работа посвящена решению упомянутой проблемы и открывает пути расширения применений интерферометров сдвига.

Рассмотрим принцип работы интерферометра сдвига. Пусть в исследуемую оптическую систему 6 (рис. 72), например объектив, падает плоский



волновой фронт, который преобразуется в сферический волновой фронт, в общем случае искаженный аберрациями и ошибками изготовления объектива. Кубик 7 с полупрозрачной гипотенузной гранью делит пучок лучей на два и направляет полученные пучки к плоским зеркалам 8 и 9. Задний фокус исследуемой системы совмещен с плоскостью зеркал 8 и 9. Пучки лучей, отраженные от зеркал 8 и 9, возвращаются в автоколлимации на светоделительный кубик 7 и заполняют входной зрачок объектива 10, интерферируя между собой.

Изображение зрачка исследуемого объектива 6 с заполняющей его картиной полос интерферометрии сдвига, формируется объективом регистрирующей камеры 10 на поверхности матрицы 11.

Картина интерференционных полос зависит как от деформаций исследуемого волнового фронта, так и от настройки интерферометра. Если зеркала 8 и 9 расположены на равных расстояниях от выходных граней кубика 7, то поворотом одного из них можно получить интерференционную картину за счет бокового сдвига волновых фронтов (рис. 5.3 и 5.5).

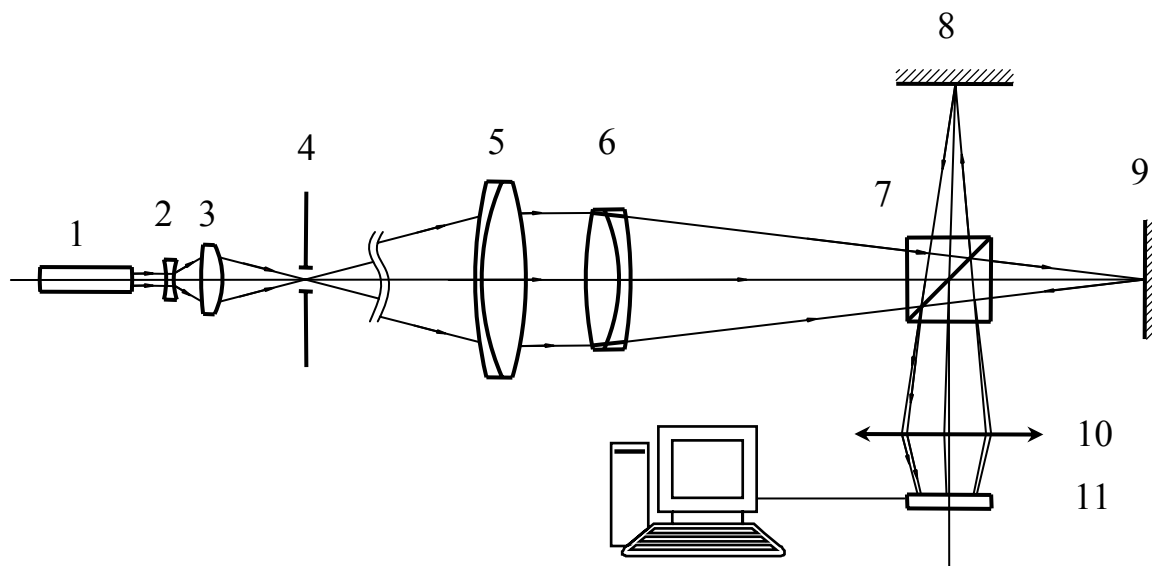


Рис. 72. Схема интерферометра бокового сдвига

1 – лазер; 2 и 3 – осветительный объектив; 4 – точечная диафрагма;  
5 – коллиматорный объектив; 6 – исследуемый объектив; 7 – светоделительный кубик; 8 и 9 – плоские автоколлимационные зеркала; 10 – объектив регистрирующей камеры; 11 – матрица регистрирующей камеры

Таким образом, интерференционная картина, возникающая в интерферометре сдвига, является результатом взаимодействия двух одинаковых, но смещенных волновых фронтов, полученных с помощью разделительного элемента (рис. 5.3). В качестве разделительных элементов можно использовать также поляризационные призмы, зеркала, клинья, дифракционные решетки и другие оптические элементы.

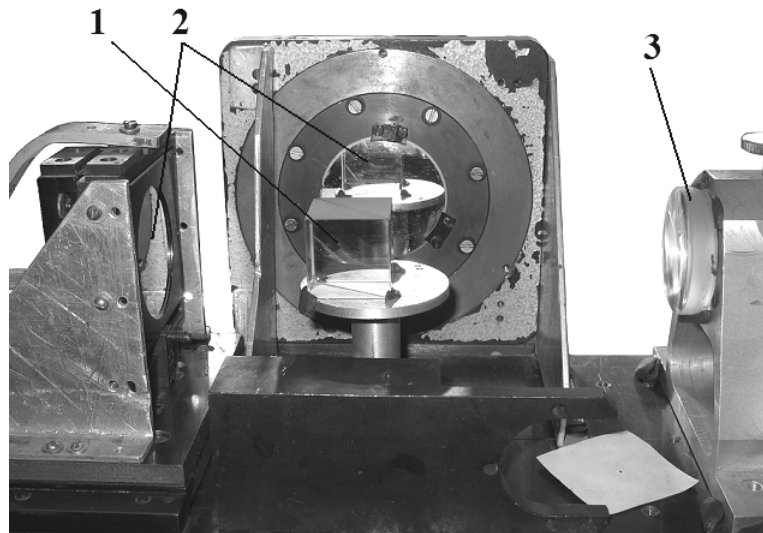


Рис. 73.. Общий вид интерферометр сдвига  
1 – зеркала; 2 – светоделительный кубик; 3 – исследуемый объектив

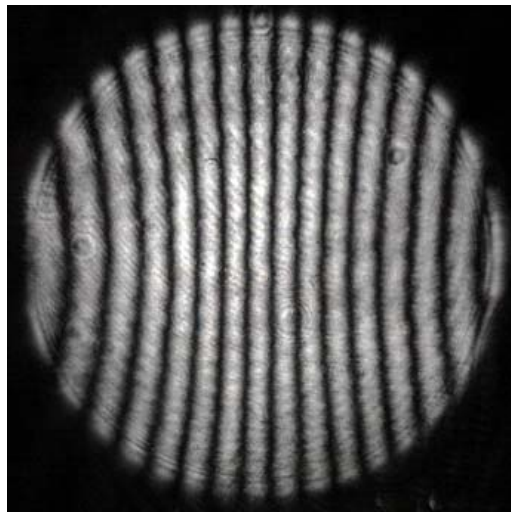


Рис. 74. Экспериментальная интерферограмма сдвига

В данном макете интерферометра использован светоделительный кубик 7 (рис. 72).

### Математическое описание интерферометра бокового сдвига

На рис. 5.6 показаны исходный волновой фронт и его аналог с боковым сдвигом. Будем считать исходный фронт практически сферическим, с небольшими отклонениями  $W(x, y)$  от сферы (где  $x, y$  – координаты произвольной точки  $P$ ). При смещении фронта на величину  $s$  в направлении  $x$  его погрешность в точке  $P$  составит  $W(x-s, y)$ , а результирующая разность хода  $\Delta W$  для двух фронтов определится как  $[W(x, y) - W(x-s, y)]$ . Вид интерференционной картины определяется разностью хода между двумя волновыми фронтами, т. е. функцией  $\Delta W(x, y)$ . Интенсивность в произвольной точке в интерференционной картины выражает формула [3]

$$I(x, y) = 2I_0 \left[ 1 + \cos \left( 2\pi \frac{\Delta W(x, y)}{\lambda} \right) \right], \quad (53)$$

где  $I_0$  - интенсивность каждой из световых волн,  
 $\Delta W(x, y)$  - разность хода,  
 $\lambda$  - длина волны излучения.

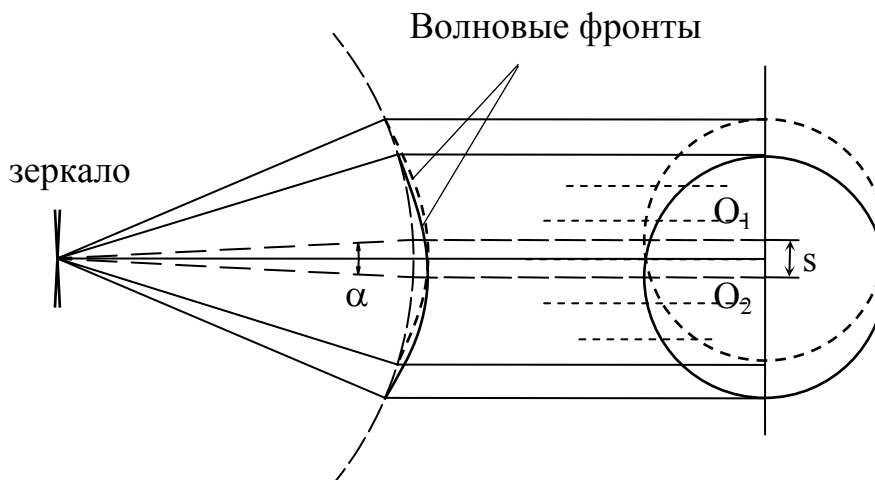


Рис. 75. Принцип формирования интерференционных полос

Интерференционная картина представляет собой топографию этой функции. Из (1) получаем уравнения для интерференционных полос

$$\Delta W(x, y) = W(x, y) - W(x - s, y) = N\lambda, \quad (.54)$$

где  $x, y$  – координаты на зрачке испытуемой системы,  
 $N$  – порядок полосы – целое число.

Интересно отметить, что при малых значениях  $s$  уравнение (5.2) можно записать в виде [1, 4]

$$\frac{\partial W}{\partial x} s = N\lambda. \quad (55)$$

Интерферометр бокового сдвига дает информацию об аберрации  $\partial W / \partial x$  луча в угловых единицах. Уравнение становится более корректным при  $s \rightarrow 0$ , однако одновременно снижается и чувствительность; поэтому, исходя из требуемой в каждом конкретном случае точности, необходимо находить оптимальное значение  $s$ .

Пользуясь формулой (5.1) можно вычислить интерферограмму по заданному волновому фронту, и наоборот, по интерферограмме можно восстановить испытуемый волновой фронт (качественно и количественно оценить погрешности исследуемой оптической системы). Для этого мы разработали алгоритмы и программное обеспечение, которые позволяют моделировать интерферограмму оптической системы по конструктивным параметрам системы, отображая влияние расчетных аберраций. Программа позволяет также восстанавливать волновой фронт в ходе контроля изготовленной оптической системы.

## Алгоритм вычисления интерферограммы сдвига исходя из расчетных параметров исследуемой оптической системы

С целью углубленного анализа механизма работы интерферометра сдвига в данном исследовании разработана программа вычисления интерферограмм сдвига. Программа включает в себя следующие операции.

1. Ввод исходных данных, таких как:
  - конструктивные параметры оптической системы,
  - положение и величина предмета,
  - диаметр и положение входного зрачка,
  - величина сдвига  $s$ .
2. Вычисление хода совокупности лучей, заполняющих зрачок, по формуле Федера.
3. Вычисление деформации волнового фронта  $W(x, y)$ .
4. Описание функции деформации волнового фронта по полиному Цернике  $C(x, y)$  методом наименьших квадратов.
5. Вычисление разности хода  $\Delta W(x, y) = C(x, y) - C(x - s, y)$  и интенсивности в данной точке волнового фронта по формуле (5.1).
6. Приведение интенсивности к пиксельной яркости и отображение на экране интерференционной картины как совокупности вычисленных значений интенсивности.

На основе данного алгоритма создана программа для исследования интерферометра сдвига. На рис. 5.7 (а) и (б), представлены интерферограммы бокового сдвига объектива телескопической системы. Его параметры приведены в таблице 1, где:

- $r$  – радиусы кривизны поверхностей,
- $d$  – расстояние между двумя последующими поверхностями,
- $D_{св}$  – световой диаметр поверхности.

Табл. 5.2

Конструктивные параметры исследуемого объектива

Параметры			Материал
$r$	$D$	$D_{св}$	Стекло
128,680	10,00	50	К8
-90,860	4,00	50	ТФ1
-275,720	198,28	50	

На рис. 5.7 а) видно, что при небольшом сдвиге и отсутствии поперечной расфокусировки интерферометра (то есть взаимного заклона наложенных волновых фронтов) количество интерференционных полос очень мало. Следовательно, при обработке такой интерферограммы невозможно получить информацию о волновом фронте на всей площади зрачка исследуемой системы. Поэтому необходимо сдвиг дополнить небольшой поперечной расфокусировкой для того, чтобы полосы стали чаще (рис. 5.7 б).

Здесь под расфокусировкой интерферометра понимается поперечное разведение автоколлимационных бликов, приводящее к появлению взаимного наклона двух интерферирующих волновых фронтов.

Кроме того, ввод поперечной расфокусировки позволяет устранить неопределенность при расшифровке сложных волновых фронтов, позволяя избежать появления интерференционных полос замкнутой формы.

При математической обработке результатов интерферометрии введенная технологическая расфокусировка устраняется программой в процессе балансирования системы коэффициентов Цернике.

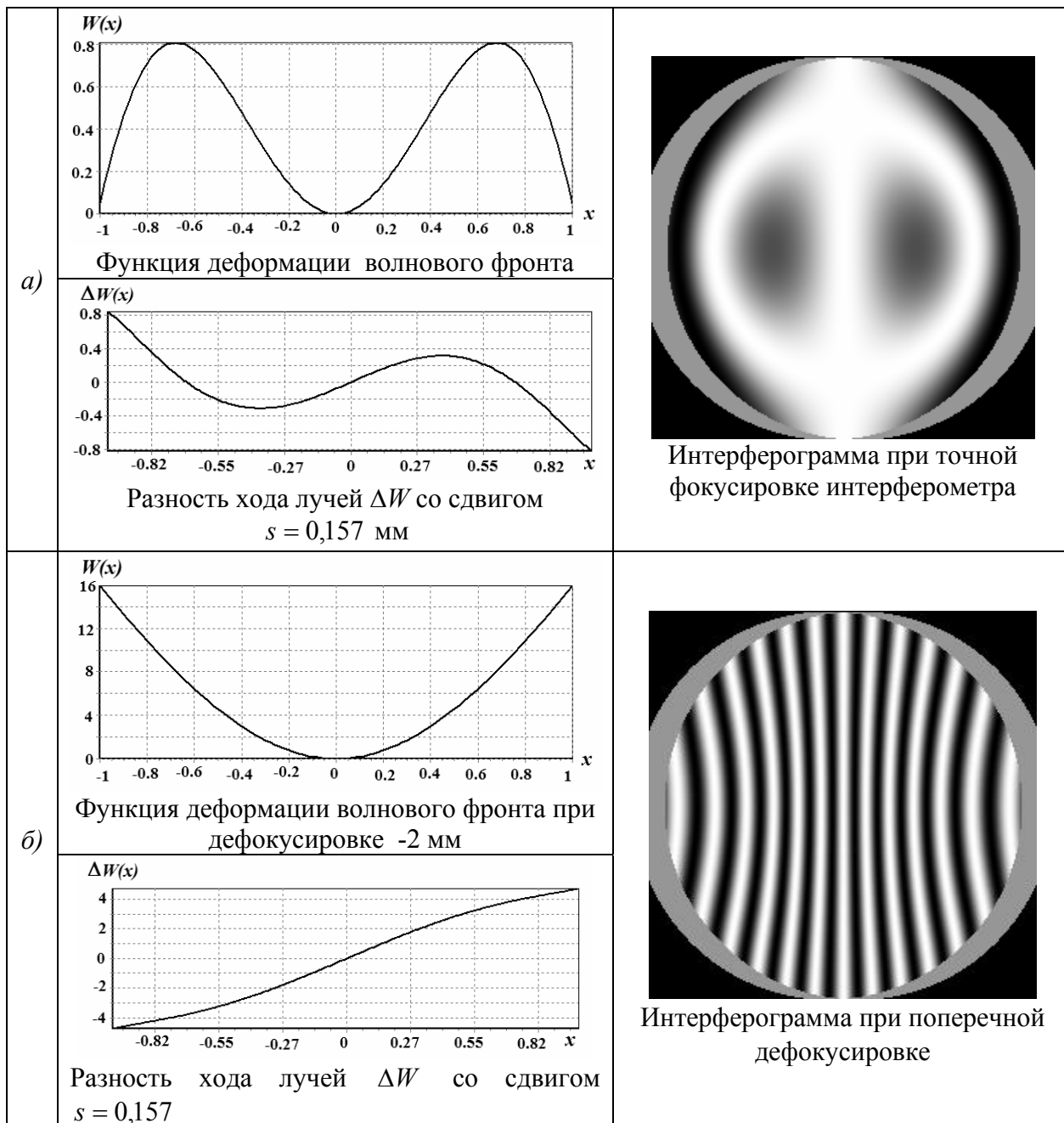


Рис. 76. Интерферограмма бокового сдвига для двухлинзового склеенного объектива а) в случае присутствия только сферической aberrации без дефокусировки; б) в случае присутствия только сферической aberrации и дефокусировки -2 мм

## Восстановление волнового фронта при обработке интерферограммы сдвига

Задача количественной оценки погрешности оптических систем по интерферограмме сдвига сложнее, чем задача обработки классических интерферограмм Тваймана – Грина или Физо, и в полном объеме может быть решена только благодаря эффективным алгоритмам.

Как известно, для восстановления двумерной функции деформаций волнового фронта  $W(x, y)$  необходимо и достаточно знать первые производные этих деформаций по двум взаимно-перпендикулярным направлениям  $x$  и  $y$  [малакара]. После этого функцию  $W(x, y)$  находят путем решения системы дифференциальных уравнений. В этом случае две первые производные волнового фронта можно определить из двух интерферограмм при сдвиге по двум указанным направлениям.

Далее мы применим указанный принцип восстановления волнового фронта при использовании двух сдвиговых интерферограмм, полученных за счет сдвига разделенного по амплитуде волнового фронта последовательно по двум взаимно-перпендикулярным направлениям.

Из формулы (5.3) следует, что если сдвиг происходит поочередно по двум направлениям, перпендикулярным друг к другу ( $x$  и  $y$ ), то получаются две интерферограммы с полосами, которые описываются уравнениями:

$$\frac{\partial W}{\partial x} s = \lambda N,$$
$$\frac{\partial W}{\partial y} s = \lambda N.$$

Совокупный результат определяется системой уравнений

$$\begin{cases} \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\lambda N}{s} \\ \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{\lambda N}{s} \end{cases} \quad (56)$$

Из системы уравнений (5.4) видно что, все точки, находящиеся на одной полосе, отображают первую производную волнового фронта со значением  $\lambda N/s$  в заданном направлении  $x$  и  $y$ .

Поэтому при обработке двух интерферограмм получаем совокупность точек, принадлежащих функциям  $\partial W/\partial x$  и  $\partial W/\partial y$ . Эти функции можно описать полиномами Цернике  $P_x(x, y)$  и  $P_y(x, y)$  методом наименьших квадратов. В результате имеем:

$$\begin{cases} \frac{\partial W(x, y)}{\partial x} = P_x(x, y) \\ \frac{\partial W(x, y)}{\partial y} = P_y(x, y) \end{cases} \quad (57)$$

Уравнения (5.5) являются системой дифференциальных уравнений. Решение этой системы дает функцию полной поверхности деформаций волнового фронта  $W(x, y)$ .

Систему уравнений (5.5) можно решать численным методом Рунге-Кутты. При этом необходимо выбрать начальное условие. Удобно выбрать условие

$$W \Big|_{\substack{x=0 \\ y=0}} = 0.$$

После получения функции деформаций волнового фронта  $W(x, y)$  в численном виде, нужно представить ее с помощью полинома Цернике с коэффициентом  $C_{20} = 0$  для устранения поперечной расфокусировки.

Итак, для получения в интерферометре сдвига функции деформации волнового фронта, сформированного исследуемой системой, необходима регистрация и одновременная обработка двух интерференционных картин, полученных при выполнении сдвига последовательно по осям  $x$  и  $y$ .

Схема алгоритма обработки интерферограмм бокового сдвига показана на рис. 5.8. На основе этого алгоритма в ходе данного исследования разработана программа “Tiger” (см. в разделе 5.6), которая позволяет восстанавливать волновой фронт, обрабатывая две сдвиговые интерферограммы, полученные при ориентации полос последовательно по двум взаимно перпендикулярным направлениям, и анализировать результаты для получения количественных характеристик качества оптических систем, например таких, как функция рассеяния точки (ФРТ), функция рассеяния линии (ФРЛ) или частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) [5]. Кроме того, программа “Tiger” позволяет обрабатывать также и классические интерферограммы, полученные в интерферометрах с обращовым волновым фронтом.

### ***Интерферометр сдвига с дифракционной решеткой Ронки.***

Метод Ронки является одним из простейших и наиболее удачных способов оценки и измерения aberrаций оптической системы. Он разработан итальянским физиком Ронки [66], обнаружившим, что при помещении решетки вблизи центра кривизны зеркала изображение ее накладывается на саму решетку, образуя муаровую картину, которую он назвал комбинационными полосами. Поскольку форма комбинационных полос зависела от aberrаций зеркала, Ронки предложил использовать это явление для качественного контроля зеркал. Однако оказалось, что интерпретировать комбинационные полосы крайне трудно.

Шульц назвал картины, наблюдаемые с помощью решетки Ронки, ронкиграммами. Предпринимались попытки использовать их даже для измерения оптической передаточной функции объективов и хроматической

aberrации систем. Зальцман применял метод для оценки качества лазерных стержней.

Метод Ронки имеет две эквивалентные описательные модели: геометрическую, интерпретирующую полосы как тени полос решетки, и физическую,

объясняющую появление полосы с позиции дифракции и интерференции света. Если частота решетки не очень высока, то обе модели, предложенные еще Ронки, дают один результат [5, 11, 12].

Малакара показал, что тест Ронки позволяет непосредственно измерять поперечную aberrацию  $TA$  (рис. 5.9) Решетка и ее изображение расположены на оси, поэтому и поперечная aberrация, включающая расфокусировку и другие ошибки, также измеряется от оптической оси.

Волновая aberrация распределяется в выходном зрачке контролируемой системы по формуле, предложенной Рейсом [12]:

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{TA_x}{r-W}; \quad \frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{TA_y}{r-W}.$$

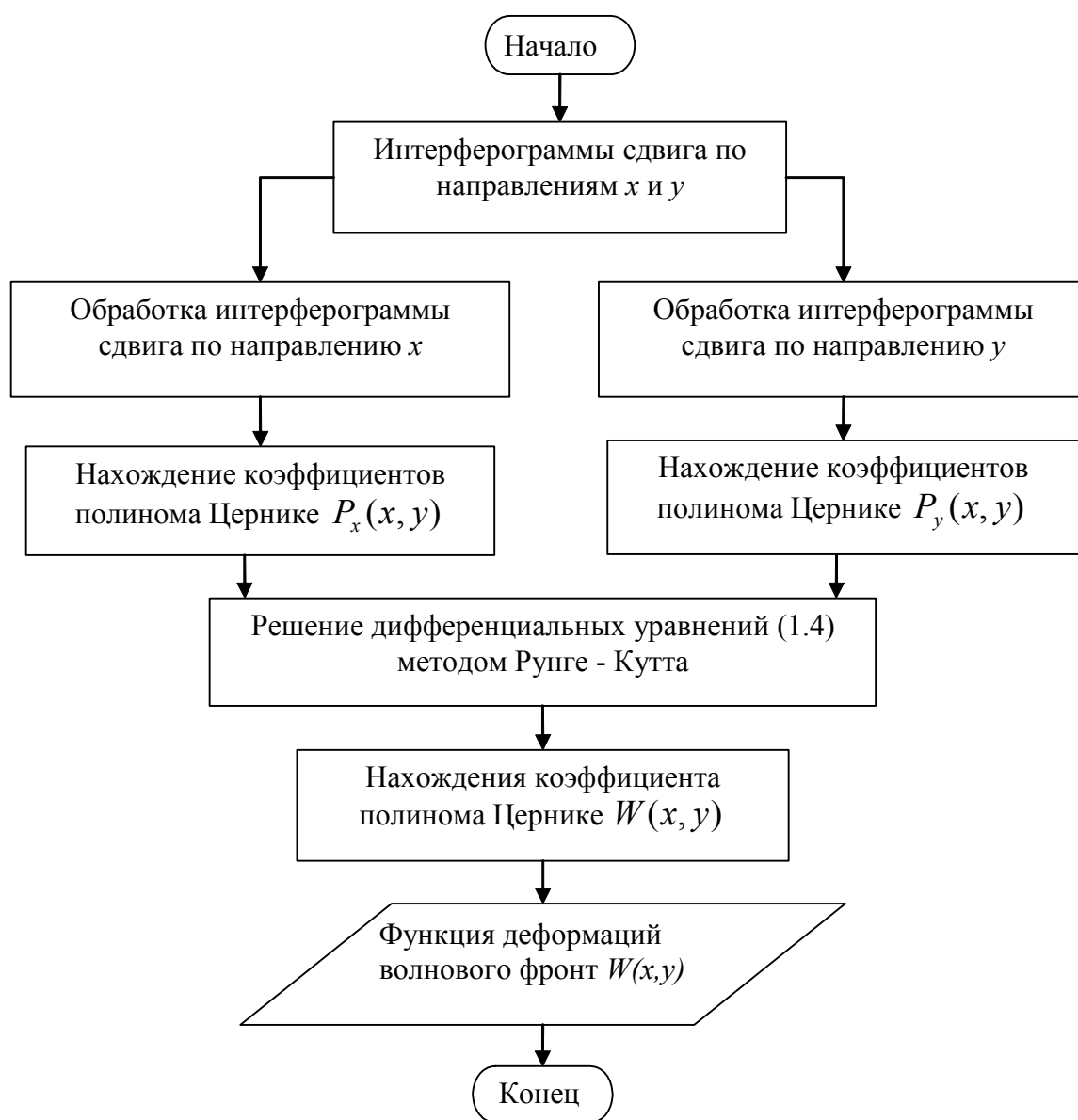


Рис. 77. Схема алгоритма обработки данных цикла измерений на интерферометре бокового сдвига



Для большинства практически интересных случаев можно, сохраняя точность результатов, пользоваться приближенными выражениями

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{TA_x}{r}; \quad \frac{\partial W}{\partial y} = -\frac{TA_y}{r}, \quad (58)$$

где  $r$  – радиус кривизны волнового фронта. Таким образом, представив Решетку Ронки с расстоянием  $d$  между щелями, в общем случае можно записать для точки  $(x, y)$  на  $m$ -й полосе

$$\frac{\partial W \cos \varphi}{\partial x} - \frac{\partial W \sin \varphi}{\partial y} = -\frac{md}{r}, \quad (59)$$

предполагая, что линии решетки наклонены под углом  $\varphi$  к оси  $y$  (рис. 78).

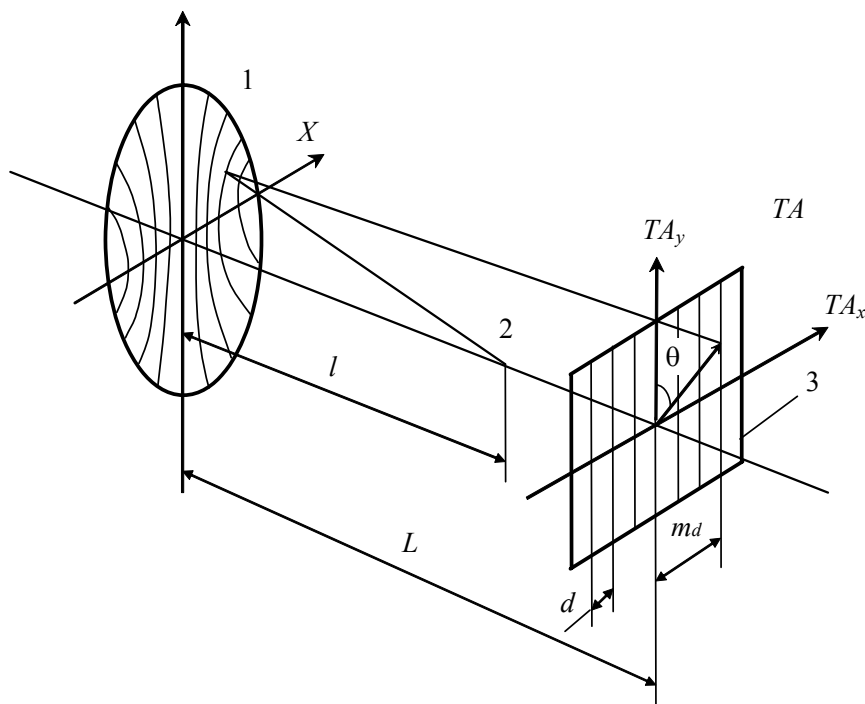


Рис.78.. Геометрическая схема контроля по методу Ронки:  
1 – контролируемая поверхность; 2 – источник света; 3 – решетка Ронки

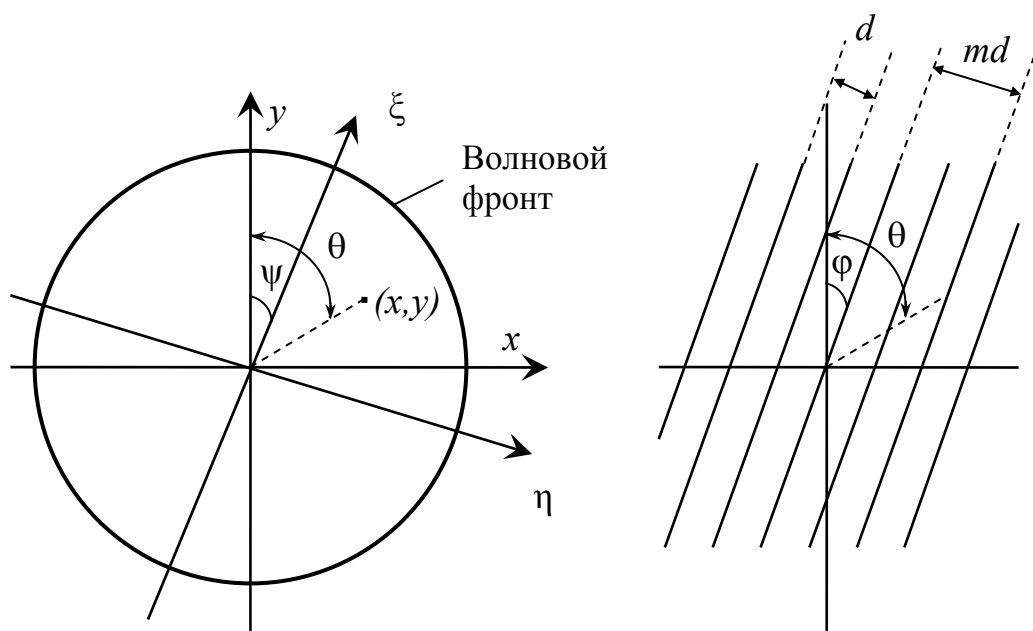


Рис. 79. Ориентация волнового фронта и решетки

Последняя формула является основной для геометрической модели метода Ронки.

### Физическая теория

Принцип действия интерферометра [11, 12] состоит в наложении и интерференции несколько взаимно когерентных сферических волновых фронтов в режиме интерференции сдвига (рис. 80).

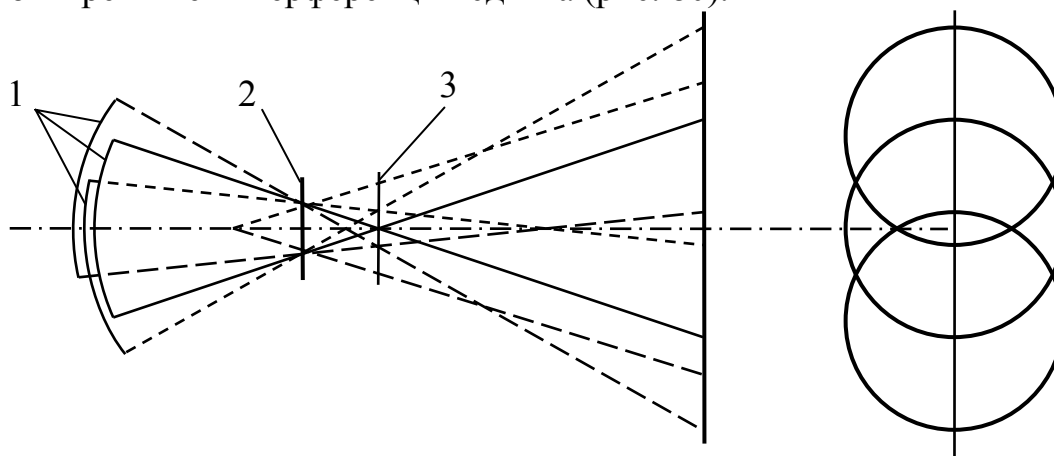


Рис. 80. Физическая модель метода Ронки

1 – Дифрагированные волновые фронты; 2 – Решетка Ронки; 3 – дифрагированные фокусы

Сферическая волна, сформированная исследуемой оптической системой, имеющая центр кривизны в точке  $P$ , падает на линейную решетку  $R$ , установленную нормально к оптической оси вблизи плоскости фокусировки тест-объекта. Решетка имеет пространственную частоту  $m$  и отстоит от центра кривизны сферической волны на расстояние  $y$ . Это расстояние считается положительным, если отсчет производится в направлении, обратном направлению распространению света. При этом по обеим сторонам от точки  $P$

образуются дифракционные спектры различных порядков, имеющие для монохроматического света вид точек. Расстояние между спектрами для малых углов дифракции равно  $d = y \cdot \beta$ , где  $\beta = m\lambda$  - угол дифракции. Отсюда  $d = ym\lambda$ .

Итак, решетка порождает ряд дифрагированных волн, После концентрации в плоскости изображения сферические фронты расходятся, образуя в той области пространства, где они перекрываются с заклоном на угол  $n\beta'$  ( $n = 0, 1, 2 \dots$  нумерация дифракционных порядков), интерференционные полосы.

Видно, что процесс формирования интерференционных полос в схеме Ронки подобно в интерферометре бокового сдвига, однако интерференционная картина в схеме Ронки появляется в результате суперпозиции более двух волновых фронтов, поэтому интерферограмм Ронки не резко как интерферограмма сдвига и классическая интерферограмма.

Для повышения качества интерферограмм Ронки необходимо ограничить количество дифракционных порядков, участвующих в формировании интерферограмм. Для этого нужно установить в плоскости изображения диафрагму, которая пропускает только нулевой и плюс первый порядки (рис. 81). В этом случае интерферограммы Ронки полностью соответствуют интерферограммам с угловым сдвигом  $\beta$ .

В качестве диафрагмы можно использовать малое отверстие или щель.

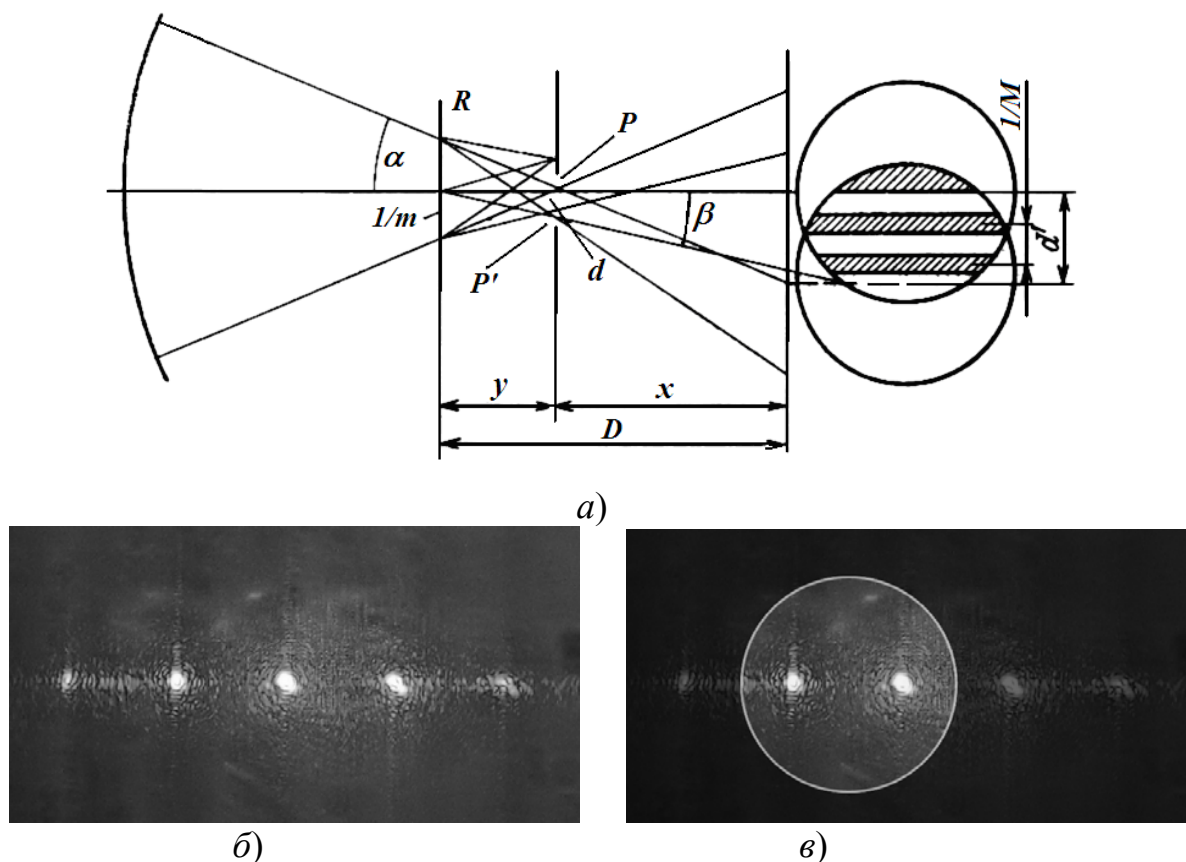


Рис. 81. Схема Ронки с диафрагмой

а) принципиальная схема; б) система дифракционных порядков; в) выделение двух порядков при помощи диафрагмы.

Размер диафрагмы зависит от расстояния между двумя последовательными порядками, порожденными дифракцией на решетке. Размер диафрагмы должен удовлетворять выражению:  $3d - \delta > D_f > d + \delta$ , где  $D_f$  – ширина щелевой диафрагмы;  $\delta$  – диаметр точечный изображение (пятно рассеяния). Кроме того, величина  $d$  должна быть достаточно большой так, чтобы две последовательные точки изображения не складываются.

Табл. 6

		Размер диафрагмы							
1.	$M$	2.	$y$	3.	$\beta = m\lambda$ (мин.)	4.	$d$	5. $D_{dfmax}$	
6.	10	7.	3	8.	0,379	9.	0,019	10.	0,0 38
11.	20	12.	3	13.	0,584	14.	0,038	15.	0,0 76
16.	30	17.	3	18.	1,138	19.	0,057	20.	0,1 14
21.	40	22.	3	23.	1,5168	24.	0,076	25.	0,1 52
26.	50	27.	3	28.	1,896	29.	0,095	30.	0,1 90
31.	60	32.	3	33.	2,275	34.	0,114	35.	0,2 28

Из таблицы 6 видно, что размер диафрагмы составляет 10 – 100 мкм, поэтому для установки диафрагмы в рабочее положение необходимо использовать микроскоп и точные механизмы.

Улучшенная схема интерферометр Ронки работает подобно интерферометру сдвига. Обработка интерферограмм Ронки для получения функции деформации волнового фронта выполняются оп алгоритму, показаному на рис. 5.8 Величина сдвига  $s$  вычисляется из частоты решетки по формуле  $s = \beta x = m\lambda x$ .

### **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 [5, 12] (рис. 82).

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 (рис. 82).

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.

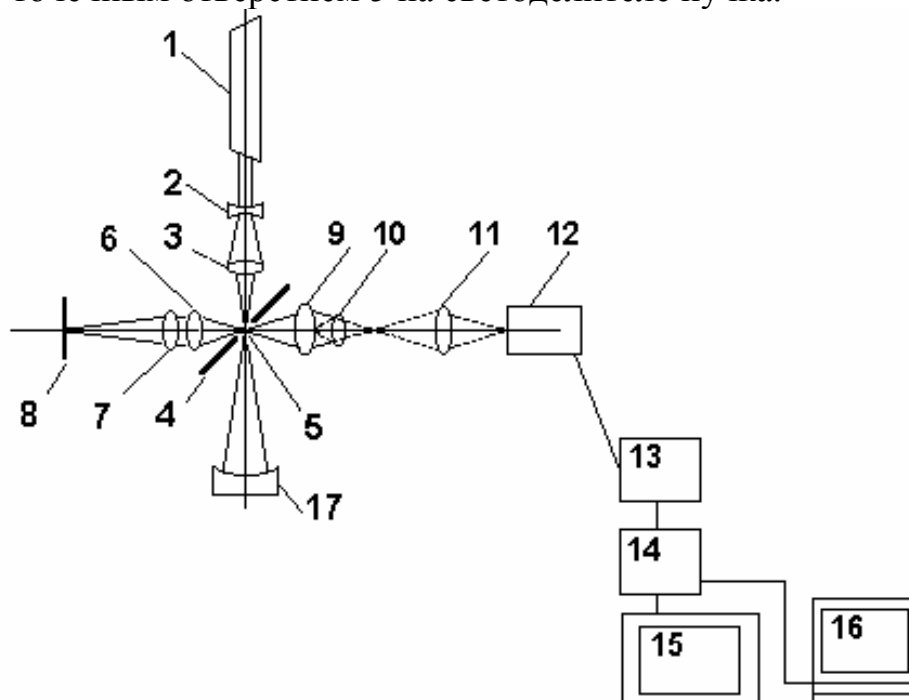


Рис. 82. Интерферометр с дифрагированным опорным фронтом и автоколлимационным осветительным плечом

1 - лазер, 2 - 3 - осветительная система, 4 - наклонное зеркало, точечная диафрагма, 6 и 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.

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 (5).

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

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

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 регистрированы в виде матрицы численных координат точек. Тогда можно определить величину прогиба интерференционных полос через координаты экстремальных точек с погрешностью не меньше 1 пиксел.

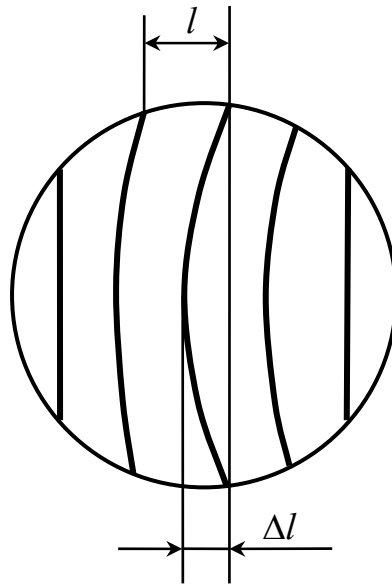


Рис. 83. Методика определения максимальной ошибки волнового фронта по интерферограмме исходя из оценки соотношения стрелки прогиба полосы с ее шагом

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

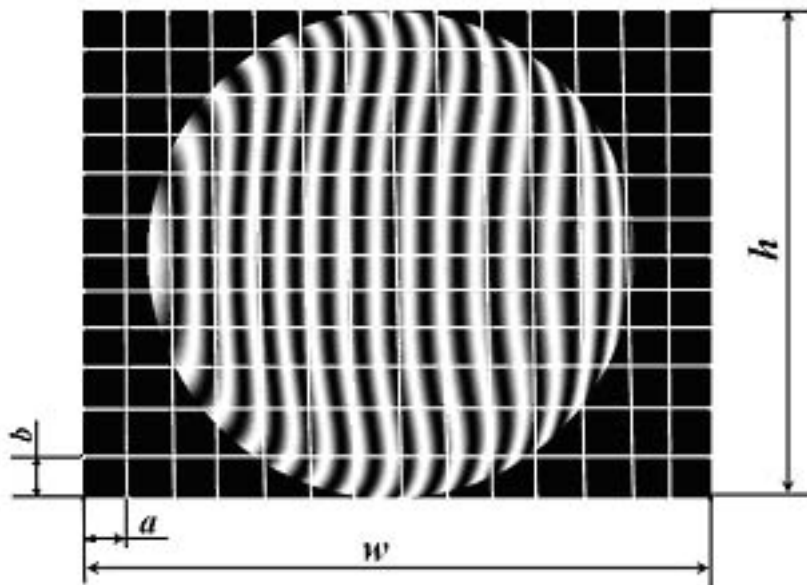


Рис.84. Интерферограмма на ПЗС матрице

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

$$b = h/m.$$

Тогда  $\Delta N = 15/m$

Табл. 7

36. Тип камеры	37. Размеры ПЗС, мм	38. Разрешение	39. Погрешность
40. VAC-135	41. 6,66×5,32	42. 640×480	44. 0,0313
46. VEC-235	47. 6,66×5,32	43. 1280×1024	45. 0,0146
52. VEC-335	53. 6,66×5,32	48. 800 × 600	50. 0,0250
58. VEC-535	59. 7,2×5,3	49. 1600 × 1200	51. 0,0125
64. Canon EOS-400D	65. 22,2 x 14,8	54. 1024 × 768	56. 0,0195
		55. 2048 × 1536	57. 0,0098
		60. 1280×960	62. 0,0156
		61. 2592×1944	63. 0,0077
		66. 3888×2592	67. 0,0058

В таблице 7 показаны минимальные погрешности при обработке интерферограмм, регистрируемых с помощью разных ПЗС матриц. Здесь видно, что чем больше разрешение ПЗС - матрицы тем меньше погрешности. При использовании ПЗС-матрицы самого высокого разрешения (10 Мрх) погрешность не более  $\lambda/200$ . Кроме того, при рашифровки интерферограмм влияют все шумы, которые появляются в процессе регистрации интерференционных картин. При этом погрешность увеличивается и становится больше, чем указано в таблице 7.

Однако показанное в таблице 7 ограничение точности можно преодолеть, если применять специальный способ определения координат экстремальных точек. Этот способ должен быть устойчивым к шумам и позволять определить координаты экстремальных точек с погрешностью меньше одного пиксела. Эта проблема решена в следующем разделе.

### **Принципы обработки интерференционных картин**

Компьютерная обработка интерференционных картин состоит из следующих этапов:

1. Предварительная обработка интерферограммы с целью устранение шума.
2. Определение центра и преимущественного направления полос.
3. Отслеживание полос и расстановка точек на экстремумах.



## Вычисление и отображение функции, характеризующей деформации волнового фронта.

В указанном процессе этап 3 играет большую роль, который влияет на качество обработки интерферограмм. В первой версии программы мы используем алгоритм, который основан на «скольжении прямоугольника» по полосе и распознавать ее. Данный алгоритм применяется в пакете программы “Zebra”. Описание алгоритма следующее.

После определения *контура интерферограммы* и уточнения *прямой сканирования* от края *контура* по *линии сканирования* начинается поиск экстремума. Учитывая, что высокочастотные искажения сигнала были сглажены, эта задача решается тривиально: пока сигнал возрастает, алгоритм перебирает точки; как только сигнал в точке, следующей за рассматриваемой перестает возрастать, рассматриваемая точка считается экстремумом. Все точки за экстремумом игнорируются до тех пор, пока сигнал снова не начинает возрастать. Так продолжается, пока алгоритм не дойдет до противоположного края *контура интерферограммы*.

Как только алгоритм находит очередной экстремум (рис. 85, точка  $M_1$ ) начинает выполняться слежение за полосой. Для этого вначале программа находит ширину экстремума (т.к. если интерферограмма была пересвечена, то максимальное значение могут занимать несколько соседних пикселей). Затем это значение используется для определения максимально допустимого количества пикселей с одинаковым сигналом на сторонах полосы и ширины полосы в направлении сканирования. Производится поиск минимумов до точки 1 и после точки 2 текущего экстремума (эта информация запоминается для последующего уточнения координат экстремумов). Таким образом, точки 1 и 2 находятся на линии сканирования и ограничивают полосу. Отслеживание полосы производится в две стороны от *линии сканирования*, сначала вверх, затем вниз.

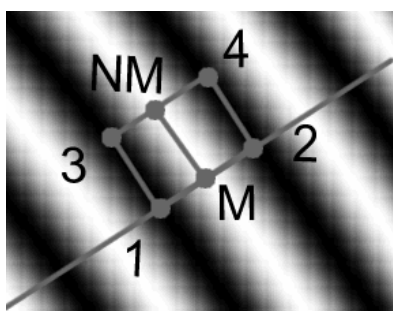


Рис. 85.. Слежение по полосе

Опираясь на точки 1 и 2, программа строит прямоугольник 1-3-4-2 (рис. 5.13). Его высота (1-3 или 2-4) ограничивается некоторым максимальным значением, которое влияет на частоту расстановки точек и, соответственно, на их количество. Если ширина полосы меньше максимального значения высоты, то высота принимается равной ширине полосы, в противном случае высота считается равной максимальному значению.

Далее, на ломаной линии 1-3, 3-4, 4-2 находится экстремум (точка  $M_1$ ).

Принимается гипотеза о том, что между экстремумами  $M_1$  и  $M_2$  направление

полосы соответствует прямой  $M_1-M_2$ . Через точку  $M_1M_2$ , перпендикулярно прямой  $M-NM$  определяется линия дополнительного сканирования. Точка  $NM$  становится точкой  $M$ , на линии дополнительного сканирования определяются минимумы (новые точки 1 и 2) и весь процесс повторяется. Так продолжается до тех пор, пока сканирование не дойдет до края полосы. Критерием этого является слишком маленькое значение расстояния либо  $M_1$ , либо  $M_2$ .

### **Разработка программного обеспечения для обработки интерферограмм.**

#### **Разработка и улучшение алгоритма опознавания интерференционных полос**

Показанный выше алгоритм имеет следующие достоинства:

- высокая надежность при обработке интерференционных картин;
- метод не чувствует неравномерности освещенности на картине.

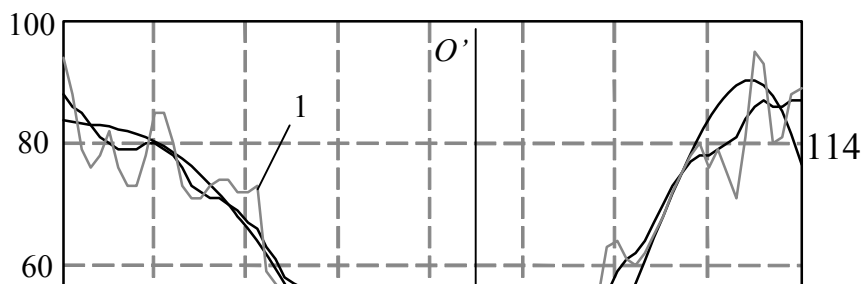
недостатки:

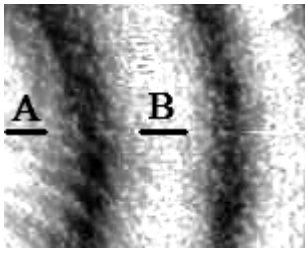
- погрешность обусловлена разрешением ПЗС-матрицы (табл. 7);
- чувствительность к шумам; алгоритм может не работать, если не фильтровать шумы.

На рис. 86 кривая 1 представляет значения пикселей в сечении  $AB$  (рис. 86, а) в исходной интерферограмме (без фильтрации шумов). Из рисунка видно, что описанный алгоритм, в разделе будет принимать точку  $P_1$  за экстремальную. При этом, если учитывать закон распределения освещенности поперек интерференционной полосы, то действительная экстремальная точка должна принадлежать оси  $OO'$ . Алгоритм перепутал точки  $P_1$  вследствие наличие шумов. Кривая 2, полученна после фильтрации шумов, более плавна, чем кривая 1. В этом случае эстремальная точка перемещается в  $P_2$  (рис. 86, б). Сравнительно с первым случаем, когда не использована фильтрация шумов, расстояние с  $P_2$  до оси  $OO'$  знатительно уменьшается, что доказывает эффективность фильтра шумов. Однако нельзя надеяться, что чем лучше фильтрация тем выше точность, так как фильтр действует на всей площади интерферограммы и может деформировать отдельные участки интерференционных полос, что увеличивает вероятность появления погрешности при определении функции деформаций волнового фронта.

Для устранения указанных недостатков рассмотренного алгоритма разработан альтернативный алгоритм, который основан на принципе «скольжении прямоугольника» и использует новый, улучшенный принцип определения координат экстремальных точек.

Предлагаемый алгоритм определения координат экстремальных точек интерферограммы использует информацию всех точек в сечении.





а)

б)

Рис.86. а) Участок интерферограммы. б) Распределение пиксельной яркости в сечении АВ

Для этого перед процессом обнаружения экстремальных точек программа выполняет аппроксимацию сечения методом наименьших квадратов, тогда все точки в сечении участвуют в создании аппроксимирующего полинома. При этом определения экстремума полинома будет проще и результат будет увереннее. На рис. 86 (б) кривая 3 является результатом аппроксимации сечения АВ при использовании полинома пятого порядка. На рисунке видно, что экстремум полинома  $P_3$  определяется более уверенно

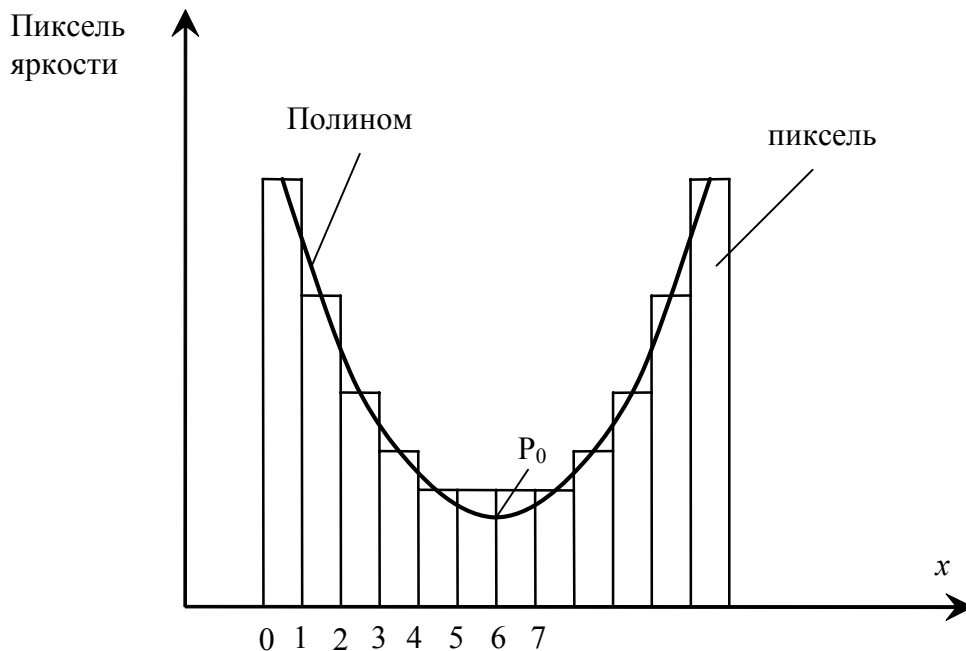


Рис. 87. Принцип повышения точности при определении координат точек методом интерполяции

Кроме того, представление сечения полиномом позволяет повысить точность определения координат точек по принципу интерполяции. На рис.87,

принимая точку  $P_0$  за экстремум вместо пиксела 5 или 6, повышаем точность в  $5 \div 10$  раз.

### **Разработка программы обработки интерферограмм “Tiger”**

На основе алгоритма оцифровки разработана программа “Tiger”, которая позволяет регистрировать, обрабатывать и анализировать интерферограммы с целью получения информации о волновом фронте, и далее анализировать влияние деформаций волнового фронта на характеристики качества изображения. Особенность программы “Tiger” состоит в том, что она может обрабатывать не только классические интерферограммы, но и интерферограммы сдвига методом обработки двух сдвиговых интерферограмм, полученных с применением направления сдвига последовательно по двум взаимно перпендикулярным направлениям.

Программа имеет следующие возможности и особенности:

1. Регистрация интерферограмм с использованием устройств, работающих с библиотекой “Microsoft DirectX”.

2. Выполнение предварительной обработки интерферограмм с целью повышения качества расшифровки (в частности, фильтрация шумов изображения).

3. Выполнение автоматизированной оцифровки интерферограммы по усовершенствованному алгоритму.

4. Определение функции, характеризующей интерферограмму (функции деформаций волнового фронта для классической интерферограммы или функция первой производной деформаций волнового фронта для интерферограммы сдвига).

5. Выполнение решения системы уравнений дифференциального волнового фронта по методу “Рунге-Кутты” для восстановления деформаций волнового фронта (эта функция необходима только при обработке интерферограмм сдвига).

6. Выполнение математических операций для получения характеристик качества изображения, таких как ФРТ, ФРЛ, ПК, ФКЭ, ФПМ (ЧКХ).

С помощью усовершенствованного алгоритма оцифровки интерференционных полос программа получает два следующих преимущества:

- устойчивость к шумам: снижение влияния шумов интерферограммы в процессе работы алгоритма, что расширяет возможности обработки интерферограммы без дополнительной фильтрации шумов;

- повышение точности определения координат точек интерференционной полосы в 5-10 раз сравнительно с возможностями традиционных программ расшифровки. Эти достоинства созданы в данной работе благодаря применению метода наименьших квадратов при математической обработке интерференционного изображения. Такое решение является альтернативным и не использовалось ранее при выполнении автоматической расшифровки интерферограмм в более ранних программах – аналогах.

На рис. 88 показана структура программы «Tiger».

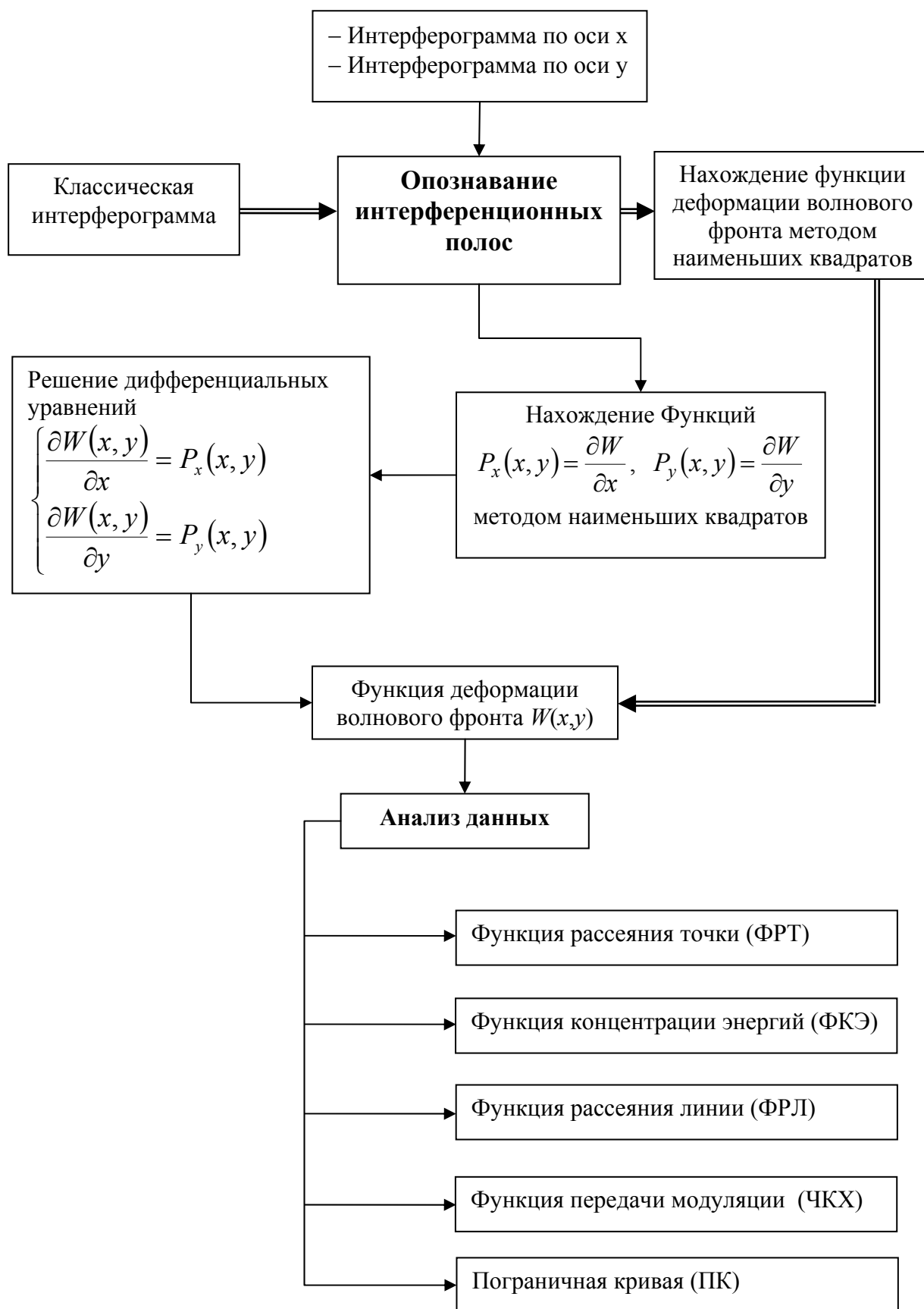


Рис. 88. Структурная схема программы «Тигр»

Этапы работы программы следующие:

1) Сигнал, несущий информации о структуре интерферограммы, вводится в программу из устройств регистрации изображения или из винчестера 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 поступает в модуль вычисления функции, характеризующей структуру волнового фронта исследуемой оптической системы. Этой функцией является функция деформаций волнового фронта, если обрабатывать классическую интерферограмму.

В случае расшифровки интерферограмм сдвига нужно обрабатывать две интерферограммы для составления системы дифференциальных уравнений, решение которых в модуле «решение дифференциальных уравнений» дает функцию деформаций волнового фронта.

4) Далее из полученной функции деформаций волнового фронта программа вычисляет характеристики качества изображения, такие как ФРТ, ФРЛ, ЧКХ, ПК, ФКЭ.

Для иллюстрации и проверки работы программы рассмотрим пример обработки интерферограмм, полученных на макетном интерферометре сдвига (рис. 89).

Исходя из распределения интенсивности в интерферограмме программа автоматически определяет координаты совокупности точек для центральной линии каждой интерференционной полосы. Эти точки обозначаются крестиками на полосах интерферограмм (рис.89).

Совокупность найденных координат служит для определения (при помощи аппроксимации с применением метода наименьших квадратов) функции первой производной поверхности деформаций волнового фронта (рис. 90, 91).

На рис. 92 показана полная картина поверхности деформаций волнового фронта после решения системы дифференциальных уравнений.

Дальнейшая математическая обработка полученной функции деформаций волнового фронта позволяет определять характеристики качества изображения исследуемой системы (рис. 93, 94), где:

$I(x,y)$  – интенсивность в рассчитанном изображении точки;

$\tilde{T}(v)$  – значение коэффициента передачи контраста (КПК) в ЧКХ;

$v$  – значение пространственной частоты в канонических единицах.

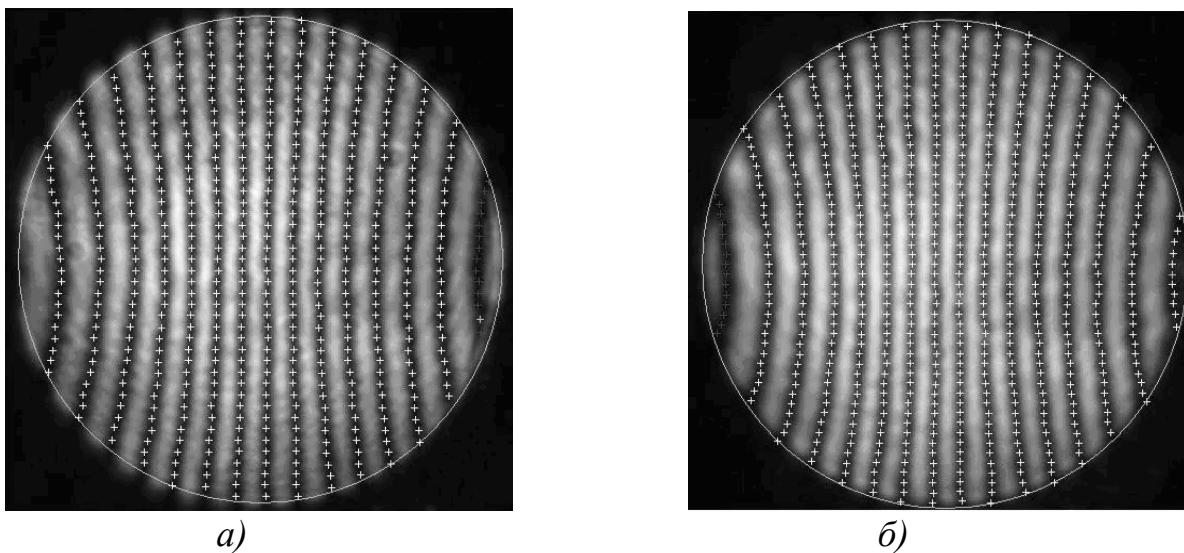


Рис. 89. Интерферограммы сдвига и их обработка в программе “Tiger”:  
*а) – сдвиг по направлению x; б) – сдвиг по направлению y*

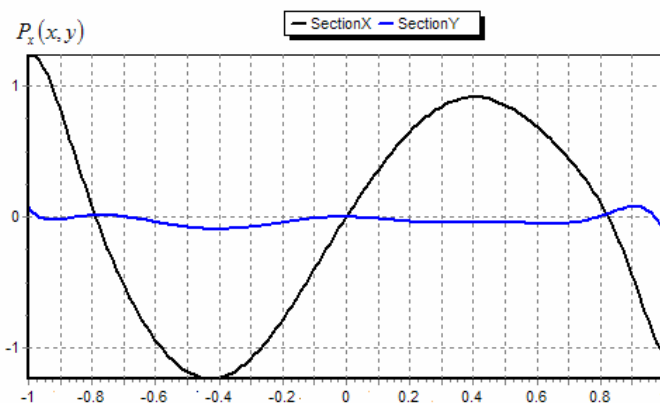


Рис.90. Результат первого этапа обработки интерферограммы при сдвиге по направлению  $x$ :  
 кривая  $f_1(x, y)$  по двум сечениям;

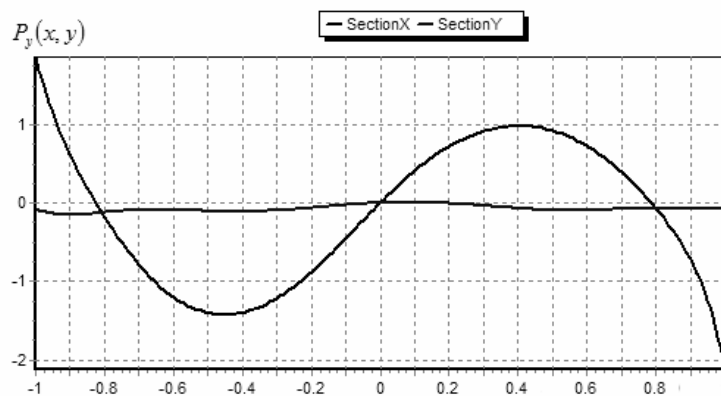


Рис. 91. Результат второго этапа обработки интерферограммы при сдвиге по направлению  $y$ :  
 кривая  $f_2(x, y)$  по двум сечениям

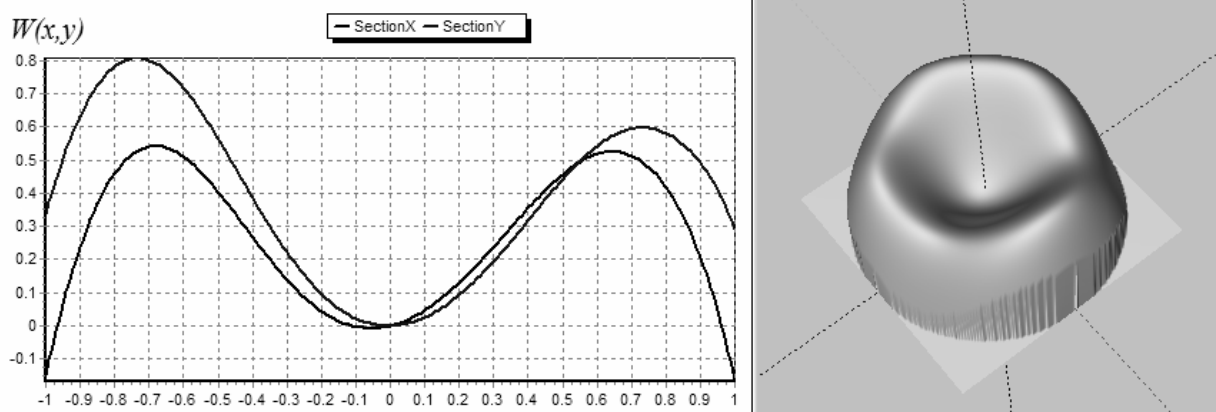


Рис. 92. Окончательный результат обработки интерферограммы сдвига после решения системы дифференциальных уравнений по направлениям  $x$  и  $y$ . Получена полная картина поверхности деформаций волнового фронта и графики сечения по  $x$  и  $y$

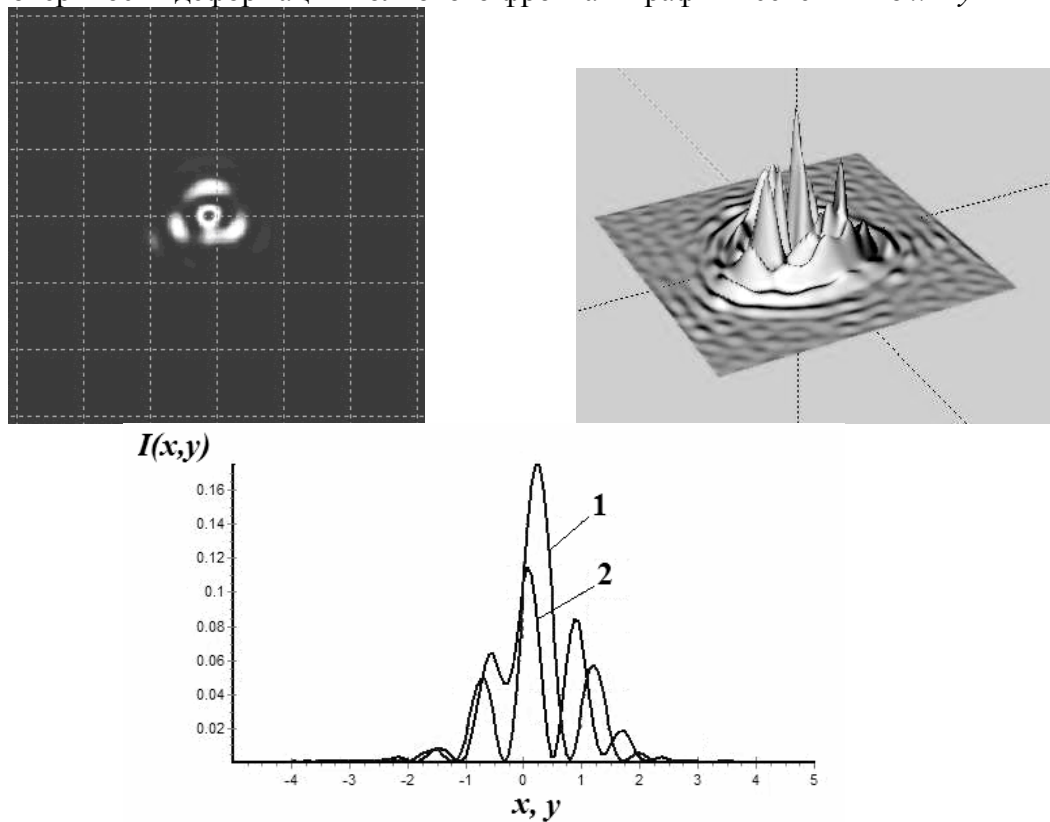


Рис. 93. Изображение точки и трехмерное отображение ФРТ, полученные при преобразовании Фурье поверхности деформаций волнового фронта (оцифровка оси ординат выполнена исходя из числа Штреля)



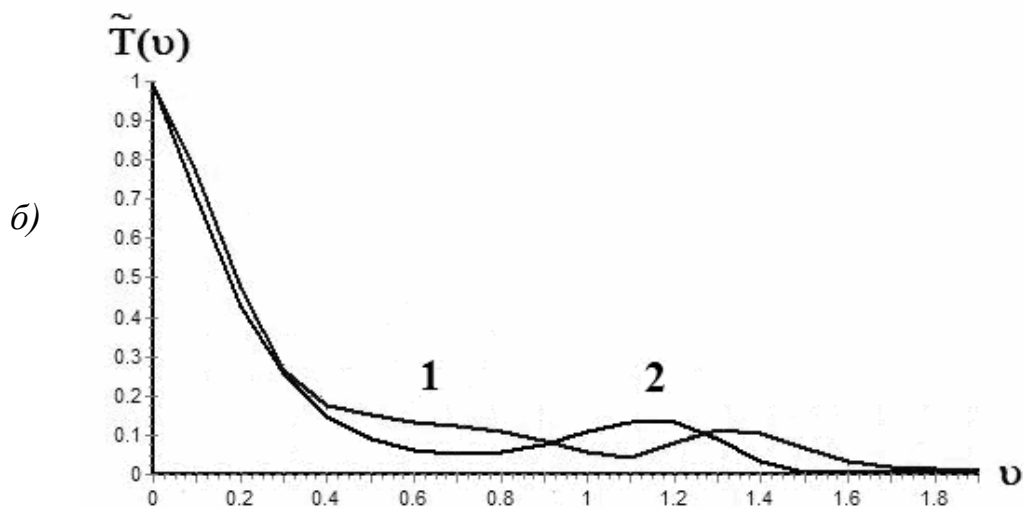


Рис.94. Частотно – контрастные характеристики исследуемого объектива, полученные при преобразовании Фурье функции деформаций волнового фронта (график дан в каноническом масштабе по двум сечениям)

## Выводы

В данной главе преследовалась цель компьютеризации интерферометра на базе схем без применения эталонных поверхностей, таких как интерферометр сдвига, интерферометры с дифрагированным эталонным волновым фронтом. Для этого мы выполняем последующие работы:

- Исследование и разработка макетного интерферометра сдвига с оснащением ПЗС-камерой для автоматической регистрации интерферограмм.
- Разработка алгоритма и программы для моделирования и исследования интерферограмм сдвига.
- Разработка алгоритма и программы расшифровки интерферограмм сдвига методом восстановления функции деформаций волнового фронта путем решения системы дифференциальных уравнений, полученных при обработке двух интерферограмм с взаимно-перпендикулярным направлением сдвига.
- Исследование и разработка альтернативного алгоритма расшифровки, дающего снижение влияния шумов и существенно повышение точности (до 10 крат).
- Разработка программы “Tiger”, которая выполняет регистрацию, обработку и анализ интерферограмм с целью получения информации об ошибках волнового фронта, а также анализировать влияние деформаций волнового фронта на определяемые программой характеристики качества изображения.

Программа “Tiger” может применяться для контроля качества изготовления оптических поверхностей и систем в условиях производства, научных исследований и для целей образования.

## **ЛИТЕРАТУРА**

1. В.К.Кирилловский. Оптические измерения.ч.1.ИТМО.2003.
2. В.К.Кирилловский. Оптические измерения.ч.2.ИТМО.2003.
3. В.К.Кирилловский. Оптические измерения.ч.3 .ИТМО.2005
4. В.К.Кирилловский. Оптические измерения. ч. 4 .ИТМО.2005
5. В.К.Кирилловский. Оптические измерения. ч. 5 .ИТМО.2006
6. Гордов А.Н., Лукьянов Г.Н., Парфенов В.Г. и др. Основы метрологии. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1983.
7. Кирилловский В.К. Методы контроля качества изображения оптических систем. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1980.
8. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Контроль оптических систем с применением лазеров. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1986.
9. Г.В.Креопалова, Д.Т.Пуряев. Исследование и контроль оптических систем. М.Машиностроение. 1978.
11. Иванова. Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л. Машиностроение. 1984.
12. Оптический производственный контроль. Под ред. Д. Малакары. М.Машиностроение. 1985.
13. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. М. Машиностроение. 1987.
14. Кирилловский В.К. Применение телевидения при контроле и аттестации оптических систем. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1983.
15. Иванова Т.А., Кирилловский В.К.Исследование и контроль объективов микроскопов. Л.ЛИТМО. 1983.
16. Кирилловский В.К. Контроль качества объективов. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1984.
17. Кирилловский В.К., Анитропова И.Л., Иванова Т.А. Синтез комплекса методов и унифицированных приборов оптического контроля. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1988
18. Кирилловский В.К. Количественные теневые методы при контроле оптических систем. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1989.
19. Кирилловский В.К., Анитропова И.Л., Крынин Л.И., Петрученко И.Р. Построение оптических схем приборов контроля качества изображения. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1990.
20. Кирилловский В.К., Петрученко И.Р. Дифракционные интерферометры. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1990.
21. Кирилловский В.К., Анитропова И.Л., Зеленина О.В. Применение ЭВМ в оптическом приборостроении. Учебное пособие. Л.ЛИТМО. 1988
22. В.А.Афанасьев. Оптические измерения. М.Высшая школа. 1981.
23. Г.В.Креопалова, Н.Л. Лазарева, Д.Т.Пуряев. Оптические измерения. М.Машиностроение. 1987.

24. В.А.Зверев, В.К.Кирилловский, М.Н.Сокольский. Применение метода изофотометрической фоторегистрации при исследованиях и аттестации главного зеркала БТА. ОМП N12,1976.
25. В. К. Кирилловский, Ле Зуй Гуан, Разработка алгоритмического и программного обеспечения для аппаратуры контроля качества изображения оптических систем, Изв. вузов. приборостроение. 2007. т. 50, № 7.
26. В.П. Вейко, Н.Б. Вознесенский, Ю.М. Воронин, В.Ф. Дряхлушин. Ближнепольные оптические зонды: методы изготовления, основные характеристики и контроль аппаратуры. Оптический журнал, т. 65, 1998.
27. В.М. Домненко, Д.А.Гаврилин. ZEBRA-Mathoptics. Техническое описание. СПб ИТМО. 1995 г.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>РОЛЬ ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, ИЗМЕРЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ НА ЭТАПЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ</b>	<b>4</b>
<b>ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА КОМПЛЕКСА МЕТОДОВ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ</b>	<b>5</b>
<b>ПРЯМЫЕ И КОСВЕННЫЕ СПОСОБЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ</b>	<b>6</b>
Анализ ФРТ .....	6
Интерферограмма .....	8
<b>ТРАДИЦИОННЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ НАВОДКИ</b>	<b>9</b>
<b>ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПОПЕРЕЧНЫХ НАВОДОК</b>	<b>14</b>
<b>СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ПОВЫШЕНИЯ ДИАПАЗОНА И ТОЧНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ</b>	<b>16</b>
<b>ПЕРЕДАЧА ИЗОБРАЖЕНИЯ ЧЕРЕЗ ОПТИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ</b>	<b>21</b>
<b>КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ</b>	<b>24</b>
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ</b>	<b>27</b>
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПЯТНА РАССЕЯНИЯ	27
<b>ФОТОГРАФИЧЕСКАЯ ФОТОМЕТРИЯ</b>	<b>28</b>
Методы фотоэлектрического сканирования изображения светящейся точки .....	31
<b>ВИДЕО МЕТОД</b>	<b>33</b>
Введение в классический ПЗС-формирователь изображения .....	33
Методика видео-фотометрии пятна рассеяния .....	35
<b>МЕТОД ИЗОФОТОМЕТРИИ</b>	<b>38</b>
Изофотометрия с изменяющимся временем накопления	39
<b>КОМПЬЮТЕРНАЯ ИЗОФОТОМЕТРИЯ С НАКОПЛЕНИЕМ</b>	<b>41</b>
Компьютерная изофотометрия ФРТ .....	41
Компьютерный метод измерения ФРТ по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления .....	44
<b>РАЗВИТИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ ФРТ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ ВРЕМЕНЕМ НАКОПЛЕНИЯ</b>	<b>49</b>
Математические основы .....	49
Алгоритм выделения изофоты .....	51
Алгоритм определения ФРТ .....	54
Программное обеспечение «КИЗО» .....	55
Установка .....	57
Конструкция и работа установки .....	57
Тест-объект .....	58
Микрообъектив .....	59
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СТРУКТУРЫ ПЯТНА РАССЕЯНИЯ	59
<b>ПОГРЕШНОСТИ МЕТОДОВ АНАЛИЗА И СИНТЕЗА СТРУКТУРЫ ИЗОБРАЖЕНИЯ СРЕДСТВАМИ ИЗОФОТОМЕТРИИ, ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЙ И ОЦЕНОК</b>	<b>63</b>
<b>Выводы</b>	<b>66</b>
<b>РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ ИЗОФОТОМЕТРИИ ФРЛ С ИЗМЕНЯЮЩИМСЯ СВЕТОВЫМ ПОТОКОМ.</b>	<b>67</b>
Математические основы .....	67
Алгоритм определения ФРЛ по методу изофотометрии .....	68
Программа КИЗО-ФРЛ .....	68
Установка .....	71

Экспериментальные исследования качества изображения объектива по ФРЛ .....	73
Погрешности методов анализа и синтеза структуры изображения средствами изофотометрии, пути повышения точности измерений и оценок. ....	75
<b>Выводы</b> .....	<b>77</b>
<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ ОТ СУБМИКРОННОГО ОТВЕРСТИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ</b> .....	<b>78</b>
Введение .....	78
Форма и структура распределения излучения, дифрагированного на малом отверстии .....	79
Анализ дальнепольного распределения интенсивности .....	80
Выводы .....	84
<b>РЕГИСТРАЦИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДАЛЬНОГО ПОЛЯ БРОМ-ЗОНДА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ АПЕРТУРЫ ЗОНДА</b> .....	<b>84</b>
Введение .....	84
<b>В ПРОЦЕССЕ РАЗРАБОТКИ КОНЦЕПЦИЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОЛНОВОГО ФРОНТА ДАЛЬНОГО ПОЛЯ, ДИФРАГИРОВАННОГО НА АПЕРТУРЕ БРОМ ЗОНДА, В КАЧЕСТВЕ ИНФОРМАТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ СТРУКТУРЫ БЛИЖНЕГО ПОЛЯ НА АПЕРТУРЕ ЗОНДА БЫЛИ ВЫПОЛНЕНЫ:</b> .....	<b>84</b>
<b>Этап 1 - Исследование структуры волнового фронта, дифрагированного на апертуре зонда, методом компьютерного моделирования распределения интенсивности в дальнем поле и его всесторонней компьютерной обработки.</b> .....	<b>84</b>
Сканирующий ближнепольный оптический микроскоп .....	85
Экспериментальное исследование .....	86
Компьютерная обработка экспериментальных данных методом изофотометрической квазиинтерферометрии .....	88
<b>КОСВЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ</b> .....	<b>93</b>
Введение .....	93
Табл. 5 . Вид интерференционных картин для круглого зрачка .....	95
Вид многочисленных интерференционных картин для круглого зрачка при абберациях разного типа подробно рассмотрен в [12] . В табл. 5 рассмотрена форма интерференционной картины для ряда типовых аббераций.....	95
<b>ИНТЕРФЕРОМЕТР СДВИГА</b> .....	<b>96</b>
Устройства .....	96
Математическое описание интерферометра бокового сдвига.....	98
Алгоритм вычисления интерферограммы сдвига исходя из расчетных параметров исследуемой оптической системы .....	100
Восстановление волнового фронта при обработке интерферограммы сдвига .....	102
<b>ИНТЕРФЕРОМЕТР СДВИГА С ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ РОНКИ.</b> .....	<b>103</b>
Физическая теория .....	106
<b>ИНТЕРФЕРОМЕТРЫ С ДИФРАГИРОВАННЫМ ЭТАЛОННЫМ (ОПОРНЫМ) ВОЛНОВЫМ ФРОНТОМ</b> .....	<b>108</b>
Устройство .....	108
Методика проведения измерений .....	110
<b>ПРИНЦИПЫ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ КАРТИН</b> .....	<b>112</b>

Вычисление и отображение функции, характеризующей деформации волнового фронта. ....	113
<b>РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ.</b>	<b>114</b>
Разработка и улучшение алгоритма опознавания интерференционных полос .....	114
<b>РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ ОБРАБОТКИ ИНТЕРФЕРОГРАММ “TIGER”</b>	<b>116</b>
<b>ВЫВОДЫ</b>	<b>121</b>
<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	<b>122</b>

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

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

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

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

- теория и проектирование оптических систем, традиционно называемые вычислительной оптикой;
- оптические измерения и контроль оптических элементов и систем;
- оптические приборы, включая общую теорию, микроскопы и контрольно-измерительные приборы, геодезические приборы, офтальмологическая оптика;
- математические методы, алгоритмы, программы и компьютерные системы решения оптических задач, что можно коротко назвать компьютерной оптикой.

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

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

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

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

- методы и программы проектирования оптических систем (методы синтеза, анализа аберраций и качества изображения, методы оптимизации, расчет допусков);
- обработка данных контроля оптических элементов и систем (интерферограммы, гартманогаммы, изофотограммы и т.п.);
- компьютерное моделирование изображения с учетом различных факторов (частичная когерентность, поляризация, нелинейности и неизопланатизм и т.д.)
- теория и методы оптимальной компьютерной юстировки;



- моделирование процессов ближнепольной оптики.

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

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

Общепрофессиональная и специальная подготовка специалистов базируется на следующих составляющих:

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

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

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

Владимир Константинович Кирилловский,  
Ле Зуй Туан

ОПТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

Часть 6.

Инновационные направления в оптических измерениях и исследованиях  
оптических систем

В авторской редакции и компьютерной верстке

Зав редакционно-издательским отделом СПб ГИТМО(ТУ) Н.Ф.Гусарова

Лицензия ИД № 00408 от 05.11.99.

Подписано к печати 15.12.07

Отпечатано на ризографе. Тираж 300 экз. Заказ №8...



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