

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА И ПРОГРАММЫ ДЛЯ РАСШИРЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ МЕТОДА ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ИЗОБРАЖЕНИЯ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2009 г. Ле Зуи Туан; В. К. Кирилловский, доктор техн. наук

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

E-mail: DuyTuanKTQ@yahoo.com, Vkkir@mail.ru

Для устранения недостатков метода прямого определения функции рассеяния точки, основанного на применении ПЗС камеры, разработаны компьютерные изофотометрические методы экспериментального анализа пятна рассеяния, сформированного при работе изготовленной оптической системы. Эти методы позволяют повысить диапазон регистрации освещенности в оптическом изображении тест-объекта до 10^3 – 10^5 при устранении погрешностей от нелинейности световой характеристики ПЗС матрицы.

Коды OCIS: 120.0120.

Поступила в редакцию 07.10.2008.

Введение

Развитие оптико-электронных приборов и комплексов, например, таких, как приборы ночного видения, тепловизионные системы, цифровые камеры, медицинские приборы и микроскопы, требует применения высококачественных оптических систем. Для получения требуемого уровня качества необходимо определять основные параметры, характеризующие качество изготовленных оптических систем, прямым методом и с минимальной погрешностью.

Функция рассеяния точки (ФРТ), т. е. функция распределения освещенности в изображении точечного источника, построенного исследуемой оптической системой, является первичной характеристикой качества изображения и позволяет перейти к другим необходимым характеристикам качества изображения, таким как функция рассеяния линии (ФРЛ), функция передачи модуляции (ФПМ) или частотно-контрастная характеристика (ЧКХ), краевая функция, функция концентрации энергии [1]. Эти функции при использовании цифровой обработки в процессе контроля могут быть получены за один прием, что существенно сокращает время контроля и повышает его оперативность.

В настоящее время в практике оптического контроля широко используют ПЗС камеры в качестве приемника. С помощью ПЗС матрицы, установленной в фокальную плоскость исследуемого объектива, пятно рассеяния этого объектива сразу регистрируется в виде цифровой картины, представляющей массив значений ФРТ. Однако ПЗС представляет собой матрицу потенциальных ям,

каждая из которых работает как отдельный фотоприемник, поэтому напряжение видеосигнала зависит от формы световой характеристики фотоприемника, имеющей прямолинейный участок. За пределами этого линейного участка напряжение сигнала не пропорционально уровню освещенности, причем отклонение от пропорциональности изменяется по нелинейному закону. На рис. 1 показано, что фотометрическая структура пятна, которую создает ПЗС камера, искажается и сильно отличается от реальной ФРТ. Кроме того, на картине регистрируется только первое дифракционное кольцо. Второе, соответствующее уровню относительной освещенности 0,0045, не зарегистрировано. Это доказывает, что диапазон регистрации освещенности камерой в обычном режиме соответствует перепаду освещенностей в изображении точки не более чем в 200 раз и является недостаточным.

Способ расширения возможностей анализа при оценке качества оптического изображения с помощью ПЗС камеры

Для расширения диапазона регистрируемых освещенностей и устранения влияния нелинейности световой характеристики ПЗС матрицы в данной работе разрабатывались алгоритмическое и программное обеспечения, которые предназначены для реализации компьютерной версии эффективного метода изофотометрии [2–4]. Метод основан на регистрации серии изображений пятна рассеяния с переменным временем экспозиции на одном и том же фотоприемнике и на получении совокупности фотометрических сечений, соответствующих раз-

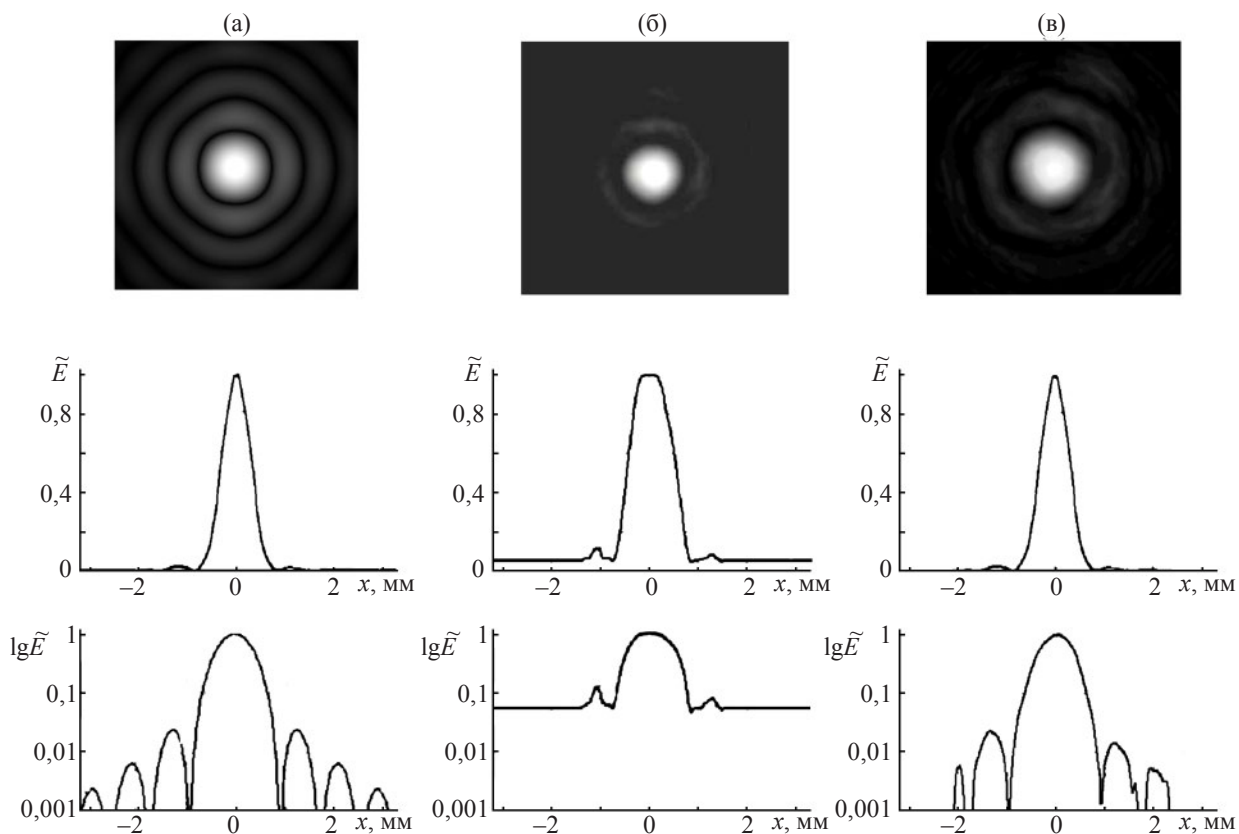


Рис. 1. Дифракционная картина на отверстии диаметром $d = 0,2$ мм зарегистрирована на расстоянии $l = 230$ мм разными методами. а – пятно, рассчитанное по дифракционной теории, б – пятно, которое дает камера EVC-135, в – пятно, полученное методом изофотометрии.

личным уровням равной освещенности. Контур каждого фотометрического сечения является изофотой. Из системы изофот можно получить карту и восстановить функцию распределения освещенности в пятне рассеяния (рис. 2). Такой метод назван методом изофотометрии с изменяющимся временем накопления [2–4]. Метод был применен при технологическом контроле и аттестации 6-метрового зеркала крупнейшего оптического телескопа БТА и оптических систем серии гигантских телескопов, построенных на ЛОМО в 70 – 80 годах XX века. Однако из-за высокой трудоемкости при ручной реализации метод не использовался в условиях серийного производства. Кроме того, отсутствие совершенных компьютеров препятствовало глубокому математическому анализу ФРТ с вычислением и отображением полной гаммы характеристик качества изображения (ФРЛ, ФПМ, пограничная кривая). Заказчики в те времена вполне довольствовались функцией концентрации энергии, которая могла быть при достаточной усидчивости рассчитана

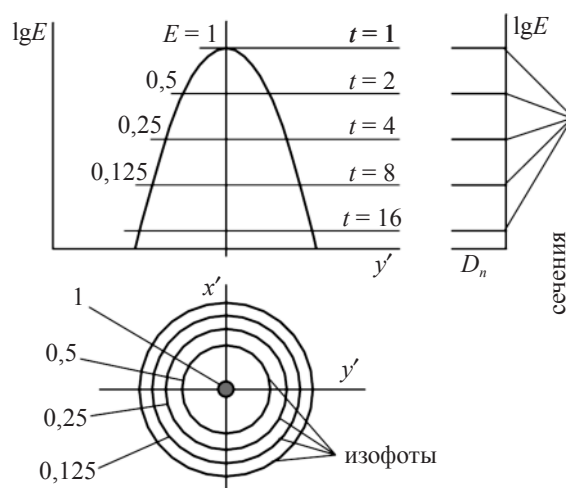


Рис. 2. Схема метода изофотометрии с переменным временем накопления и вид изофотogramмы. E – освещенность в оптическом изображении точки; x' , y' – координаты в плоскости изображения, D_n – интенсивность изофоты.

вручную и предоставляла необходимый количественный критерий качества обработки зеркала.

Однако при отсутствии методов прямого исследования структуры изображения в практически приемлемом диапазоне особенно важными были серьезные достоинства методов изофотометрии.

Необходимость расширения области применения изофотометрических принципов в наши дни привели авторов к задаче создания метода компьютерной изофотометрии. Новый метод основан на идее компьютерного управления работой современной видеокамеры, которая по программе регистрирует серию кадров с нарастающим временем экспозиции; далее программа обеспечивает выделение изофоты каждого кадра регистрации. Массив изофот настолько плотен, что ФРТ формируется как совокупность координат точек, расположенных на расстоянии порога разрешения регистрирующей камеры и поэтому сливающихся в монолитную поверхность без применения какой-либо аппроксимации.

Таким образом, метод компьютерной изофотометрии, наследуя ряд признаков классической изофотометрии, дает радикально новые результаты и возможности.

Классическая изофотометрия позволяет получать только систему отдельных изофот на отдельных уровнях относительной освещенности, а после ручной расшивки ряда точек каждой изофоты возникает возможность путем аппроксимации массива получить ФРТ как в той или иной степени сглаженную поверхность. При этом могут быть потеряны отдельные детали структуры ФРТ, что снижает информативность метода.

Компьютерная изофотометрия, представляя ФРТ как монолитную поверхность экспериментально измеренных точек, позволяет наблюдать и исследовать с высокой достоверностью все особенности распределения освещенности в изображении тест-объекта. Многие из этих особенностей связаны с конкретными ошибками и абберациями конкретной системы, и их исследование особенно важно при контроле прецизионных оптических поверхностей, когда интерферометр не способен выявить остаточные ошибки в силу погрешностей самого прибора и метода расшивки.

Диапазон регистрации освещенности по данному методу не зависит от протяженности рабочего участка световой характеристики фотоприемника, так как при выделении изофоты как контура (рис. 2) световая характеристика приемника преобразуется из плавной в импульсную [2], а зависит от изменения времени накопления, которое может быть выше 10^3 – 10^5 . В данном исследовании экспериментальная установка была оснащена матричной видео-

камерой нового поколения *VAC-135* с протяженностью линейного участка световой характеристики, соответствующей изменению относительной освещенности в 10^{2x} . Однако при работе камеры в режиме изофотометрии относительное время накопления (экспозиции) может переключаться в диапазоне свыше трех порядков ($1 \div 2047$). При этом распределение освещенности в оптическом изображении регистрируется в диапазоне, превышающем протяженность линейного участка световой характеристики камеры, что соответствует возможности регистрации освещенности в оптическом изображении тест-объекта при ее перепаде от максимальной до минимальной с коэффициентом $10^{3.3}$.

Необходимо отметить, что ассортимент матричной телевизионной аппаратуры быстро развивается, и сегодня мы уже имеем на рынке камеры, позволяющие регулировать изменение экспозиции в диапазоне до 100 000 раз, т. е. существенно расширяется динамический диапазон, в котором методом изофотометрии можно определить структуру изображения тест-объекта, например – функцию рассеяния точки.

На рис. 3 изображена принципиальная схема устройства. Установка содержит осветительную систему, в которую входят лазер 1 и объектив осветительной системы 3, формирующий точечный источник света. В осветительную систему введен перемещающийся (вращающийся) фотометрический клин 2, плавно меняющий световой поток. Сформированный с помощью диафрагмы 4 точечный источник света посылает расходящийся гомо-

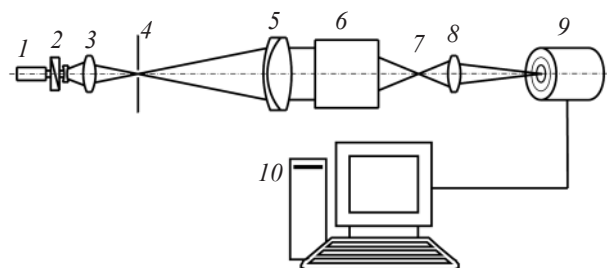


Рис. 3. Схема установки для измерения ФРТ фотобъектива по методу изофотометрии с изменяющимся временем накопления с помощью камеры. 1 – лазер, 2 – фотометрический клин, 3 – система для фокусировки лазерного пучка, 4 – точечная диафрагма, 5 – объектив коллиматора, 6 – исследуемый объектив, 7 – изображение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

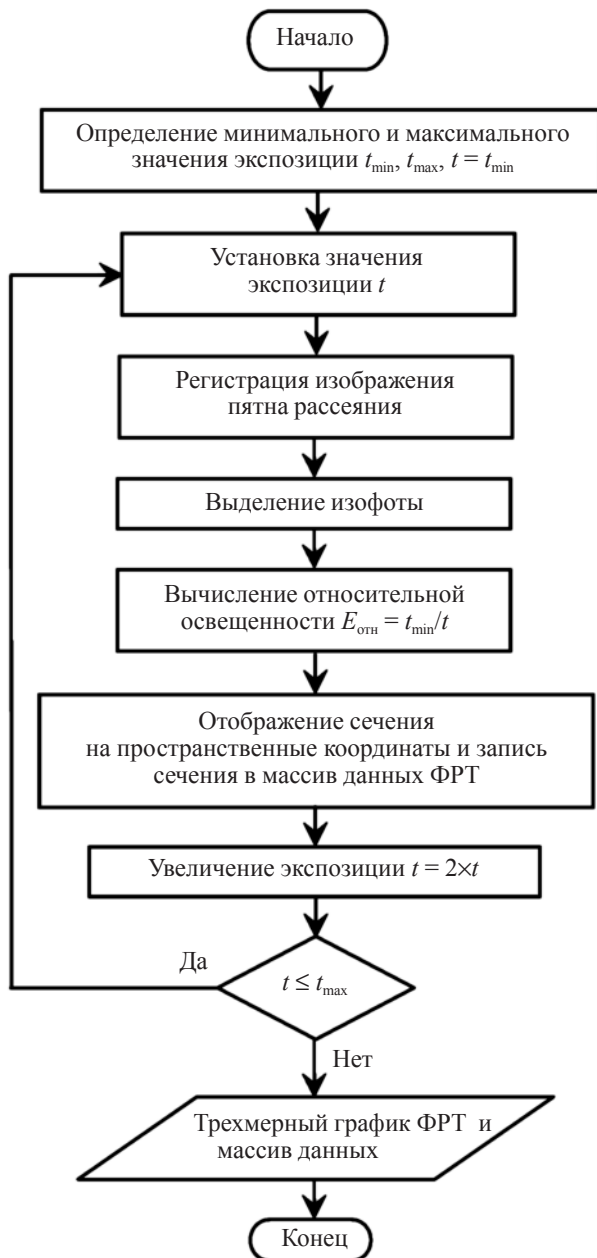


Рис. 4. Алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением.

центрический пучок через объектив коллиматора 5 в зрачок исследуемой системы 6, которая строит пятно рассеяния 7. Это изображение с помощью микрообъектива 8 переносится с увеличением на чувствительную площадку ПЗС камеры 9. Камера превращает изображение пятна рассеяния в видеосигнал и посылает в компьютер через порт *USB*. С помощью разработанной программы “КИЗО-ФРТ” можно наблюдать пятно рассеяния на мониторе и автоматически выполнять съемку серии последовательных фотокадров с переменным временем накопления.

Сформированные ПЗС камерой цифровые изображения вводятся в модуль выделения изофот.

На рис. 4 показано алгоритмическое решение компьютерной версии изофотометрии с переменным накоплением. В исходном состоянии параметр “*exposure*” камеры установлен на минимальное значение t_1 , а фотометрический клин введен так, что световой поток в схеме контроля формирует изображение, дающее первую изофоту для центрального максимума ФРТ. Эта изофота для дифракционного кружка имеет вид точки и соответствует значению освещенности $E_{отн1}$, которое принимается равным единице.

В процессе измерения после установки увеличенного времени экспозиции $t_2 = kt_1$ программа выполняет регистрацию изображения пятна рассеяния и вводит его в модуль выделения изофоты. Эта изофота является контуром фотометрического сечения, соответствующего новому уровню относительной освещенности $E_{отн2} = t_1/t_2$.

Таким образом, $E_{отнn} = 1/t_{отнn} = t_1/t_n$, поэтому изофота далее помещается в систему координат на уровень $E_{отнn}$, который и записывается в память. Когда t превышает максимальное значение t_{max} , работа программы заканчивается формированием ФРТ, а на мониторе получается графическое отображение ФРТ.

Итак, в результате запоминания ряда фотометрических сечений и построения в пространственных координатах их исходного взаимного расположения формируются графики ФРТ (рис. 5), включая карту ФРТ и объемную диаграмму ФРТ [6].

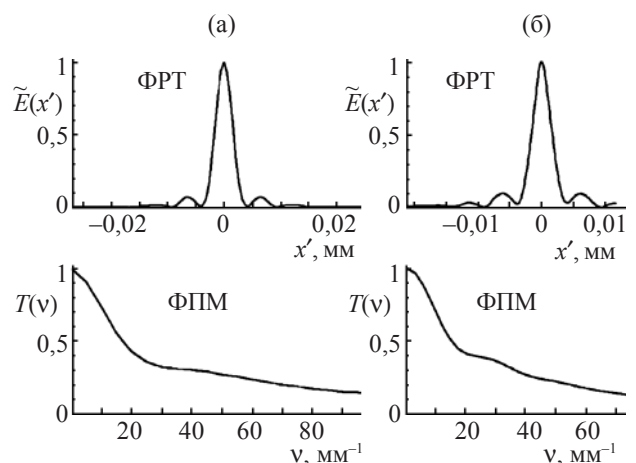


Рис. 5. ФРТ и ФПМ склеенного объектива для осевого пучка. а – расчетные результаты, б – экспериментальные результаты по методу изофотометрии.

Программа и результат

Создан алгоритм, который лег в основу разработки программного обеспечения, названного “КИЗО-ФРТ”. Можно констатировать создание нового метода – компьютерной изофотометрии с изменяющимся временем накопления. С помощью матричной камеры *VAC-135* и с применением созданного программного обеспечения метод позволяет определить ФРТ в диапазоне изменения освещенности на уровне $10^{3,3}$ и обработать результаты контроля для получения основных количественных и качественных характеристик изображения исследуемого объектива.

Для экспериментальной иллюстрации этапов работы программы с исследуемым объективом использован двусклеенный объектив. Его расчетные параметры представлены в таблице. На рис. 5 дано сравнение графиков ФРТ и ФПМ, полученных как расчетно, так и экспериментально по методу изофотометрии.

Параметры			Материал
r	d	$D_{св}$	стекло
128,680	10,00	50	К8
-90,860	4,00	50	ТФ1
-275,720		50	

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

На рис. 5 видно, что расчетная и экспериментальная ФПМ хорошо согласуются. Имеющиеся различия между ними можно объяснить такими факторами, как погрешности изготовления линз, несовпадение положения плоскости приемника с положением расчетной фокальной плоскости, наличие остаточных бликов и рассеянного света в аппаратуре контроля.

Заключение

Настоящая работа посвящена развитию методов изофотометрии на основе их компьютеризации. Она осуществлена для устранения недостатков традиционных методов прямого определения ФРТ, основанных на сканировании, и для модернизации разработанных изофотометрических методов экспериментального широкодиапазонного исследования

характеристик качества изображения оптических систем.

Благодаря разработке алгоритмического и программного обеспечения для установок контроля качества изображения создан новый компьютерный метод изофотометрии с изменяющимся временем накопления световой энергии. При этом автоматический режим изофотометрии достигнут благодаря тому, что съемочная камера в процессе изофотометрической регистрации управляется компьютером. Метод позволяет на современном уровне реализовать уникальные возможности изофотометрии с изменяющимся временем накопления, объединяя достоинства широкодиапазонного анализа структуры изображения тест-объекта, высокой скорости и широкого объема компьютерной обработки экспериментальных данных. Создана возможность измерения тонкой структуры пятна рассеяния.

Обеспечено оперативное определение полного набора характеристик качества изображения, таких как широкодиапазонный двумерный массив значений ФРТ, функция передачи модуляции, функция концентрации энергии, функция рассеяния линии и пограничная кривая.

Таким образом, на изофотометрических принципах разработан и реализован современный метод исследования качества изображения, приспособленный для реального производства и прошедший успешное испытание в цеховых условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. М.: Машиностроение, 1980. 206 с.
2. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Часть 4. СПб.: изд. ГУ ИТМО, 2005. 88 с.
3. Иванова Т.А., Кирилловский В.К. Проектирование и контроль оптики микроскопов. Л.: Машиностроение, 1984. 230 с.
4. Зверев В.А., Кирилловский В.К., Сокольский М.Н. Исследование качества изображения оптических систем методом изофотометрической фоторегистрации // ОМП. 1976. № 8. С. 14.
5. Кирилловский В.К., Ле Зуи Туан. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для аппаратуры контроля качества изображения оптических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50. № 7. С. 52.
6. Ле Зуи Туан, научный руководитель Кирилловский В.К. Разработка алгоритмического и программного обеспечения для установки контроля качества изображения объектива // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. Вып. 26. СПб.: изд. ГУ ИТМО, 2006. С. 221.