

ИЗМЕРЕНИЕ ФУНКЦИЙ ПЕРЕДАЧИ МОДУЛЯЦИИ ОБЪЕКТИВОВ С ПОМОЩЬЮ МАТРИЧНЫХ ПЗС-ФОТОПРИЕМНИКОВ

© 2008 г. В. С. Нужин*, канд. техн. наук; А. В. Нужин**, канд. техн. наук; С. В. Солк*, канд. техн. наук

* НИИ комплексных испытаний оптико-электронных приборов и систем, г. Сосновый Бор, Ленинградская область

** НПК “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Санкт-Петербург

E-mail: solk@sbor.net

Рассматриваются варианты измерения функций передачи модуляции объективов с регистрацией измерительной информации на матричном ПЗС-фотоприемнике. Приводятся результаты экспериментальных измерений.

Коды OCIS: 120.0120, 100.2000.

Поступила в редакцию 02.07.2007.

Оценка качества изготовления объективов, предназначенных для создания изображения удаленных объектов, обычно проводится на оптическом стенде с коллиматором. В фокальной плоскости объектива коллиматора устанавливается тест-объект. Испытуемый объектив, установленный в ходе параллельных лучей, выходящих из коллиматора, строит изображение тест-объекта в своей фокальной плоскости. Качество этого изображения анализируют различными способами.

Для измерения функции передачи модуляции (ФПМ) часто используют тест-объекты в виде узкой светящейся линии – щели. Распределение освещенности в изображении щели, представляющее функцию рассеяния линии (ФРЛ), регистрируют известным способом, например, путем сканирования узкой щелью, за которой установлен одноэлементный фотоприемник. Фурье-преобразование от ФРЛ позволяет вычислить ФПМ испытуемого объектива в заданной точке поля зрения и в заданной плоскости установки приемной щели [1]. При этом в результаты вычисления ФПМ должна быть введена поправка, обусловленная шириной приемной щели, установленной в фокальной плоскости коллиматора, и шириной ее геометрического изображения.

Необходимость изготавливать узкие щели (2–5 мкм) и регистрировать малые световые сигналы при сканировании их изображения вызывает технологические трудности, иногда приводящие к увеличению погрешности определения ФПМ.

Качество современных ПЗС-фотоприемников позволяет создавать различные оптико-электронные измерительные системы. Сопряжение типовой ПЗС-камеры с персональным компьютером открывает широкие возможности для обработки и анализа изображений цифровыми методами. Покажем, как

решается задача измерения ФПМ объективов с использованием ПЗС-фотоприемника.

Сначала рассмотрим случай с тест-объектом в виде узкой светящейся линии. Испытуемый объектив строит изображение линии в плоскости изображения. В эту плоскость поместим матричный ПЗС-фотоприемник. Для изображения, зарегистрированного на матричном ПЗС-фотоприемнике, введем следующие обозначения: U_{li} – нормированная амплитуда сигнала от изображения линии в i -м элементе анализируемой строки матрицы, x_i – координата i -го элемента строки матрицы, k – число элементов строки матрицы, тогда $x_i = ia$, где i – номер элемента строки, a – размер элемента вдоль строки.

Далее для определения ФПМ можно использовать следующие формулы дискретного преобразования Фурье:

$$C_N = \frac{\sum_{i=0}^k \cos(2\pi N x_i) U_{li}}{\sum_{i=0}^k U_{li}}, \quad S_N = \frac{\sum_{i=0}^k \sin(2\pi N x_i) U_{li}}{\sum_{i=0}^k U_{li}}, \quad (1)$$

$$T_N = \sqrt{C_N^2 + S_N^2}, \quad (2)$$

где N – пространственная частота.

Проведя вычисления по указанным формулам для разных значений N , получим ФПМ системы объектив–матричный фотоприемник–коллиматор.

На практике, как показано выше, в результаты вычислений по формулам (1), (2) следует вводить поправку, обусловленную шириной изображения щели, являющейся тест-объектом, а также исключать влияние на результаты измерений конечных размеров элементов ПЗС-структуры. Последнее условие может быть обеспечено применением мик-

роскопа для переноса с заданным увеличением изображения тест-объекта из фокальной плоскости испытуемого объектива в плоскость ПЗС-приемника.

Для измерений следует использовать ПЗС-камеру с отключенной гамма-коррекцией и возможностью отключения автоматических регулировок усиления и времени накопления заряда для уменьшения влияния собственных шумов матрицы на результаты измерений.

В данной работе при измерениях использовался тест-объект в виде полуплоскости (“резкий край”). Изображение полуплоскости делит матрицу на две примерно равные по площади области – темную и светлую – с переходной зоной между ними, называемой функцией рассеяния края (ФРК). В этом случае наилучшим образом используется допустимый динамический диапазон матрицы. Полученное распределение освещенности в переходной зоне подлежит численному дифференцированию. В результате дифференцирования осуществляется переход от ФРК к ФРЛ [2]. Далее для вычисления ФПМ по ФРЛ используется преобразование Фурье по формулам (1) и (2).

Шумы матрицы существенно влияют на результаты дифференцирования и требуют специальных мер для их подавления. Для усреднения шумов в настоящей работе использовались усреднение сигнала по ряду кадров, а в пределах кадра – по ряду строк, выбранных для обработки, и затем – цифровое сглаживание сигналов в соседних элементах матрицы.

В качестве испытуемого объектива использовался фотообъектив “Телиос-44” при относительном отверстии 1:5,6. Измерения ФПМ проводились в прямом и обратном ходе лучей на установке с коллиматором ($f_k = 1880$ мм), оснащенной камерой VBS-521 с ПЗС-матрицей ICX055BL-A (SONY). Запись изображений для последующей обработки проходила в режиме работы камеры с усреднением сигналов по 10 кадрам. В качестве осветителя тест-объекта использовался шаровой осветитель с шестью светодиодами, излучающими в красной области спектра.

Схема измерений в прямом ходе лучей представлена на рис. 1а. Тест-объект 1 в виде полуплоскости устанавливался в фокальной плоскости объектива коллиматора 3. Испытуемый объектив 4 строил изображение тест-объекта в своей задней фокальной плоскости 5. Через микрообъектив 6 изображение с увеличением $32\times$ переносилось в плоскость фоточувствительной площадки матрицы ПЗС 7. Использование микрообъектива обусловлено тем, что распределение освещенности, описываемое ФРК, занимает определенное число элементов на матрице, при котором допустимо численное дифференцирование и интегрирование сигналов, а усреднение сигналов в пределах размера элемента ПЗС-структуры не искажает результатов измерений.

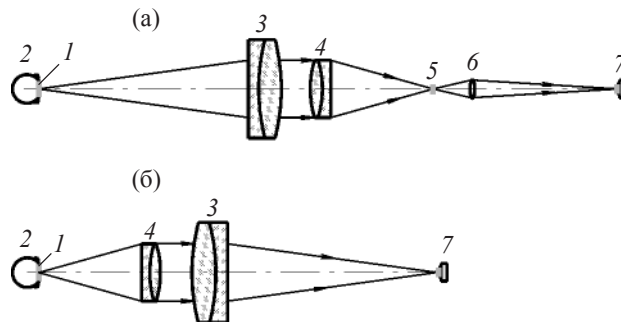


Рис. 1. Принципиальные оптические схемы измерения ФПМ объективов в прямом (а) и обратном (б) ходе лучей. 1 – тест-объект – полуплоскость, 2 – шаровой осветитель тест-объекта, 3 – объектив коллиматора, 4 – испытуемый объектив, 5 – изображение тест-объекта в задней фокальной плоскости испытуемого объектива, 6 – микрообъектив, 7 – ПЗС-камера, столбцы ПЗС-матрицы ориентированы вдоль границы изображения темного и светлого участков тест-объекта.

Схема измерений в обратном ходе лучей представлена на рис. 1б. В этом случае тест-объект устанавливался в фокальной плоскости испытуемого объектива, а объектив коллиматора строил изображение тест-объекта непосредственно на фоточувствительной площадке матрицы ПЗС. Положительной особенностью измерений в обратном ходе лучей является то, что изображение тест-объекта получается на матрице с увеличением, пропорциональным отношению фокусного расстояния коллиматора к фокусному расстоянию испытуемого объектива, и не требует применения дополнительного микрообъектива, который должен удовлетворять определенным требованиям по апертуре, рабочему увеличению и качеству изображения.

Обработка изображений выполнялась в среде Mathcad по разработанной авторами программе. Материалы, иллюстрирующие этапы обработки изображения полуплоскости, представлены на рис. 2.

Окончательные результаты обработки изображений ФРК, полученных при измерениях в прямом и обратном ходе лучей, представлены на рис. 3. На этом же рисунке приведена ФПМ объектива, рассчитанная в программном комплексе “ОПАЛ”. Расчет выполнялся для спектрального интервала, в котором проводились измерения.

Для оценки погрешности измерений, обусловленной шумами матрицы, были выполнены измерения для 10 различных реализаций изображения, по которому вычислялась ФПМ. Различия в коэффициенте передачи контраста на всем интервале пространственных частот не превысили 0,01 единицы коэффициента передачи модуляции (КПМ).

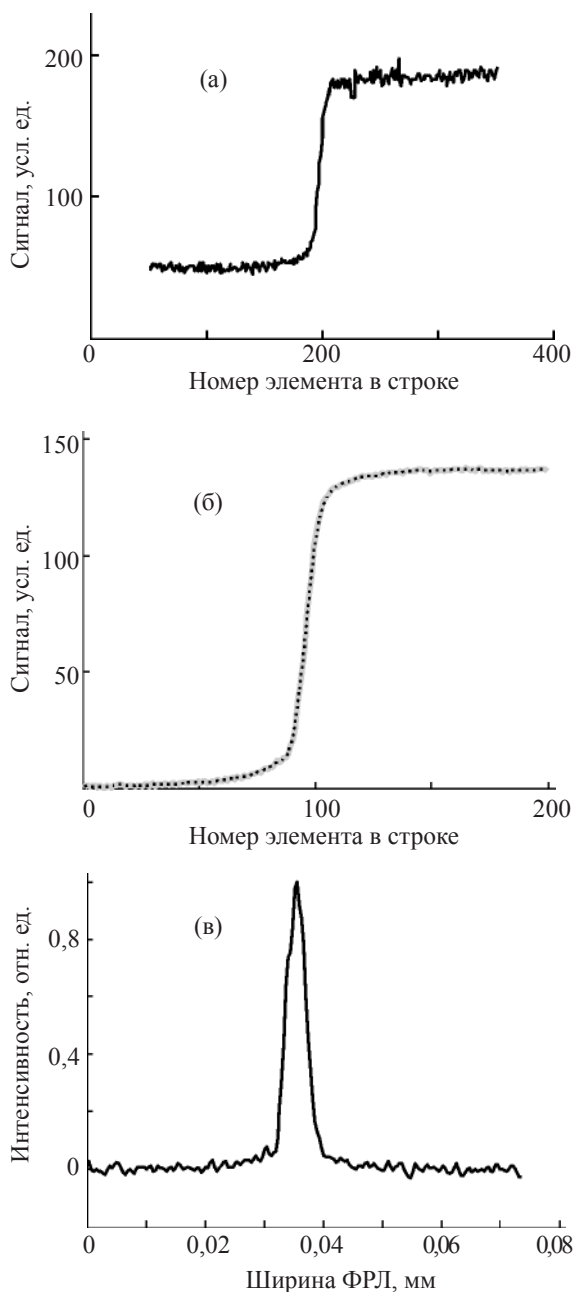


Рис. 2. Этапы обработки изображения полуплоскости. а – распределение сигнала вдоль элементов одной строки в изображении полуплоскости, б – распределение сигнала вдоль элементов одной строки в изображении полуплоскости, усредненное по 100 строкам с дополнительным программным сглаживанием; в – ФРЛ, полученная как результат дифференцирования усредненного и сглаженного распределений сигнала вдоль строки.

Систематическая составляющая погрешности в случае обратного хода лучей зависит от точности определения увеличения системы коллиматор–испытываемый объектив, в случае прямого хода лучей – от увеличения микрообъектива. Кроме того, она зависит от неравномерности освещенности тест-объекта, погрешности дискретизации распределе-

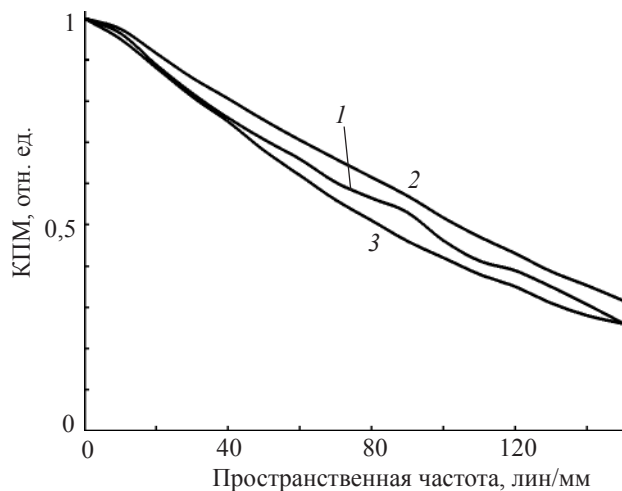


Рис. 3. ФПМ объектива “Гелиос 44” при относительном отверстии 1:5,6 в спектральном диапазоне 0,62–0,76 мкм в центре поля зрения. 1 – “прямой” ход лучей, 2 – “обратный” ход лучей, 3 – расчет по программе “ОПАЛ”.

ния освещенности при регистрации на матрице ПЗС и (при наличии автоматических регулировок) от установленного режима работы ПЗС-камеры. Применительно к выполненному эксперименту сравнение ФПМ, полученных экспериментально, с ФПМ по оптическому расчету испытываемого объектива показывает, что общая погрешность составляет не более 0,05 единицы КПМ без учета конструкторско-технологических погрешностей испытываемого объектива. Указанная погрешность является вполне приемлемой для решения большинства практических задач по измерению ФПМ различных объективов.

Предложенный метод определения ФПМ объективов в обратном ходе лучей с использованием тест-объекта в виде полуплоскости может быть рекомендован для испытания объективов и оптических материалов, работающих в ИК диапазоне спектра. Так, при использовании матричного фотоприемника, чувствительного в ИК диапазоне, и оптической скамьи с зеркальным коллиматором, описанным в работе [3], можно обеспечить удовлетворительную точность измерений и существенно повысить производительность труда в испытательных лабораториях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульман М.Я. Автоматическая фокусировка оптических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд., 1990. 224 с.
2. Проектирование оптических систем. Пер. с англ. / Под ред. Шеннона Р., Вайанта Дж. М.: Мир, 1983. 412 с.
3. Васильева Л.В., Лебедев О.А., Нужин В.С., Солк С.В. Проектирование и изготовление линзовых объективов для работы в инфракрасной области спектра // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 4. С. 72–75.