

УДК 681.7.013.8

Особенности разработки установок для измерения характеристик качества оптических систем видимого диапазона спектра

© 2019 г. **М. Б. Леонов, канд. техн. наук***Филиал АО «Корпорация «Комета» — «Научно-проектный центр оптоэлектронных комплексов наблюдения», Санкт-Петербург**E-mail: muxeu87@yandex.ru**Поступила в редакцию 14.02.2019*

DOI:10.17586/1023-5086-2019-86-05-11-16

Рассматриваются особенности разработки установок для измерения функций рассеяния, передачи модуляции, концентрации энергии оптических систем видимого диапазона. Подробно рассмотрены особенности разработки, сборки, юстировки и дальнейшего применения анализирующих узлов на основе матричных фотоприемных устройств.

Ключевые слова: объективы, оптические измерения, функция рассеяния точки, функция рассеяния линии, функция передачи модуляции, частотно-контрастная характеристика, функция концентрации энергии.

Коды OCIS: 120.4630, 120.4800

Одним из главных критериев качества оптических систем является функция передачи модуляции (ФПМ, или частотно-контрастная характеристика — ЧКХ) — совокупность значений коэффициентов передачи модуляции (КПМ) для различных пространственных частот. Под КПМ подразумевается отношение модуляции (контраста) в изображении мира заданной пространственной частоты с синусоидальным распределением яркости, построенным испытываемым объективом, к модуляции (контрасту) в объекте [1].

Стандартизированный метод измерений ФПМ объективов видимого диапазона спектра (0,4–0,7 мкм), так называемый «метод гармонического анализа сигнала» [2], используемый в отечественной оптической промышленности длительное время, потерял свою актуальность из-за сложности его реализации и высокой погрешности измерений. Активно развиваются методы определения ФПМ путем математической обработки измеренных функций рассеяния точки (ФРТ) и функций рассеяния линии (ФРЛ) [3, 4]. Измерительные установки, разработанные для проведения измерений по данному стандарту, не учитывают еще один важный критерий качества — функцию концентрации энергии (ФКЭ), совокупность значений

коэффициента концентрации энергии в кругах заданного диаметра [4].

Разрабатываемая комплексная установка (рис. 1) с анализирующим узлом на основе матричного фотоприемного устройства (МФПУ), матрицы на основе прибора с зарядовой связью (ПЗС) позволит измерять критерии качества и оптотехнические характеристики оптических систем видимого диапазона спектра. Реализация установки возможна как с коллиматором (для оптических систем, работающих из бесконечности), так и без него (для объективов, работающих с конечного расстояния) [5]. При этом, если в качестве коллиматорного объекта будет использовано внеосевое асферическое зеркало, отпадает необходимость использования плоского зеркала для излома оптической оси с целью оптимального размещения фокального узла.

Фокальный узел состоит из источника излучения — галогенной лампы, конденсора, согласованного с апертурой коллиматора, светофильтра, выделяющего рабочую область спектра, а также узла тест-объектов. Конденсор может быть как зеркальным, так и линзовым. Зеркальный конденсор дает возможность унификации установки для работы в различных спектральных диапазонах. Узел тест-объектов состоит из комплекта сменных

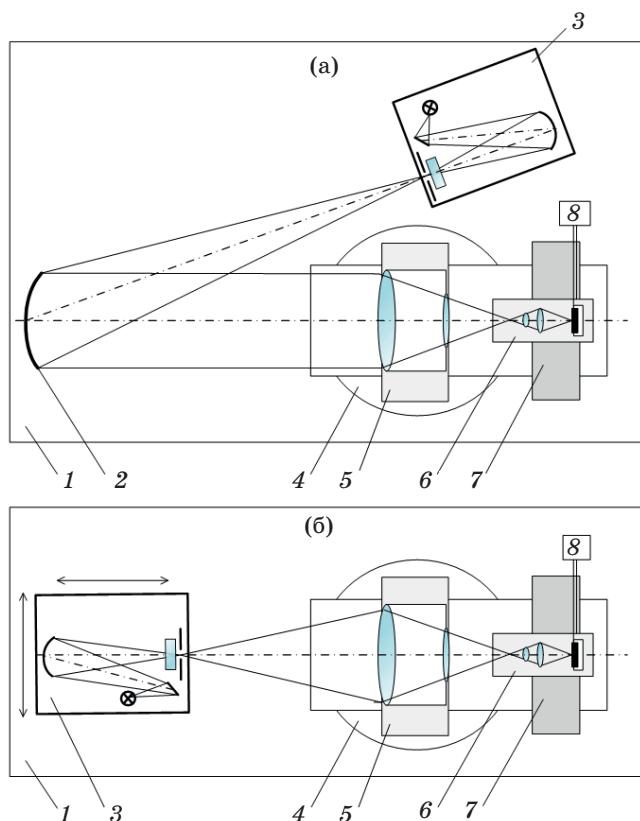


Рис. 1. Схемы измерительных установок для объективов, работающих из бесконечности (а) и работающих с конечного расстояния (б). 1 — единое амортизационное основание, 2 — коллиматорный объектив, 3 — фокальный (или предметный) узел, 4 — поворотное устройство, 5 — держатель объектива (с испытуемым объективом), 6 — анализирующий узел, 7 — трехкоординатное устройство, 8 — система управления, сбора и обработки экспериментальных данных.

диафрагм (точечных, щелевых, тест-объектов типа «крест», «полуплоскость»), а также щелевой диафрагмы регулируемой ширины.

При измерениях с конечного расстояния фокальный узел переносится на трехкоординатное устройство, установленное перед держателем объектива. При измерениях по полю поворотное устройство не используется, так как для объективов, работающих с конечного расстояния, предметное поле является линейным, а не угловым. При измерениях необходимо выполнить юстировку, выставив предметный узел на оптическую ось объектива. В качестве базы при такой юстировке используют механическую ось вращения держателя объектива, которую визуализируют с помощью лазера. При измерениях необходимо наиболее точно выставить передний отрезок испытуемого объектива, так как от этого зависят линейное увеличение и результаты измерений.

По аналогичной схеме построена установка *ImageMaster® Universal* немецкой фирмы TRIOPTICS. Коллиматор с фокальным узлом и ана-

лизирующий узел имеют светозащитные кожухи для исключения влияния рассеянного света на результат измерений. Для удобства работы с фокальным узлом в оптическую схему установки введено плоское зеркало. Программное обеспечение (ПО) и аппаратная часть обеспечивают измерение ФРЛ и ФПМ в режиме видеопотока, а также автоматизированное измерение расфокусировочных кривых КПМ, фокусного расстояния, дисторсии, хроматических aberrаций [6]. При всех достоинствах данной установки в ней, к сожалению, отсутствует возможность работы с точечными тест-объектами и, соответственно, отсутствует и возможность измерения ФКЭ. Именно по виду точки очень часто можно дать оперативное заключение о характере технологических погрешностей оптических систем, наличии в них aberrаций, вызванных децентрировкой, пережатием или перекосом оптических компонентов, что необходимо в условиях производства. Кроме того, значение ФКЭ в круге определенного диаметра (соответствующего, например, размеру пиксела штатного МФПУ оптико-электронной системы) чаще всего является сдвочным параметром оптических систем.

Несмотря на то, что в существующих стандартах [2, 4] подробно рассмотрены требования к разработке таких измерительных установок, в них отсутствуют требования к наиболее ответственной составной части после коллиматора — анализирующему узлу на основе МФПУ с микропроекционной оптикой. Такой узел может быть реализован в двух исполнениях микропроекционной системы: с микрообъективом, работающим с конечного расстояния на конечное, и с микрообъективом «тубус — бесконечность» (рис. 2). В последнем случае для фокусировки на МФПУ используется тубусная линза. Второе исполнение значительно проще

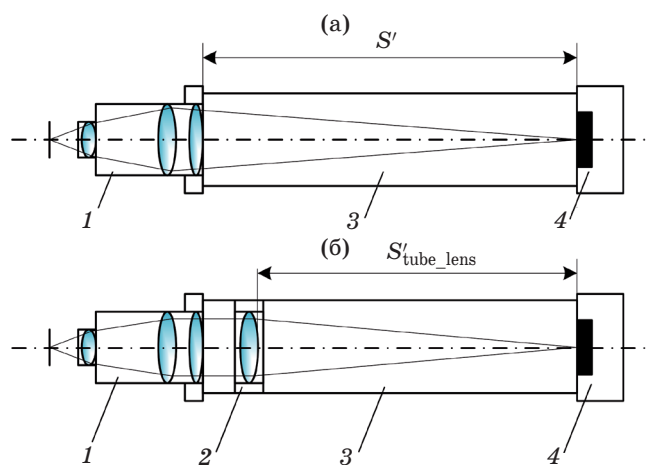


Рис. 2. Схемы исполнений анализирующего узла с микрообъективом, работающим с конечного расстояния на конечное, (а) и с микрообъективом «тубус — бесконечность» (б). 1 — микрообъектив, 2 — тубусная линза, 3 — тубус, 4 — МФПУ. S' — задний рабочий отрезок.

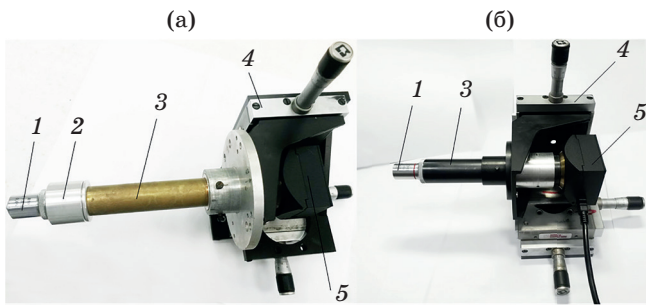


Рис. 3. Анализирующие узлы на трехкоординатном устройстве, выполненные с тубусной линзой (а) и без тубусной линзы (б). 1 — микрообъектив, 2 — тубусная линза, 3 — тубус, 4 — трехкоординатное устройство, 5 — цифровая камера BMR-1400HM-U.

по юстировке, кроме того, в микрообъективах «тубус — бесконечность» значения хроматических aberrаций значительно ниже.

Разработанные и изготовленные макеты анализирующих узлов представлены на рис. 3. В качестве МФПУ используется монохроматическая цифровая камера BMR-1400HM-U на базе матрицы ПЗС SONY ICX285AL. Трехкоординатное устройство состоит из трех линейных трансляторов с диапазоном перемещения 25 мм. Тубус анализирующего узла с тубусной линзой (рис. 3а) имеет юстировочные подвижки для установки заднего фокального отрезка тубусной линзы в плоскость МФПУ. Тубус анализирующего узла без тубусной линзы (рис. 3б) имеет юстировочные подвижки для установки заднего рабочего отрезка микрообъектива. После проведенной юстировки каждый из анализирующих узлов может комплектоваться соответствующими микрообъективами.

Микропроекционная система (микрообъектив или микрообъектив с тубусной линзой) анализирующего узла должна удовлетворять следующим требованиям:

- апертурный угол микропроекционной системы в пространстве предметов должен превышать апертурный угол испытуемого объектива в пространстве изображений не менее чем в 1,2 раза,
- микропроекционная система должна быть ахроматизована и иметь исправленные aberrации в рабочей области спектра (0,4–0,7 мкм),
- увеличение микропроекционной системы должно обеспечивать необходимый для измерений шаг функции рассеяния.

Рассмотрим последний пункт подробнее и выполним измерение увеличения микропроекционной системы в составе анализирующего узла. Для этого используется объект-микрометр с ценой деления $b_{om} = 0,01$ мм. Посредством разработанного ПО измеряем число пикселей n_{pix} , в которое укладывается одно деление шкалы объект-микрометра (рис. 4), и далее, зная паспортное значение

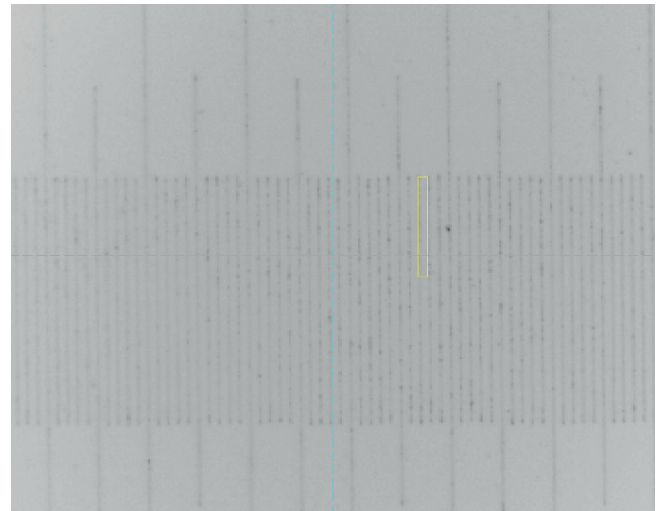


Рис. 4. Изображение (негатив) объект-микрометра, зарегистрированное анализирующим узлом.

размера пиксела a_{pix} , вычисляем увеличение β микропроекционной системы по формуле

$$\beta = \frac{n_{pix} a_{pix}}{b_{om}}. \quad (1)$$

Затем вычисляем шаг функции рассеяния, приведенный к предметной плоскости микропроекционной системы, по формуле

$$dy = a_{pix} / \beta. \quad (2)$$

Для достоверного измерения функции рассеяния необходимо, чтобы на диаметр пятна рассеяния a' испытуемого объектива приходилось не менее 20 отсчетов функции рассеяния, т.е. $dy = a' / 20$. Исходя из этого и формулы (2), получим формулу для определения увеличения микропроекционной системы анализирующего узла

$$\beta \geq a_{pix} / (a' / 20). \quad (3)$$

На практике целесообразно проверять, укладывается ли не менее 20 отсчетов в измеренной функции рассеяния по уровню 0,15 от максимального значения.

В общем случае для измерений функции рассеяния объективов видимого диапазона достаточно шага $dy = 0,0003$ мм, что вполне достижимо при использовании МФПУ с $a_{pix} = 0,006$ мм и микропроекционной системы с $\beta = 20\times$. Полученное значение шага заносится в ПО, и в результате при измерении цены деления объект-микрометра мы получаем 0,01 мм, следовательно, измерение увеличения было выполнено корректно.

Следует заметить, что спектральная чувствительность матрицы ПЗС выходит за пределы 1 мкм,

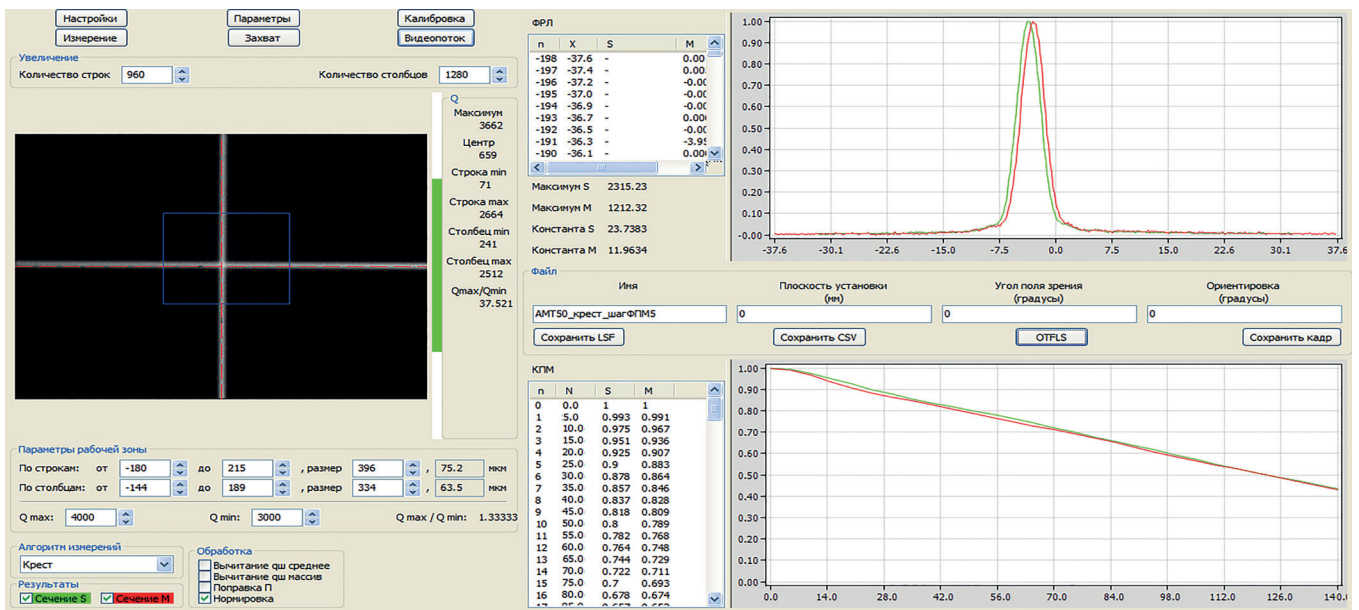


Рис. 5. Окно вывода результатов измерений ФРЛ и ФПМ.

поэтому при использовании соответствующих микропроеекционных систем станет возможным проводить измерения и в ближнем инфракрасном диапазоне (0,70–1,06 мкм)

Измерение ФРЛ (рис. 5) осуществляется в соответствии с методикой, приведенной к стандартизированной [4]. При регистрации изображения вертикального (горизонтального) тест-объекта проводится суммирование и усреднение сигнала (освещенности) на пикселе по каждому отдельному столбцу (строке) в пределах рабочей зоны. Зарегистрированная таким образом ФРЛ представляет собой распределение усредненного сигнала (освещенности) столбцов (строк) в зависимости от координат пиксела с шагом dy .

Для тест-объекта типа «крест» расчет ФРЛ осуществляется аналогично, но со следующими дополнениями: расчет усредненной освещенности по столбцам и строкам проводится за исключением пикселей, лежащих в центральных зонах экранирования. Наличие зон экранирования позволяет снизить влияние изображения одной диафрагмы на результаты расчетов по второй диафрагме.

В отличие от работы [7] в разработанном ПО отсутствует сглаживание измеренных функций рассеяния для коррекции шумовых составляющих, так как аналого-цифровой преобразователь с разрядностью 12 бит не ограничивает динамический диапазон камеры BMR-1400NM-U и в большинстве случаев, даже с интерференционными фильтрами, проводить такую коррекцию не нужно. Для слабосветосильных объективов в ПО реализованы попиксельное или усредненное вычитание шумовой составляющей, а также учет поправки на нелинейность приемника.

Функция передачи модуляции рассчитывается путем преобразования Фурье измеренных ФРЛ или ФРТ (разложения измеренных функций рассеяния линии или точки в ряд Фурье) [1]

$$T(N) = \Pi_c(N) \Pi_m(N) \int_{-\infty}^{\infty} A(x) \exp(-2\pi i N x) dx, \quad (4)$$

где $A(x)$ — измеренная функция рассеяния объектива, N — пространственная частота, мм^{-1} , $\Pi_c(N)$ и $\Pi_m(N)$ — поправочные коэффициенты, учитывающие конечный размер изображения коллиматорной (предметной) b_c и размер измерительной b_m диафрагм.

Поправочные коэффициенты для щелевых диафрагм рассчитываются по формуле

$$\Pi(N) = \frac{\pi N b}{\sin(\pi N b)}, \quad (5)$$

где b — ширина измерительной диафрагмы или ширина геометрического изображения коллиматорной (предметной) диафрагмы, мм.

Поправочные коэффициенты для точечных диафрагм рассчитываются по формуле

$$\Pi(N) = \frac{\pi N d}{2J_1(\pi N d)}, \quad (6)$$

где d — диаметр измерительной диафрагмы или диаметр геометрического изображения коллиматорной (предметной) диафрагмы, мм, J_1 — функция Бесселя первого рода.

В случае тест-объекта типа «полуплоскость» поправочный коэффициент не вносится. Результатом

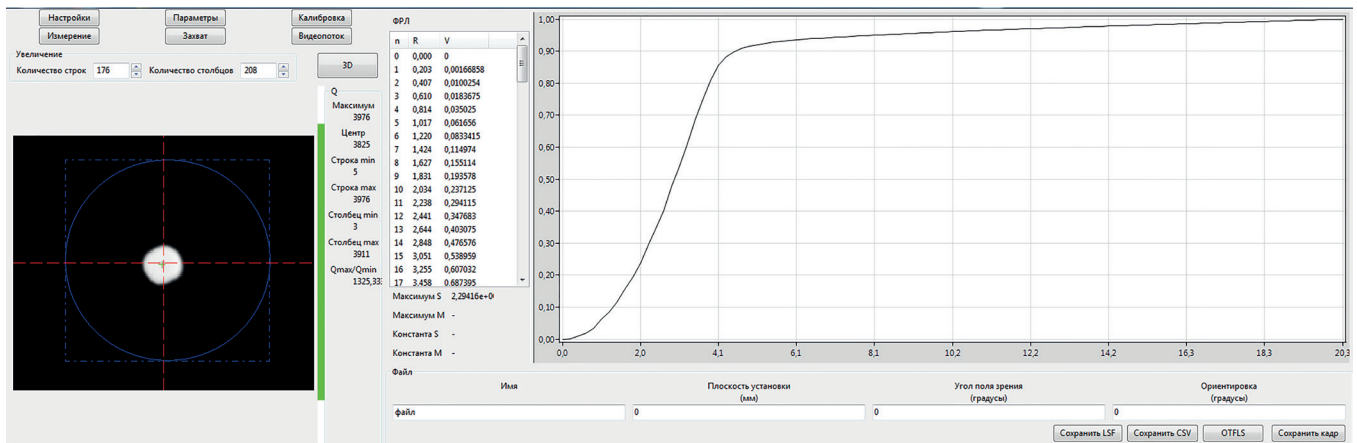


Рис. 6. Окно вывода результатов измерений ФКЭ.

измерений по такому тест-объекту является функция рассеяния края (ФРК, или «пограничная кривая») $E_{ed}(x)$, которая связана с ФРЛ через производную

$$A_1(x) = \frac{dE_{ed}(x)}{dx}. \quad (7)$$

Размеры диафрагм b_c и b_m выбираются так, чтобы значение поправочных коэффициентов Π_m и Π_c на максимальной пространственной частоте N_{\max} (для которой проводятся измерения КПМ), рассчитываемых по формулам (6, 7), не превышали 1,2, а суммарная общая поправка не превышала 1,5, т.е. $\Pi_m(N_{\max}) \leq 1,2$, $\Pi_c(N_{\max}) \leq 1,2$, $\Pi_m(N_{\max})\Pi_c(N_{\max}) \leq 1,5$.

Измерение ФКЭ (рис. 6) осуществляется в соответствии с методикой, приведенной к стандартизированной [4] и уже частично рассмотренной в работе [8]. После регистрации изображения осуществляется его пороговая обработка (бинаризация), после чего выполняется расчет координат энергетического центра (X_c , Y_c) по формулам

$$X_c = \frac{\sum_i \sum_j U_{i,j} j}{\sum_i \sum_j U_{i,j}}, \quad Y_c = \frac{\sum_i \sum_j U_{i,j} i}{\sum_i \sum_j U_{i,j}}. \quad (8)$$

где $U_{i,j}$ — значение сигнала (освещенности) в пикселе с координатами (i , j).

Кроме описанного выше метода расчет координат энергетического центра пятна рассеяния можно выполнить и другими методами, например, методами локализации экстремума (метод дихотомии), «золотого сечения», методом Фибоначчи.

Выполняют регистрацию значений сигнала (освещенности) в последовательности концентрических кругов различных радиусов (с заданным шагом), центры которых совпадают с весовым цен-

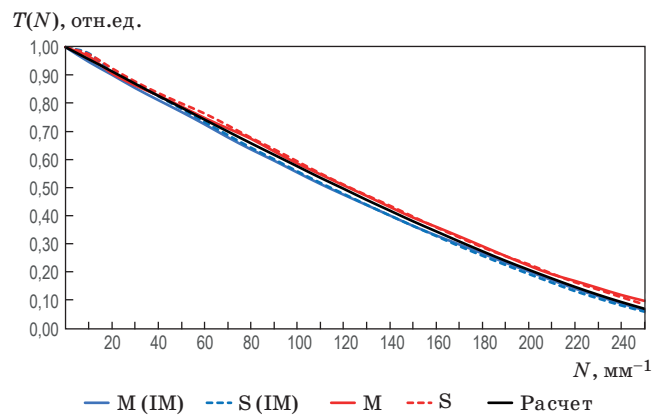


Рис. 7. Сравнение расчетной ФПМ (черная) образца сравнения (фокусное расстояние — 50 мм, относительное отверстие — 1:6,2, длина волны — 0,544 мкм) с ФПМ, измеренными на установке *ImageMaster® Universal* в меридиональном (голубая сплошная) и в сагиттальном (голубая пунктирная) сечениях и измеренными с помощью разработанного анализирующего узла в меридиональном (красная сплошная) и сагиттальном (красная пунктирная) сечениях.

тром пятна рассеяния, и выполняют расчет ФКЭ в соответствии с формулой [8]

$$U_R = \begin{cases} \sum_i \sum_j U_{i,j} \cdot (i - X_c)^2 + (j - Y_c)^2 \leq R^2 \\ 0, (i - X_c)^2 + (j - Y_c)^2 > R^2 \end{cases}, \quad (9)$$

где R — радиус пятна рассеяния.

Затем полученная зависимость нормируется по значению энергии в круге, соответствующему максимальному радиусу.

Исследование метрологических характеристик разработанного анализирующего узла было проведено на основе измерений ФПМ с учетом требований стандарта [9]. На графике (рис. 7) представлено сравнение расчетной ФПМ объектива-

образца сравнения, измеренной на установке *ImageMaster® Universal* (ИМ) и измеренной с помощью разработанного анализирующего узла в меридиональном (М) и сагиттальном (S) сечениях. Случайная погрешность измерений ФПМ в серии из 10 измерений составила $\sigma_T = \pm 0,01$ отн. ед. Систематическая погрешность определена как разность между измеренными и расчетными значениями ФПМ и составила $\Delta_T = \pm 0,02$ отн. ед. Полученная погрешность значительно ниже погрешности «метода гармонического анализа» [2] и не превышает погрешности, заявляемой производителем немецкого аналога [6], и существующих отечественных разработок [7].

Таким образом, разработанный и изготовленный анализирующий узел позволяет измерять такие критерии качества оптических систем видимого диапазона спектра как ФРЛ, ФРТ, ФРК, ФПМ, расфокусировочные кривые КПМ, ФКЭ. При этом погрешности измерений анализирующе-

го узла удовлетворяют современным стандартам, а мобильность позволяет использовать его в составе практически любой измерительной установки как с коллиматором, так и без него. При комплектации анализирующего узла преобразователями линейных перемещений становится возможным измерение опtotехнических характеристик объективов: фокусного расстояния, увеличения, заднего рабочего и фокального (вершинного) отрезков. В дальнейшем планируется реализация алгоритма «наклонной полуплоскости», известного по ISO 12233-2017 «Фотография. Электронная фотосъемка. Разрешение и пространственно-частотный отклик» и ISO 15529-2010 «Optics and photonics. Optical transfer function. Principles of measurement of modulation transfer function (MTF) of sampled imaging systems», позволяющего повысить дискретизацию измеряемой ФРК, что необходимо для измерения ФРЛ и ФПМ микрообъективов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение, Л.О., 1980. 208 с.
2. ОСТ 3-4046-85 «Объективы. Метод измерения функции передачи модуляции».
3. ISO 9335-2012 «Optics and photonics. Optical transfer function. Principles and procedures of measurement».
4. ОСТ ВЗ-4903-81 «Объективы для изделий общей техники. Методы определения концентрации энергии и функции рассеяния».
5. Кувалдин Э.В., Киргетов М.В., Леонов М.Б. Установка для измерения основных характеристик малогабаритных объективов // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 1. С. 94–99.
6. ImageMaster® Worldwide Leader in MTF Testing [Электронный ресурс]-URL:http://trioptics-usa.com/wp-content/uploads/ImageMaster_Prospekt_2013.pdf (дата обращения: 18.09.2018).
7. Осипович И.Р. Принципы построения автоматизированных средств контроля качества изображения оптических систем // Прикладная физика. 2009. № 3. С. 127–131.
8. Осипович И.Р. Измерение функции концентрации энергии объективов с помощью автоматизированных средств контроля качества изображения // Научно-технический журнал «Контенант». 2015. Т. 14. № 4. С. 74–77.
9. ОСТ 3-2635-82 «Устройства для измерения функции передачи модуляции съемочных объективов. Метод поверки».