

УДК 681.7.013.8

Особенности разработки анализирующего узла для измерения функции рассеяния линии и функции передачи модуляции оптических систем инфракрасного диапазона

© 2021 г. **М. Б. Леонов, канд. техн. наук; А. И. Губина***Филиал Корпорации «Комета» — Научно-проектный Центр оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург**E-mail: muxeu87@yandex.ru**Поступила в редакцию 12.03.2021*

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-07-41-48

Рассмотрены особенности разработки анализирующих узлов сканирующего типа с одноэлементным приемником излучения для измерения функций рассеяния линии и передачи модуляции оптических систем инфракрасного диапазона спектра с учетом требований ГОСТ Р 58566-2019 «Оптика и фотоника. Объективы для оптико-электронных систем. Методы испытаний». Предложены методики энергетического расчета и определения погрешности измерений функции передачи модуляции измерительной установки с анализирующим узлом сканирующего типа.

Ключевые слова: объективы, оптические измерения, функция рассеяния линии, коэффициент передачи модуляции, функция передачи модуляции.

Коды OCIS: 120.4630, 120.4800

Одной из наиболее важных характеристик качества объективов и оптических систем (ОС) является функция передачи модуляции (ФПМ). По сравнению с интерференционными методами, предназначенными для оценки качества в монохроматическом потоке излучения, измерение ФПМ позволяет оценить качество изображения ОС в широкой области спектра. Однако измерение ФПМ ОС инфракрасного (ИК) диапазона спектра является довольно длительной операцией из-за необходимости сбора большого объема информации при сканировании функции рассеяния линии (ФРЛ) и ее последующей математической обработки для получения ФПМ [1–3].

Измерительные установки зарубежного производства являются достаточно дорогостоящими, а их недостаточные мобильность и функциональность (например, для контро-

ля ОС с изломом оптической оси) применительно к задачам отечественного оптического приборостроения вызывают необходимость разработки специального оборудования для модернизации существующей стендовой базы отечественных предприятий оптической промышленности. Наиболее ответственным узлом установки для измерения ФРЛ и ФПМ (рис. 1), требующим модернизации, является анализирующий узел.

В основе функционирования анализирующего узла лежат измерение ФРЛ испытуемой ОС с последующим преобразованием Фурье для определения ФПМ с учетом поправок на конечные размеры измерительной и предметной (коллиматорной) диафрагм. Данный метод основан на измерении распределения относительной энергетической освещенности в изображении тест-объекта в плоскости

изображения испытуемой ОС. Анализирующие узлы с одноэлементным фотоприемным устройством (ФПУ) ИК диапазона (рис. 2а) активно используются как в установках зарубежного производства [4], так и отечественно. Анализирующие узлы с матричным фотоприемным устройством (МФПУ) ИК диапазона (рис. 2б) встречаются преимущественно в отечественном приборостроении [5].

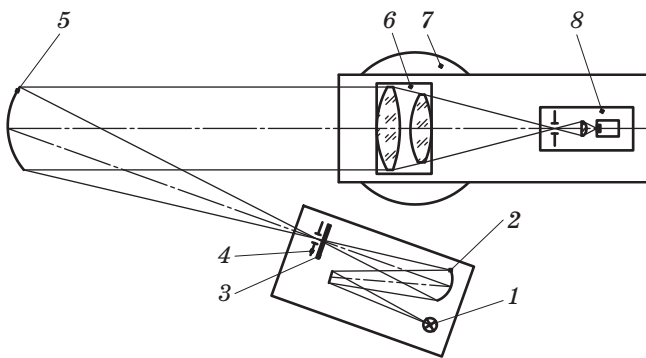


Рис. 1. Схема измерительной установки. 1 — источник излучения, 2 — конденсор, 3 — светофильтр, 4 — коллиматорная диафрагма, 5 — коллиматорный объектив, 6 — держатель изделия с испытуемой ОС, 7 — поворотное устройство, 8 — анализирующий узел.

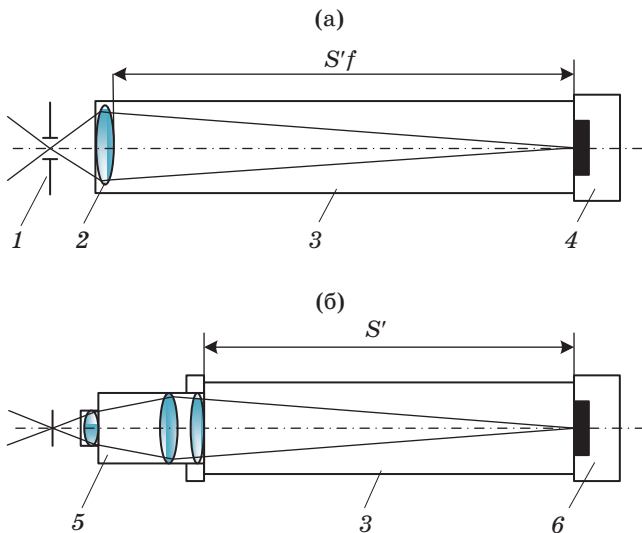


Рис. 2. Схемы исполнений анализирующего узла ИК диапазона с одноэлементным ФПУ (а) и с матричным ФПУ (б). 1 — измерительная диафрагма, 2 — проекционный объектив, 3 — тубус, 4 — одноэлементное ФПУ, 5 — ИК микрообъектив, 6 — матричное ФПУ. $S'f$ — задний фокальный отрезок проекционного объектива, S' — задний рабочий отрезок ИК микрообъектива.

Рассмотрим анализирующий узел на основе ИК МФПУ (рис. 2б). Современный уровень развития технологии изготовления ИК МФПУ позволяет получать минимальный размер пиксела $a_{\text{pix}} = 0,015$ мм, а для того чтобы корректно измерить ФРЛ и ФПМ требуется, чтобы на диаметр пятна рассеяния приходилось не менее 20 отсчетов ФРЛ [3]. Рассмотрим это условие на примере объектива — образца сравнения с фокусным расстоянием 200 мм и диаметром входного зрачка 100 мм. Диаметр дифракционного пятна рассеяния испытуемой ОС на длине волны излучения $\lambda = 8$ мкм составит $a' = 0,039$ мм. Шаг дискретизации ФРЛ должен быть минимум в 20 раз меньше диаметра дифракционного пятна рассеяния, т.е. $d_x \leq 0,002$ мм. При работе в ИК диапазоне спектра с использованием МФПУ в составе анализирующего узла для обеспечения такого шага дискретизации необходимо использовать микрообъектив для ИК диапазона спектра с увеличением, минимальное значение которого определяется по формуле

$$\beta = a_{\text{pix}}/(a'/20) \quad (1)$$

и составляет $\beta = 7,5^{\times}$.

Разработка (в том числе коррекция хроматических aberrаций), изготовление и контроль изображающих ИК микрообъективов с таким увеличением — достаточно трудоемкая задача, что в совокупности с недостатками ИК МФПУ (нелинейность световой характеристики, эффект перетекания заряда) приводит к повышению погрешности измерений практически в 2 раза [5] по сравнению с анализирующими узлами с одноэлементным ФПУ [2, 4]. Что касается контроля таких ИК микрообъективов, то необходимо с достаточно высокой точностью измерять его увеличение и характеристики качества (например ФПМ), которые должны соответствовать дифракционному пределу. Из преимуществ анализирующих узлов с ИК МФПУ можно выделить скорость измерений и отсутствие необходимости сканирования изображения.

Анализирующие узлы на основе одноэлементного ФПУ, в свою очередь, можно разделить на два подвида: с неизображающим проекционным объективом, переносящим поток излучения, прошедший через измерительную диафрагму, на фоточувствительную плоскость

ФПУ (рис. 2а), и без проекционного объектива, когда измерительная диафрагма стоит непосредственно перед ФПУ. Последние чаще всего применяются в неохлаждаемых одноэлементных ФПУ, среди недостатков которых можно выделить необходимость разделения на спектральные поддиапазоны в областях чувствительности ФПУ.

Современный уровень развития одноэлементных охлаждаемых ФПУ позволяет обеспечивать широкий спектральный диапазон от 2 до 14 мкм, например, ФПУ *Infrared Associates* МСТ-13-4.0, который имеет фоточувствительный слой из сплава кадмий-ртуть-теллур размером 4×4 мм с защитным окном из селенида цинка. Однако из-за расстояния между фоточувствительным слоем и защитным окном у таких ФПУ может возникнуть виньетирование пучка, что особенно будет проявляться при измерениях ОС по полю. Рассмотрим случай, когда числовая апертура испытуемой ОС составляет 0,6 (апертурный угол $u' \approx 36^\circ$), угловое поле — 20° , высота изображения предметной щелевой диафрагмы — $h'_k = 3$ мм, расстояние от измерительной диафрагмы до фоточувствительного слоя ФПУ — $m = 1,5$ мм. Рассчитаем высоту h_m и ширину w_m чувствительной площадки ФПУ, необходимые для измерения ФРЛ и ФПМ испытуемой ОС по полю в меридиональном сечении, соответственно по формулам

$$h_m \geq 1,5[h'_k + 2mtg(u')], \quad (2)$$

$$w_m \geq 3mtg(u' + \omega). \quad (3)$$

Полученные значения ширины и высоты составляют $h_m \geq 7,77$ мм, $w_m \geq 4,66$ мм.

При измерениях ФРЛ и ФПМ в сагиттальном сечении высоту h_s и ширину w_s чувствительной площадки ФПУ вычисляют по следующим формулам:

$$h_s \geq 3mtg(u'), \quad (4)$$

$$w_s \geq 1,5[h'_k + 2mtg(u' + \omega)]. \quad (5)$$

Полученные значения ширины и высоты составляют $h_s \geq 3,27$ мм, $w_s \geq 9,16$ мм.

По результатам такого расчета можно сделать вывод о необходимости использования проекционного объектива, устанавливаемого между измерительной щелевой диафрагмой и ФПУ.

Расчет проекционного объектива должен выполняться с условием, что числовая апертура проекционного объектива в пространстве предметов должна быть больше числовой апертуры испытуемой ОС в пространстве изображений более чем в 1,2 раза [3]. У испытуемой ОС с числовой апертурой в пространстве изображений не менее 0,6 числовая апертура проекционного объектива в пространстве предметов должна составлять не менее 0,72. Увеличение проекционного объектива должно быть выбрано таким образом, чтобы при известном размере измерительной диафрагмы не было бы виньетирования пучка, т.е. размер пятна рассеяния от диафрагмы максимального размера не должен превышать размеры фоточувствительной площадки ФПУ.

Ширина измерительной щелевой диафрагмы испытуемой ОС при дифракционном пятне рассеяния $a' = 0,039$ мм и $\lambda = 8$ мкм определяется по формуле

$$b_m \geq 0,1a' \quad (6)$$

и составляет $b_m \geq 0,004$ мм.

Однако ширина измерительной щелевой диафрагмы не должна быть меньше, чем минимальная длина волны рабочего спектрального диапазона, иначе возникающий в этом случае дифракционный эффект может оказать непредсказуемое влияние на результаты измерений [2]. Рекомендуется за номинальный размер измерительной щелевой диафрагмы принять значение не меньшее, чем минимальная длина волны в рабочем спектральном диапазоне, т.е. $b_m = 0,008$ мм в спектральном диапазоне от 8 до 14 мкм.

В связи с тем что при измерении ФРЛ испытуемой ОС результирующая функция будет представлять собой свертку истинной ФРЛ испытуемой ОС, а также функций пропускания измерительной и предметной диафрагм, то в результате преобразования Фурье этой ФРЛ будет получено произведение ФПМ испытуемой ОС и ФПМ измерительной и предметной диафрагм конечных размеров [2, 3]. Для коррекции ФПМ используются поправочные коэффициенты, учитывающие конечный размер изображения предметной b_d и измерительной b_m диафрагм, при условии, что функция пропускания щелевой диафрагмы имеет строго П-образную форму (форму δ -функции).

В связи с этим задаются жесткие допуски как на изготовление диафрагм, так и на их измерение.

Номинальный размер измерительной щелевой диафрагмы составляет $b_m = 0,008$ мм. Допуск на размер такой диафрагмы обычно задается не более $\pm 0,001$ мм. Рассмотрим случай, когда размер диафрагмы будет на пределе допуска, т.е. $b_m = 0,009$ мм, а максимальная пространственная частота составит $N = 30$ мм⁻¹, тогда значение поправочного коэффициента $\Pi(N)$ для измерительной диафрагмы, определяемого по формуле

$$\Pi(N) = (\pi N b_m) / \sin(\pi N b_m), \quad (7)$$

составит 1,13 отн. ед.

Принимая во внимание, что ширина геометрического изображения предметной диафрагмы в плоскости изображения испытуемой ОС также соответствует 0,009 мм, то поправочные коэффициенты равны, а их произведение составит $\Pi_{bd}(30)\Pi_{bm}(30) = 1,28$ отн. ед., что не превышает требований [3].

Щелевые диафрагмы изготавливаются методами химического травления или гравировки по непрозрачному слою металла толщиной менее 0,1 мм, нанесенного на оптические подложки из фтористого кальция или фтористого бария. При этом коэффициент пропускания слоя металла должен составлять не более 10^{-3} , а коэффициент спектрального пропускания диафрагмы должен быть не менее 0,92 на рабочей длине волны. Использование подложек из селенида цинка не рекомендуется, так как из-за большого показателя преломления и более низкого коэффициента пропускания возникнут переотражения, которые приведут к паразитной засветке ФПУ, что в свою очередь увеличит систематическую погрешность измерения ФПМ до 0,1 отн. ед.

Помимо диафрагм на подложках из оптических материалов используются и металлические диафрагмы, среди достоинств которых можно отметить отсутствие влияния коэффициента пропускания подложки на актиничный поток измерительной установки, а среди недостатков — возможный эффект «тоннеля»: из-за толщины слоя металла более 0,1 мм на гранях диафрагмы возникают переотражения, которые приводят к паразитным засветкам и повышению погрешности измерений ФПМ.

В связи с тем что ИК ФПУ имеют ограниченную чувствительность, целесообразно проводить энергетический расчет тракта, состоящего из коллиматорного стенда с фокальным узлом, испытуемой ОС и анализирующего узла. Для этих целей предлагается следующая методика, которая была разработана с учетом требований методики измерений энергетических величин оптических проекционных систем ИК диапазона (номер в реестре аттестованных методик ФР.1.37.2017.28021, номер свидетельства об аттестации 359-RA.RU.311243-2017).

1) Расчет облученности E_d и энергетического потока излучения Φ_d на предметной диафрагме (с учетом температуры источника излучения, коэффициента пропускания конденсора и фильтра, оптотехнических характеристик конденсора).

Облученность предметной диафрагмы вычисляется по формуле

$$E_d = \frac{A_{kd}}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} M(\lambda, T) \tau_{kd} \tau_{a_kd} \tau_f d\lambda, \quad (8)$$

где $A_{kd} = [S_{kd}(1 + \beta_{kd})^2] / [l_{kd}^2 \beta_{kd}^2]$ — геометрический фактор конденсора, $S_{kd} = 50$ см² — площадь входного зрачка конденсора, $\beta_{kd} = 0,5^\times$ — увеличение конденсора, $l_{kd} = 300$ мм — расстояние от источника излучения до предметной диафрагмы, $\tau_{kd} = \rho_1 \rho_2 = 0,92$ — коэффициент пропускания конденсора, $\rho_1 = 0,96$ — коэффициент отражения сферического зеркала конденсора, $\rho_2 = 0,96$ — коэффициент отражения плоского зеркала конденсора, $\tau_f = 0,9$ — коэффициент пропускания светофильтра, τ_{a_kd} — коэффициент пропускания атмосферного тракта конденсора, $\lambda_1 = 8$ мкм, $\lambda_2 = 14$ мкм — границы спектрального диапазона, в котором проводится энергетический расчет, $M(\lambda, T)$ — спектральная плотность энергетической светимости, рассчитываемая по формуле Планка.

Поток излучения предметной диафрагмы вычисляется по формуле

$$\Phi_d = E_d S_d, \quad (9)$$

где $S_d = 0,018$ см² — площадь предметной диафрагмы.

2) Расчет потока излучения Φ_{ent} и облученности E_{ent} входного зрачка испытуемой ОС.

Поток излучения на входном зрачке испытуемой ОС вычисляется по формуле

$$\Phi_{\text{ent}} = \Phi_d \tau_a \tau_k, \quad (10)$$

где Φ_d — поток излучения на предметной диафрагме, τ_a — коэффициент пропускания атмосферного тракта коллиматора, $\tau_k = \rho_1 \rho_2 = 0,92$ — коэффициент пропускания коллиматора, $\rho_1 = 0,96$ — коэффициент отражения сферического (или асферического) зеркала коллиматора, $\rho_2 = 0,96$ — коэффициент отражения плоского зеркала коллиматора.

Значение облученности входного зрачка рассчитывается по формуле

$$E_{\text{ent}} = \Phi_{\text{ent}}/S_k, \quad (11)$$

где $S_k = \pi(D_k)^2/4 = 177 \text{ см}^2$ — площадь входного зрачка коллиматора, $D_k = 150 \text{ мм}$ — диаметр входного зрачка коллиматора.

3) Расчет энергетического потока излучения в плоскости изображения испытуемой ОС (с учетом коэффициента пропускания испытуемой ОС).

Поток излучения Φ_1 , падающий на объектив, вычисляется по формуле

$$\Phi_1 = E_{\text{ent}} S_{\text{ent}}, \quad (12)$$

где $S_{\text{ent}} = 150 \text{ мм}$ — площадь входного зрачка объектива.

Поток излучения, приходящий в плоскость наилучшего изображения (ПНИ), вычисляется по формуле

$$\Phi_{\text{ВІР}} = \Phi_1 \tau_1, \quad (13)$$

где $\tau_1 = 0,8$ — коэффициент пропускания объектива.

4) В общем случае для определения потока излучения Φ_{det} , падающего на ФПУ, рассчитывают облученность ПНИ $E_{\text{ВІР}}$ и поток излучения Φ_m , прошедший через измерительную диафрагму.

Облученность ПНИ рассчитывается по формуле

$$E_{\text{ВІР}} = \frac{\Phi_{\text{ВІР}}}{S_{\text{ВІР}}}, \quad (14)$$

где $S_{\text{ВІР}} = S_d(f_1/f_k) = 1,8 \times 10^{-3} \text{ см}^2$ — площадь изображения предметной диафрагмы,

$f_1 = 200 \text{ мм}$ — фокусное расстояние испытуемой ОС (объектива), $f_k = 2000 \text{ мм}$ — фокусное расстояние коллиматора.

Значение потока излучения, прошедшего через измерительную диафрагму, рассчитывается по формуле

$$\Phi_m = E_{\text{ВІР}} S_m, \quad (15)$$

где S_m — площадь измерительной диафрагмы.

Энергетический поток излучения, падающий на ФПУ, вычисляется по формуле

$$\Phi_{\text{det}} = \Phi_m \tau_m \tau_l, \quad (16)$$

где $\tau_m = 1$ — коэффициент пропускания измерительной диафрагмы, $\tau_l = 0,85$ — коэффициент пропускания проекционного объектива.

Когда размеры изображения предметной диафрагмы в ПНИ и измерительной диафрагмы совпадают, поток излучения рассчитывается по формуле

$$\Phi_{\text{det}} = \Phi_{\text{ВІР}} \tau_m \tau_l. \quad (17)$$

5) Требования к ФПУ включают в себя требования к обнаружительной способности или обратной ей величине — порогу чувствительности. Поэтому необходимо сравнить поток излучения, приходящий на ФПУ, с порогом чувствительности. Паспортная удельная обнаружительная способность ФПУ D^* составляет $2 \times 10^{10} \text{ см Гц}^{1/2}/\text{Вт}$ на длине волны 12 мкм . В общем случае D^* рассчитывается по формуле [6]

$$D^* = \frac{1}{\Phi_{\text{det}}^*} = \frac{\sqrt{S_{\text{det}} \Delta \nu}}{\Phi_{\text{min}}^I}, \quad (18)$$

где Φ_{det}^* — удельная пороговая чувствительность ФПУ, $\text{Вт}/(\text{см Гц}^{1/2})$, S_{det} — площадь фоточувствительной области ФПУ, см^2 , $\Delta \nu$ — полоса пропускания частот, Гц , Φ_{min}^I — пороговая чувствительность (пороговый поток излучения) ФПУ, Вт .

Исходя из формулы (18) значение пороговой чувствительности ФПУ Φ_{min}^I источника, использовавшегося при калибровке ФПУ с температурой $T = 500 \text{ К}$, составит

$$\Phi_{\text{min}}^I = \frac{\sqrt{S_{\text{det}} \Delta \nu}}{D^*}. \quad (19)$$

Значение энергетической пороговой чувствительности Φ_{\min}^{II} для излучения рабочего источника с температурой $T = 1223$ К рассчитывается по формуле [7]

$$\Phi_{\min}^{\text{II}} = \frac{\Phi_{\min}^{\text{I}} \chi^{\text{I}}}{\chi^{\text{II}}}, \quad (20)$$

где $\chi^{\text{I}} = 0,653$ — коэффициент использования ФПУ излучения эталонного источника, $\chi^{\text{II}} = 0,302$ — коэффициент использования ФПУ излучения рабочего источника.

6) Результатом энергетического расчета является проверка условия, что поток излучения, падающий на ФПУ, должен превышать порог чувствительности не менее чем в тысячу раз ($\Phi_{\text{det}} > 1000 \Phi_{\min}^{\text{II}}$) при условии, что разрядность аналого-цифрового преобразователя измерительной установки составляет не менее 12 бит. Значения падающего потока излучения и энергетической пороговой чувствительности по формулам (17), (20) составили $\Phi_{\text{det}} = 1,3 \times 10^{-3}$ Вт и $\Phi_{\min}^{\text{II}} = 4,5 \times 10^{-10}$ Вт соответственно, что свидетельствует о правильности выбора компонентов измерительной установки.

В отличие от анализирующего узла с МФПУ с одноэлементным ФПУ требуется механическое устройство для сканирования. Одним из вариантов такого устройства является трехкоординатное сканирующее устройство (рис. 3) [2], состоящее из сборки трех комплектов моторизованных линейных трансляторов (МЛТ) с шаговыми двигателями (ШД) и преобразователями линейных перемещений (ПЛП). Использование МЛТ с ШД обеспечивает шаг сканирования (дискретизации) ФРЛ 0,001 мм с учетом дробления шага ШД за счет программируемых блоков управления ШД типа SMSD-1.5. Преобразователи линейных перемещений ЛИР (см. рис. 3) регистрируют координаты перемещения линейных трансляторов с дискретностью 0,0001 мм и погрешностью не более $\pm 0,0005$ мм.

Проведение юстировки анализирующего узла предполагает совмещение центров измерительной диафрагмы и фоточувствительной площадки ФПУ с оптической осью проекционного объектива, при этом все излучение, прошедшее через измерительную диафрагму должно фокусироваться на фоточувствительной площадке ФПУ. В общем случае в про-

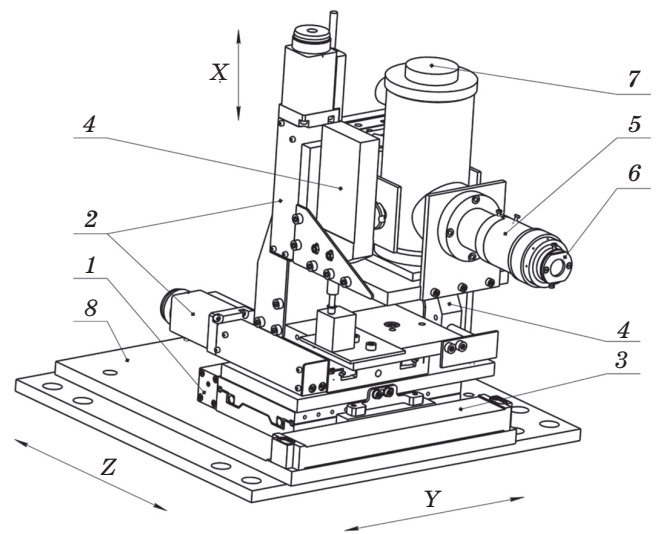


Рис. 3. Анализирующий узел на ТСУ. 1 — МЛТ 8MT167-100, 2 — МЛТ 8MT167-25LS, 3 — ПЛП ЛИР-7М, 4 — ПЛП ЛИР-15, 5 — тубус с проекционным объективом, 6 — измерительная диафрагма, 7 — ФПУ МСТ-13-4.0, 8 — основание.

цессе юстировки выполняют перемещение проекционного объектива до получения максимального сигнала на выходе ФПУ, затем выполняют поперечное перемещение с помощью регулировочных винтов.

Рассмотрим источники погрешностей измерения ФПМ.

1) Погрешность определения ширины предметной и измерительной диафрагм, что приводит к ошибке в вычислениях поправочных коэффициентов Π_{bd} и Π_{bm} , а следовательно, и ФПМ.

2) Погрешность измерения фокусных расстояний коллиматорного объектива и испытуемой ОС, зависящая от конкретного метода измерений (метод увеличения, угломерный метод и его вариации) и состава средств измерений для его реализации.

3) Нелинейность световой характеристики ФПУ является систематической погрешностью.

4) Погрешность измерения шага сканирования или пропуск шагов может приводить к уширению ФРЛ и соответственно к снижению значений ФПМ.

Рассмотренные погрешности имеют достаточно объемный алгоритм расчета и планируются для рассмотрения в формате отдельной публикации.

Кроме расчета влияния источников погрешности на суммарную погрешность допускается определять погрешность измерений ФПМ опытным путем. Для этого проводятся измерения ФПМ объектива — образца сравнения простой конструкции (при которых погрешностями его изготовления и сборки можно пренебречь) и полученные результаты сравниваются с расчетными значениями ФПМ. Подобный метод для видимого диапазона с допустимой погрешностью измерения ФПМ спектра, не превышающей $\pm 0,06$ отн. ед., рассмотрен в публикациях [1, 7]. Такая высокая погрешность обусловлена использованием метода гармонического анализа [1], который длительное время использовался для измерения ФПМ в отечественной оптической промышленности. Существует методика поверки [8] с использованием эталонного объектива (рабочего эталона единицы коэффициента передачи модуляции объективов), обеспечивающая пределы допускаемой погрешности измерений $\pm 0,08$ отн. ед. Обработка результатов осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения», а такая высокая погрешность, несмотря на использование современных стандартизированных методов измерений в соответствии со стандартом [3], обусловлена наличием в расчете неисключенной систематической погрешности (НСП) эталонного объектива, равной половине расширенной неопределенности расчета ФПМ эталонного объектива, т.е. по сути — погрешности расчета ФПМ в ZEMAX или другом программном обеспечении для расчета оптики. Зарубежные разработчики измерительных установок, в свою очередь, заявляют о том, что погрешность измерений ФПМ не превышает $\pm 0,02$ отн. ед. [4]. В связи с изложенным выше на основе публикаций [1, 7–9] предлагается следующая методика определения погрешности ФПМ.

1) Среднее квадратическое отклонение (СКО) измерения ФПМ объектива — образца сравнения (фокусное расстояние 200 мм, относительное отверстие 1:2, $\lambda = 8\text{--}14$ мкм) по 10 измерениям составляет $S_{T(N)} = 0,01$ отн. ед.

2) Зная актиничный поток измерительной установки (нормированное произведение спектральных характеристик источника, приемника, светофильтра, подложки измеритель-

ной диафрагмы), выполняется расчет ФПМ объектива — образца сравнения в ZEMAX или другом программном обеспечении для расчета оптики. На рис. 4 представлены графики расчетной и измеренной ФПМ (усредненной по 10 измерениям).

Неисключенная систематическая погрешность измерения ФПМ соответствует усредненной разнице измеренного и расчетного значений ФПМ и составляет $\theta = 0,02$ отн. ед.

3) СКО среднего арифметического измерений ФПМ

$$S_x = S_{T(N)} / \sqrt{n} = 0,01 / \sqrt{10} = 0,003 \text{ отн. ед.}$$

4) Значение доверительной границы случайной погрешности измерения ФПМ по 10 измерениям при доверительной вероятности 0,95 и значении коэффициента Стьюдента $t = 2,262$ составляет

$$\varepsilon = tS_x = 2,262 \times 0,003 = 0,007 \text{ отн. ед.}$$

5) СКО НСП измерений ФПМ

$$S_0 = \theta / \sqrt{3} = 0,02 / \sqrt{3} = 0,012 \text{ отн. ед.}$$

6) Коэффициент K [9], требуемый для расчета абсолютной погрешности измерения ФПМ,

$$K = (\varepsilon + \theta) / (S_x + S_0) = (0,007 + 0,02) / (0,003 + 0,012) = 1,8.$$

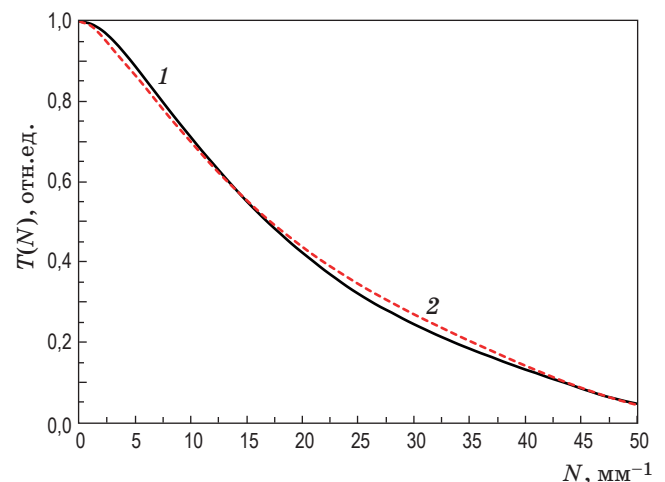


Рис. 4. Сравнение расчетной (1) и измеренной (2) ФПМ ИК объектива — образца сравнения в спектральном диапазоне 8–14 мкм.

7) Суммарное СКО измерения ФПМ

$$S_{\Sigma} = (S_{\theta})^2 + (S_x)^2 = \\ = 0,0122 + 0,0032 = 0,012 \text{ отн. ед.}$$

8) Абсолютная погрешность измерения ФПМ

$$\Delta T(N) = K S_{\Sigma} = 1,8 \times 0,012 = 0,022 \text{ отн. ед.}$$

Как видно из полученных результатов, значение абсолютной погрешности значительно меньше, чем по рассмотренным выше методикам. Сравнивая с результатами определения погрешности зарубежных аналогов следует отметить, что публикуемое значение $\pm 0,02$ отн. ед. соответствует усредненной разнице измеренного и расчетного значений ФПМ, т.е. НСП, которая в случае рассматри-

ваемой измерительной установки составляет $\theta = \pm 0,02$ отн. ед.

По результатам рассмотрения особенностей разработки анализирующих узлов сканирующего типа с одноэлементным приемником излучения для измерения ФРЛ и ФПМ оптических систем ИК диапазона предложены методики энергетического расчета и определения погрешности измерений ФПМ измерительной установки с анализирующим узлом, мобильность которого позволяет устанавливать его практически на любой стенд с зеркальным коллиматором. В связи с этим разработка может быть использована для модернизации существующей стендовой базы отечественных предприятий оптической промышленности с целью обеспечения измерений ФПМ с погрешностью измерений, не превышающей зарубежные аналоги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шульман М.Я. Измерение передаточных функций оптических систем. Л.: Машиностроение, Л.О., 1980. 208 с.
2. Леонов М.Б., Куприянов И.А., Серегин Д.А. и др. Аппаратно-программный комплекс для измерения характеристик качества оптических систем инфракрасного диапазона спектра // Оптический журнал. 2019. Т. 86. № 7. С. 74–78.
3. ГОСТ Р 58566-2019 «Оптика и фотоника. Объективы для оптикоэлектронных систем. Методы испытаний». 2019. 32 с.
4. Lengwenus A., Erichsen P. MTF measurement of infrared optical systems // Proc. SPIE. 2009. V. 7481. Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications VI.
5. Васильева Е.Ю., Горшков В.А., Чурилин В.А. Многоспектральная установка на базе внеосевого зеркального коллиматора для контроля качества оптических систем // Научно-технический журнал «Контентант». 2015. Т. 14. № 1. С. 82–85.
6. Ишанин Г.Г., Панков Э.Д., Андреев А.Л., Польщиков Г.В. Источники и приемники излучения: уч. пособ. для вузов. СПб.: Политехника, 1991. 240 с.
7. ОСТ 3-2635-82 «Устройства для измерения ФПМ съёмочных объективов. Метод поверки».
8. Устройство для измерений коэффициента передачи модуляции (скамья оптическая ОС-2000ВД). Методика поверки МП 085.М44-18 [Электронный ресурс]-URL: <https://fgis.gost.ru/fundmetrology/registry/4/items/666983> (дата обращения: 24.02.2021)
9. ГОСТ Р 8.736-2011 «Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения».