

АНАЛИЗ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ФОКУСНОГО РАССТОЯНИЯ ИК-ОБЪЕКТИВОВ ГОНИОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Н.Н. Кулакова¹

nnkulakova@gmail.com

С.Б. Каледин^{1,2}

sbkaledin@mail.ru

В.Н. Сазонов³

SAVA5491@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

² Институт геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН, Москва, Российская Федерация

³ Красногорский завод им. С.А. Зверева, г. Красногорск, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Проанализированы погрешности измерения фокусного расстояния гониометрическим методом на заводской установке. Приведены схема установки, методика измерения фокусного расстояния ИК-объективов, формула для вычисления погрешности фокусного расстояния на установке и график зависимости погрешности измерения фокусного расстояния объектива от угла поворота, позволяющий определять углы поворота объективов и измерять фокусные расстояния с заданной точностью в диапазоне фокусных расстояний $f' = 10 \dots 1000$ мм. Выявлены погрешности электронного тракта и наведения центра сканирующей щели на центр пятна рассеяния исследуемого объектива. Представлены зависимости коэффициента пропускания сканирующей щели от пространственных частот, функция распределения амплитуды излучения в плоскости изображения диафрагмы с круглым отверстием и функция распределения амплитуды излучения, прошедшего сканирующую щель. Приведены графики зависимости амплитуды излучения в плоскости изображения диафрагмы с круглым отверстием и распределения амплитуды излучения, прошедшего сканирующую щель. Показано, что сканирующая щель не изменяет амплитуды синусоидальных составляющих излучения в плоскости изображения. Вычислен минимальный поток излучения, который способен вызвать реакцию фотоприемного устройства

Ключевые слова

Объектив, фокусное расстояние, погрешность, коэффициент пропускания, поток излучения, диаметр пятна рассеяния, фотоприемное устройство, амплитуда излучения, инфракрасное излучение, чувствительность фотоприемного устройства, сканирующая щель

Поступила в редакцию 28.11.2016

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017

В настоящее время большое внимание уделяется разработке высококачественных тепловизоров, позволяющих решать проблему обнаружения и распознавания объектов ночью в условиях ограниченной видимости вплоть до полной темноты на больших расстояниях независимо от погодных условий. В тепловизорах применяются специально рассчитанные объективы для инфракрасного

(ИК) излучения. Это сложные оптические приборы, включающие в себя набор линз и зеркал, выполненных из дорогостоящих материалов: кремния, германия и специальных ИК-стекол. Опыт создания тепловизоров показал, что для идентификации объектов существенное значение имеют размер объекта, разрешение матрицы и фокусное расстояние объектива. Кроме того, соответствие измеренного фокусного расстояния расчетному в значительной степени характеризует как правильность центрирования деталей, так и качество сборки объектива. Значение фокусного расстояния необходимо для определения диаметра дифракционного кружка Эри и углового поля объектива. Фокусное расстояние оптической системы определяет масштаб изображения, является одной из основных ее характеристик. Современное производство ИК-объективов требует измерения фокусного расстояния с высокой точностью — погрешность 0,5...1 %, поэтому определение фокусного расстояния с указанной погрешностью — это актуальная задача. Существует множество методов контроля фокусного расстояния объективов. Одним из высокоточных методов является гониометрический [1]. Метод реализуется на гониометре и пригоден для измерения фокусных расстояний объективов, работающих в ИК-области излучения.

На ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» разработана установка для контроля фокусных расстояний ИК-объективов, реализующая модернизированный гониометрический метод (рис. 1). В качестве источника излучения в

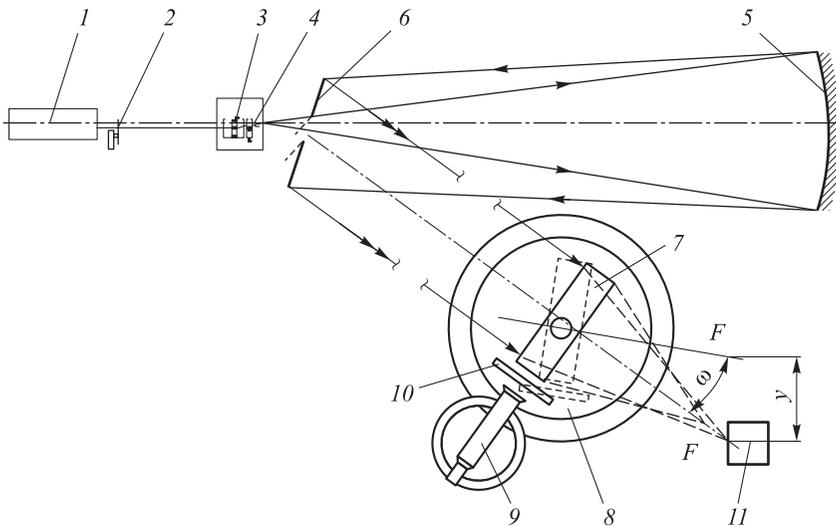


Рис. 1. Схема установки для контроля фокусного расстояния ИК-объективов

установке используется CO_2 -лазер с СВЧ накачкой и регулируемой мощностью от 0 до 10 Вт, длина волны излучения $\lambda = 10,6$ мкм, угловая расходимость 4 мрад. Метод основан на измерении линейных перемещений изображения y (см. рис. 1) бесконечно удаленного точечного источника излучения исследуемым объективом. Смещение изображения получают в результате поворота

объектива на угол ω в устройстве, где вертикальная ось вращения держателя объектива совмещена с его узловой точкой. Искомое фокусное расстояние f' определяется по формуле [2]

$$f' = \frac{y}{\operatorname{tg}\omega}. \quad (1)$$

Цель работы — определение зависимости погрешности измерения фокусных расстояний $\sigma_{f'}$ на установке от углов поворота ω исследуемых объективов для диапазона фокусных расстояний $f' = 10 \dots 1000$ мм. Полученные зависимости должны быть использованы для определения углов поворотов объективов ω , которые позволят измерить фокусные расстояния с заданной точностью — погрешность $0,5 \dots 1$ %.

Методика измерения фокусного расстояния на заводской установке (см. рис. 1) заключается в следующем: излучение от лазера 1 проходит модулятор 2 и конденсор 3, попадает на диафрагму с круглым отверстием 4 диаметром 0,2 мм. Диафрагма находится в фокальной плоскости коллиматора, состоящего из сферического 5 и плоского 6 зеркал. Параллельный пучок лучей после коллиматора поступает во входной зрачок исследуемого объектива 7, который устанавливается на специальное поворотное устройство 8. Для определения угловых поворотов объектива используется автоколлимационный теодолит 9 на отдельном основании и плоское зеркало 10, установленное на поворотном устройстве 8 перпендикулярно оптической оси теодолита. Измерение положения изображения точечной диафрагмы определяется в плоскости наилучшего изображения (ПНИ), в которой сосредоточен максимум энергии в наименьшем размере изображения диафрагмы. Измерение проводится с помощью сканирующей щели, расположенной на фотоприемном устройстве (ФПУ) 11, которое может перемещаться по трем координатным осям. Положение максимальной энергии в пятне рассеяния изображения точечной диафрагмы определяется путем сканирования его щелью. Для измерения фокусного расстояния исследуемый объектив поворачивают на угол ω , на этот же угол поворачивается зеркало 10. Значение этого угла определяют с помощью автоколлимационного теодолита 9. Поворот исследуемого объектива приводит к смещению y пятна рассеяния в ПНИ. Для фиксации этого смещения ФПУ перемещают до совмещения центра сканирующей щели с максимумом энергии в пятне рассеяния. Это положение фиксируют по максимальному сигналу, вырабатываемому на выходе ФПУ. Модулированный поток излучения позволяет применить в электронной схеме усилитель переменного тока, который стабилен в работе и обеспечивает линейное усиление сигнала, что в значительной степени положительно влияет на точность измерения. Модуляция должна быть 100 %-ной, чтобы обеспечить максимальную амплитуду изменения потока излучения.

Найдем зависимость коэффициента пропускания сканирующей щели от пространственных частот синусоидальных составляющих излучения в приведенной установке. Функция распределения амплитуды излучения в плоскости

изображения диафрагмы с круглым отверстием через систему коллиматор–исследуемый объектив [2, 3]

$$A_d(x, y) = \beta \operatorname{circ} \left(\frac{r}{d} \right) = \begin{cases} 1, & r^2 \leq d^2; \\ 0, & r^2 > d^2; \\ r^2 = x^2 + y^2, \end{cases} \quad (2)$$

где d — радиус отверстия диафрагмы; β — увеличение системы коллиматор–исследуемый объектив.

Коэффициент пропускания сканирующей щели [2]

$$\tau(x) = \operatorname{rect} \left(\frac{x}{b} \right) = \begin{cases} 1, & x \leq \frac{b}{2}; \\ 0, & x > \frac{b}{2}, \end{cases} \quad (3)$$

где b — ширина щели.

Функция распределения амплитуды излучения, прошедшего сканирующую щель и вызвавшего реакцию ФПУ, для одномерного случая может быть представлена в виде свертки двух функций (2) и (3) [3, 4]:

$$A(x) = A_d \otimes \tau. \quad (4)$$

Используя формулу Фурье образов свертки [3, 4], получаем

$$\tilde{A}(v_x) = \tilde{A}_d(v_x) \cdot \tilde{\tau}(v_x) = \beta \cdot b e \sin c(2\pi v_x d) \cdot \sin c(b\pi v_x). \quad (5)$$

Значения частот в первых нулях функций $\tilde{A}_d(v_x)$ и $\tilde{\tau}(v_x)$ вычисляются по формулам:

$$v_x = \frac{3,83}{2\pi v_x d} \quad (6)$$

— для функции $\tilde{A}_d(v_x)$;

$$v_x = \frac{2\pi}{b} \quad (7)$$

— для функции $\tilde{\tau}(v_x)$.

Ширина сканирующей щели $b = 5$ мкм, диаметр диафрагмы $d = 0,2$ мм, фокусное расстояние коллиматора $f'_{\text{кол}} = 4000$ мм, максимальное фокусное расстояние исследуемого объектива $f'_{\text{об}} = 1000$ мм. Увеличение системы коллиматор–исследуемый объектив $\beta = \frac{f'_{\text{об}}}{f'_{\text{кол}}} = \frac{1}{4}$. Первые нули функций $\tilde{A}_d(v_x)$ и $\tilde{\tau}(v_x)$ соответственно приходятся на частоты $v_x = 12$ и 1256 мм^{-1} . Графики функций $\tilde{A}_d(v_x)$ и $\tilde{\tau}(v_x)$ приведены на рис. 2 до первых нулевых значений.

Как следует из рис. 2, амплитуды составляющих излучения $\tilde{A}_d(v_x)$, прошедших через сканирующую щель, незначительно уменьшаются.

Коэффициент ослабления на частоте $v_x = 12 \text{ мм}^{-1}$ вычисляется по формуле [3–5]

$$\tilde{\tau}_{\min} = \frac{1}{b} \frac{\sin(b\pi v_x)}{b\pi v_x}. \quad (8)$$

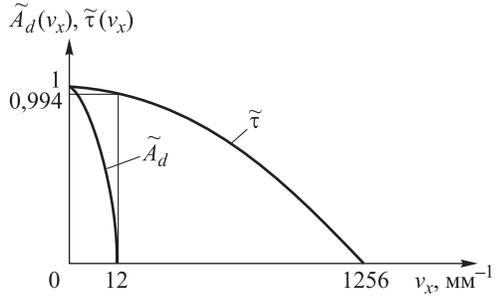


Рис. 2. Графики функций $\tilde{A}_d(v_x)$ и $\tilde{\tau}(v_x)$ до первых нулевых значений

Для рассматриваемой установки этот коэффициент имеет значение $\tilde{\tau}_{\min} = 0,994$.

Анализ приведенных расчетов $\tilde{\tau}_{\min}$ показал, что сканирующая щель практически не изменяет амплитуды синусоидальных составляющих излучения, которое выходит из системы коллиматор–исследуемый объектив.

Вычислим минимальный поток Φ_{\min} излучения, который способен вызвать реакцию ФПУ установки при следующих значениях его параметров: отношение сигнал/шум $\mu_0 = 600$, максимальное напряжение на выходе $U_{\max} = 4 \text{ В}$, чувствительность $S = 1200 \text{ В/Вт}$. Тогда Φ_{\min} ФПУ вычисляется по следующей формуле [6]:

$$\Phi_{\min} = \frac{U_{\min}}{S}, \quad (9)$$

где U_{\min} — минимальное напряжение, которое необходимо для надежного обнаружения сигнала на ФПУ. Чтобы погрешность, связанная с обработкой сигнала, не превышала 1 %, примем $U_{\min} = 100U_{\text{шум}} = 100 \frac{U_{\max}}{\mu_0}$; $U_{\text{шум}} = 7 \text{ мВ}$. Тогда, согласно

формуле (9), $\Phi_{\min} = \frac{100U_{\text{так}}}{\mu_0 S} = 5,8 \cdot 10^{-4} \text{ Вт}$.

Вычислим значение реального потока излучения, приходящего на ФПУ. Сравним его с минимальным потоком Φ_{\min} излучения, который способен вызвать реакцию ФПУ. Примем, что от лазерного источника излучения на вход конденсора поступает равномерный поток излучения мощностью 20 % максимальной паспортной мощности лазера. Максимальная мощность лазера в установке $\Phi = 10 \text{ Вт}$, следовательно, на вход конденсора поступает $\Phi_{\text{лазер}} = 2 \text{ Вт}$. Поток излучения на выходе из конденсора рассчитывается по формуле [6]

$$\Phi_{\text{конд}} = \Phi_{\text{лазер}} \tau_{\text{конд}}; \quad (10)$$

где $\tau_{\text{конд}}$ — коэффициент пропускания конденсора. В рассматриваемой установке конденсором является одиночная линза из фтористого бария (BaF_2) с показателем преломления $n_{\text{конд}} = 1,45$ для длины волны лазерного излучения

$\lambda = 10,6$ мкм, толщина линзы 10 мм. Коэффициент пропускания линзы конденсора вычисляется по формуле [7]

$$\tau_{\text{конд}} = (1 - \rho)^2 (1 - \alpha), \quad (11)$$

где ρ и α — коэффициенты отражения и поглощения линзы, которые имеют следующие значения: $\rho = 0,034$, $\alpha = 0,01$. Таким образом, коэффициент пропускания конденсора $\tau_{\text{конд}} = 0,92$. Из формулы (10) получим $\Phi_{\text{конд}} = 2 \cdot 0,92 = 1,8$ Вт. Поток излучения, выходящий из исследуемого объектива, вычислим по формуле [8]

$$\Phi_{\text{об}} = \Phi_{\text{конд}} \rho_1 \rho_2 \frac{D_{\text{об}}^2}{D_{\text{кол}}^2} \tau_{\text{об}}, \quad (12)$$

где ρ_1 — коэффициент отражения сферического зеркала коллиматора; ρ_2 — коэффициент отражения плоского зеркала коллиматора; $D_{\text{кол}}$ — диаметр выходного зрачка коллиматора; $D_{\text{об}}$ — диаметр входного зрачка исследуемого объектива; $\tau_{\text{об}}$ — коэффициент пропускания исследуемого объектива. В рассматриваемой установке $\rho_1 = \rho_2 = 0,85$, $D_{\text{кол}} = 200$ мм. Для расчета потока излучения, выходящего из исследуемого объектива, возьмем $D_{\text{об}} = 50$ мм и $\tau_{\text{об}} = 0,5$. Используя формулу (12), получаем

$$\Phi_{\text{об}} = 1,932 \cdot 0,85^2 \cdot \frac{50^2}{200^2} \cdot 0,5 = 0,04 \text{ Вт.}$$

Реальный поток излучения, приходящий на ФПУ, вычисляется по формуле

$$\Phi_{\text{ФПУ}} = \Phi_{\text{об}} \frac{Q_1}{Q_2}, \quad (13)$$

где Q_1 — площадь засвеченного участка сканирующей щели шириной b ; Q_2 — площадь изображения диафрагмы с круглым отверстием диаметром d системы коллиматор–исследуемый объектив. При $b = 5$ мкм, $d = 0,2$ мм, $\beta = 0,25$ получим следующие значения площадей: $Q_1 = b d \beta = 250$ мкм²; $Q_2 = \pi \frac{d^2}{4} = 1962$ мкм². Тогда, согласно формуле (13), поток излучения, приходящий на ФПУ, $\Phi_{\text{ФПУ}} = 2,66$ мВт; напряжения на выходе ФПУ [8] $U_{\text{ФПУ}} = S \Phi_{\text{ФПУ}} = 3,19$ В.

На основании приведенного энергетического расчета отметим, что реальный поток, приходящий на ФПУ заводской установки, способен вызвать напряжение, превышающее шумовое напряжение $U_{\text{шум}} = 7$ мВ в 500 раз и в 5 раз требуемое минимальное значение напряжения $U_{\text{min}} = 0,7$ В. Поэтому погрешностью электронного тракта при измерении фокусного расстояния можно пренебречь [9].

Определим погрешность наведения центра сканирующей щели на центр пятна рассеяния исследуемого объектива. Относительное отверстие K исследуемых объективов принимает значения в диапазоне от 1:1 до 1:20. Диаметр пятна рассеяния исследуемого объектива вычисляется по формуле [10, 11]

$$d_o = 2,44\lambda \frac{D_{об}}{f'_{об}}, \tag{15}$$

где $D_{об}$ — диаметр входного зрачка исследуемого объектива; $f'_{об}$ — фокусное расстояние исследуемого объектива. Согласно формуле (15), d_o принимает значения в диапазоне от 26 до 517 мкм. Поскольку пятно рассеяния превышает более чем в 5 раз размер сканирующей щели ($b = 5$ мкм), то погрешность наведения центра щели на центр пятна будет определяться шагом перемещения щели. Для заводской установки эта погрешность составляет $\sigma_{скан} = \pm 1$ мкм. Поскольку угол поворота на установке при измерении фокусного расстояния не превышает 1° , примем что $\text{tg}(\omega) = \sin(\omega) = \omega$ [5]. Из приведенных расчетов следует, что погрешность измерения фокусного расстояния $\sigma_{f'}$ зависит от погрешности наведения щели на центр пятна рассеяния $\sigma_{скан} = \pm 0,001$ мм и погрешности измерения угла поворота объектива теодолитом $\sigma_\omega = 2'' = 9,7 \cdot 10^{-7}$ рад. Погрешность измерения фокусного расстояния гониометрическим способом на заводской установке вычисляется по формуле [1]

$$\sigma_{f'} = \frac{y}{\omega} \sqrt{\left(\frac{\sigma_{скан}}{y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\omega}{\omega}\right)^2}, \tag{16}$$

где y и ω — ожидаемые значения измеряемых параметров. Графическое представление зависимости $\sigma_{f'} = f(\omega)$ приведено на рис. 3 для фокусных расстояний измеряемых объективов 10, 100 и 1000 мм.

Приведенные зависимости позволяют определить углы поворота объективов и измерить фокусные расстояния с заданной точностью — погрешность 0,5...1 %. Как следует из графиков, измерение фокусных расстояний с погрешностью $\sigma_{f'} \leq 1\%$ обеспечивают углы поворота $\omega_1 \geq 1^\circ 43'$, $\omega_2 \geq 10,84'$ и $\omega_3 \geq 3,4'$ соответственно для фокусных расстояний $f'_1 = 10$ мм, $f'_2 = 100$ мм и $f'_3 = 1000$ мм. Влияние полевых aberrаций на

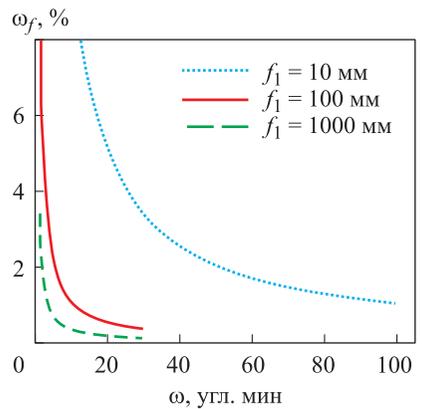


Рис. 3. График зависимости погрешности измерения фокусного расстояния объектива от угла поворота

точность измерений можно оценить по приближенной формуле $\Delta f' = \frac{f' \omega^2}{2}$.

Эта погрешность обусловлена кривизной поверхности изображения. При значениях $f' = 10...1000$ мм и $\omega = 1^\circ 43'...3,4'$ $\Delta f'$ не превышает 0,05 % номинального значения f' . Таким образом, проведенный анализ возможных погрешностей, вносимых полевыми аберрациями, не оказывает влияние на точность измерения из-за малых значений углов ω .

Заключение. Получены зависимости погрешности измерения фокусного расстояния $\sigma_{f'}$ от угла поворота ω исследуемого объектива на заводской установке для измерения фокусного расстояния. Эти зависимости позволяют определить значения углов поворота объектива, при которых погрешность измерений фокусного расстояния составляет 0,5...1 %. Кроме того, использование полученных зависимостей существенно ускорит процесс измерения фокусного расстояния ИК-объективов в заводских условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кривовяз Л.М., Пуряев Д.Т., Знаменская М.А. Практика оптической измерительной лаборатории. М.: Машиностроение, 2004. 333 с.
2. Креопалова Г.В., Пуряев Д.Т. Исследование и контроль оптических систем. М.: Машиностроение, 1978. 223 с.
3. Креопалова Г.В., Лазарева Н.Л., Пуряев Д.Т. Оптические измерения. М.: Машиностроение, 1987. 264 с.
4. Мосягин Г.М., Немтинов В.Б., Лебедев Е.Н. Теория оптико-электронных систем. М.: Машиностроение, 1990. 431 с.
5. Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. СПб.: Лань, 2008. 448 с.
6. Якушенков Ю.Г., ред. Проектирование оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2000. 488 с.
7. Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика / пер. с нем. Р.Е. Ильинского. М.: Техносфера, 2006. 424 с.
8. Якушенков Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 568 с.
9. Коротаев В.В. Расчет шумовой погрешности оптико-электронных приборов. СПб.: ИТМО, 2012. 46 с.
10. Андреев А.Н., Гаврилов Е.В., Кирилловский В.К. и др. Оптические измерения. М.: ЛОГОС, 2008. 416 с.
11. Кирилловский В.К. Оптические измерения. Теория чувствительности оптических измерительных наводок. Роль оптического изображения. СПб.: ИТМО, 2003. 67 с.

Кулакова Надежда Николаевна — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Каледин Сергей Борисович — канд. техн. наук, доцент кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1); старший научный сотрудник Института геохимии и аналитической химии имени В.И. Вернадского РАН (Российская Федерация, 119991, Москва, ул. Косыгина, д. 19).

Сазонов Вячеслав Николаевич — инженер-исследователь отдела ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» (Российская Федерация, 143400, Московская обл., г. Красногорск, Речная ул., д. 8).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Кулакова Н.Н., Каледин С.Б., Сазонов В.Н. Анализ погрешностей измерения фокусного расстояния ИК-объективов гониометрическим методом // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2017. № 4. С. 17–26. DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-17-26

ERROR ANALYSIS OF IR LENS FOCAL LENGTH MEASURED BY A GONIOMETRIC METHOD

N.N. Kulakova¹

nnkulakova@gmail.com

S.B. Kaledin^{1,2}

sbkaledin@mail.ru

V.N. Sazonov³

SAVA5491@yandex.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² V.I. Vernadskiy Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

³ JSC Krasnogorsky Zavod (KMZ ZENIT), Krashogorsk, Moscow Region, Russian Federation

Abstract

The purpose of this work was to analyze the errors in measuring the focal length by the goniometric method at the factory plant. In this research we give an installation diagram, as well as the methods for measuring the IR lens focal length on it. We found a formula for calculating the focal length error at the installation and built a graph showing the dependency of the lens focal length error on the angle of rotation, which makes it possible to determine the lenses' angles of rotation and to measure the focal lengths with a given accuracy in the range of focal lengths $f' = 10...1000$ mhm. We identified the errors in the electron path and in pointing the center of the scanning slit at the center of the scattered spot of the investigated lens. We showed the dependences of the scanning slit transmittance on the spatial frequencies, as well as the distribution function of the radiation amplitude in the image plane of the diaphragm with a circular aperture, and the distribution function of the amplitude of the radiation passing through the scanning slit. Furthermore, we built graphs of the radiation amplitude dependency in the image plane of the diaphragm with a circular aperture and the distribution of the amplitude of the radiation passing through the scanning slit. Findings of the research show that the scanning slit does not change the amplitude of the sinusoidal radiation components in the image plane. Finally, we calculated the minimum radiation flux, which is capable of causing a reaction of the photodetector

Keywords

Lens, focal length, error, transmittance, radiation flux, diameter of the scattering spot, photodetector, radiation amplitude, infrared radiation, photodetector sensitivity, scanning slit

REFERENCES

- [1] Krivovyyaz L.M., Puryaev D.T., Znamenskaya M.A. Praktika opticheskoy izmeritel'noy laboratorii [Experience of optical measuring laboratory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 333 p.
- [2] Kreopalova G.V., Puryaev D.T. Issledovanie i kontrol' opticheskikh system [Optical systems research and control]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 223 p.
- [3] Kreopalova G.V., Lazareva N.L., Puryaev D.T. Opticheskie izmereniya [Optical measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 264 p.
- [4] Mosyagin G.M., Nemtinov V.B., Lebedev E.N. Teoriya optiko-elektronnykh system [Optoelectronic system theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 431 p.
- [5] Zakaznov N.P., Kiryushin S.I., Kuzichev V.I. Teoriya opticheskikh system [Optical systems theory]. Sankt-Petersburg, Lan' Publ., 2008. 448 p.
- [6] Yakushenkov Yu.G., ed. Proektirovanie optiko-elektronnykh priborov [Designing optoelectronic devices]. Moscow, Logos Publ., 2000. 488 p.
- [7] Schröder G., Treiber H. Technische Optik (Russ. ed.: Tekhnicheskaya optika. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2006. 424 p.).
- [8] Yakushenkov Yu.G. Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov [Optoelectronic devices theory and calculation]. Moscow, Logos Publ., 2004. 568 p.
- [9] Korotaev V.V. Raschet shumovoy pogreshnosti optiko-elektronnykh priborov [Noise error calculation of optoelectronic devices]. Sankt-Petersburg, ITMO Publ., 2012. 46 p.
- [10] Andreev A.N., Gavrilov E.V., Kirillovskiy V.K., et al. Opticheskie izmereniya [Optical measurements]. Moscow, Logos Publ., 2008. 416 p.
- [11] Kirillovskiy V.K. Opticheskie izmereniya. Teoriya chuvstvitel'nosti opticheskikh izmeritel'nykh navodok. Rol' opticheskogo izobrazheniya [Optical measurements. Responsivity theory of optical measuring laying. The role of optical image]. Sankt-Petersburg, ITMO Publ., 2003. 67 p.

Kulakova N.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Kaledin S.B. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor of Laser and Optoelectronic Systems Department, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation); Senior Researcher at V.I. Vernadskiy Institute of Geochemistry and Analytical Chemistry of the Russian Academy of Sciences (Kosygina ul. 19, Moscow, 119991 Russian Federation).

Sazonov V.N. — engineer-researcher of the Department, JSC Krasnogorsky Zavod (KMZ ZENIT) (Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow Region, 143400 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Kulakova N.N., Kaledin S.B., Sazonov V.N. Error Analysis of IR Lens Focal Length Measured by a Goniometric Method. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2017, no. 4, pp. 17–26.
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-17-26