

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ**Л.Н. Тимашова¹Н.Н. Кулакова¹В.Н. Сазонов²

ti64@yandex.ru

nnkulakova@gmail.com

SAVA5491@yandex.ru

¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация² ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева»,

г. Красногорск, Московская обл., Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрена оптико-электронная система для измерения сферической aberrации объектива. Приведена функциональная схема системы, регистрирующей интерференционную картину, искаженную сферической aberrацией, на матричном приемнике излучения. По сравнению с известным методом Коттона — Линника использование оптико-электронной системы позволит повысить точность и производительность измерения, существенно расширит диапазон контролируемых изделий и избавит от индивидуальных особенностей зрения человека. Приведены формулы для габаритного и энергетического расчетов оптико-электронной системы и анализа возможности использования выбранного матричного приемника излучения. Рассмотрен пример габаритного и энергетического расчетов системы для контролируемого объектива с фокусным расстоянием $f'_{к.о} = 100$ мм. Приведена формула для вычисления погрешности измерения волновой aberrации с помощью оптико-электронной системы, в которой источником излучения является малогабаритный He-Ne-лазер. В рассмотренном примере погрешность составляет $0,1\lambda$ ($\lambda = 0,6328$ мкм). Приведена формула для пересчета волновой aberrации относительно сферы сравнения, совмещенной с гауссовой плоскостью, в поперечную сферическую aberrацию. Вычисления по этой формуле показали, что погрешность измерения поперечной сферической aberrации объектива на оптико-электронной системе с использованием матричного приемника излучения в 3–5 раз меньше погрешности, получаемой при использовании метода Коттона — Линника (0,01...0,015 мм)

Ключевые слова

Сферическая aberrация, оптико-электронная система, объектив, матричный приемник излучения, погрешность измерения, отношение сигнал-шум, пороговая освещенность, лазер, диафрагма

Поступила в редакцию 16.04.2018

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018

Сферическая aberrация — значимая составляющая геометрических искажений изображения оптической системы. Определение этой характеристики качества изображения является весьма важной задачей, которая позволяет сделать заключение о пригодности использования оптической системы по определенному

назначению. Большинство оптических систем, строящих действительное изображение, можно отнести к объективам. Требования к качеству и информативности изображения разрабатываемых объективов непрерывно возрастают. Поэтому дальнейшее совершенствование методов контроля характеристик качества изображения объективов является актуальной задачей.

На практике широкое распространение получил метод исследования продольной и поперечной сферических aberrаций фотографических объективов, разработанный Коттоном и усовершенствованный академиком В.П. Линником [1–3]. Суммарная погрешность измерения поперечной aberrации данным методом составляет 0,01...0,015 мм независимо от значения самой aberrации. Измерив поперечные aberrации, можно пересчитать их в волновые. Волновая сферическая aberrация относительно сферы сравнения, совмещенной с гауссовой плоскостью, определяется по формуле [4–7]: $\Delta l \cong \frac{\Delta y' \operatorname{tg} \sigma'}{4}$, где $\Delta y'$ — поперечная сферическая aberrация в плоскости Гаусса, σ' — задний апертурный угол оптической системы. Рассмотренный метод является визуальным. Поэтому результаты измерений зависят от психофизиологических особенностей испытателя. Кроме того, его нельзя использовать для определения сферических aberrаций объективов, применяемых для создания изображения в невидимой области спектра.

Цель настоящей работы — разработка оптико-электронной системы (ОЭС) для измерения сферической aberrации объектива. Эта система регистрирует интерференционную картину, искаженную сферической aberrацией, на матричном приемнике излучения (МПИ). Использование ОЭС позволит повысить точность и производительность измерения, существенно расширит диапазон контролируемых изделий и избавит от индивидуальных особенностей зрения человека.

На рис. 1 приведена функциональная схема ОЭС измерения сферической aberrации.

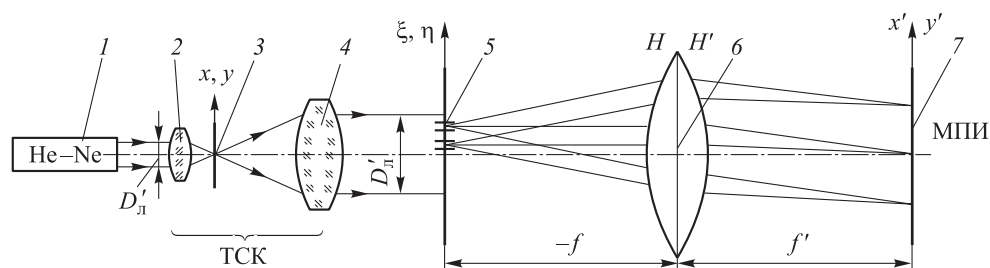


Рис. 1. Оптико-электронная система для измерения сферической aberrации:

1 — He-Ne-лазер; 2 — фокусирующий объектив; 3 — точечная диафрагма; 4 — коллимационный объектив; 5 — подвижная диафрагма; 6 — контролируемый объектив; 7 — МПИ

Параллельный пучок лучей от лазерного источника излучения 1 диаметром $D_{\text{л}}$ проходит через фокусирующий объектив 2 и точечную диафрагму 3 диаметром 0,03 мм, установленную в передней фокальной плоскости коллимационного объек-

тива 4. Объективы 2 и 4 образуют телескопическую систему Кеплера (ТСК), которая расширяет диаметр лазерного пучка лучей до значения $D'_л$.

За коллимационным объективом 4 установлена диафрагма 5 в виде двух парных прямоугольных щелей с размерами: $\Delta\xi$, $\Delta\eta$, ξ_1 , ξ_2 — координаты центров щелей; $d = \xi_2 - \xi_1$ — расстояние между центрами щелей.

Диафрагма может перемещаться в плоскости ξ , η , перпендикулярной оптической оси всей системы, по координате ξ в плоскости зрачка контролируемого объектива б.

Телескопическая система обеспечивает равномерную засветку щелей. Амплитуда освещающего излучения — $A_{\text{осв}}(\xi, \eta; \lambda) = A_{\text{осв}}(\lambda)$.

Амплитудный коэффициент пропускания диафрагмы

$$t(\xi, \eta) = \text{rect}\left(\frac{\xi - \xi_1}{\Delta\xi}, \frac{\eta}{\Delta\eta}\right) + \text{rect}\left(\frac{\xi - \xi_2}{\Delta\xi}, \frac{\eta}{\Delta\eta}\right). \quad (1)$$

Используем приближение: ширина щели настолько мала, что в ее пределах можно считать волновую сферическую aberrацию Δl постоянной:

$$\Delta l(\Delta\xi_1) = \Delta l(\xi_1).$$

Диафрагма 5 выделяет из параллельного пучка лучей, идущих из коллимационного объектива 4, узкие пучки лучей, которые дифрагируют на щелях и падают на контролируемый объектив б. Распределение амплитуды за диафрагмой с учетом волновой сферической aberrации запишем как:

$$\begin{aligned} A(\xi, \eta) &= A_{\text{осв}}(\lambda) t(\xi, \eta) = \\ &= A_{\text{осв}}(\lambda) \left[\text{rect}\left(\frac{\xi - \xi_1}{\Delta\xi}, \frac{\eta}{\Delta\eta}\right) + \text{rect}\left(\frac{\xi - \xi_2}{\Delta\xi}, \frac{\eta}{\Delta\eta}\right) \right] \exp[jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi)] = \\ &= A_{\text{осв}}(\lambda) \left[\exp[jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi_1)] \text{rect}\left(\frac{\xi - \xi_1}{\Delta\xi}, \frac{\eta}{\Delta\eta}\right) + \exp[jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2)] \text{rect}\left(\frac{\xi - \xi_2}{\Delta\xi}, \frac{\eta}{\Delta\eta}\right) \right] = \\ &= A_{\text{осв}}(\lambda) \left[\exp[jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi_1)] \delta(\xi - \xi_1, \eta) + \exp[jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2)] \delta(\xi - \xi_2, \eta) \right] \otimes \\ &\quad \otimes \text{rect}\left(\frac{\xi}{\Delta\xi}, \frac{\eta}{\Delta\eta}\right). \quad (2) \end{aligned}$$

Контролируемый объектив б выполняет преобразование Фурье от распределения амплитуды за диафрагмой и формирует интерференционную картину (ИК) от сложения амплитуд двух пучков в задней фокальной плоскости объектива [4]:

$$\begin{aligned} A_{F'}(x', y') &= \mathfrak{F}\{A(\xi, \eta)\} = A_{\text{осв}}(\lambda) \frac{\Delta\xi\Delta\eta}{\lambda f'} \times \\ &\times \left\{ \exp[jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi_1)] \exp\left(-2\pi\frac{\xi_1}{\lambda f'}x'\right) + \exp[jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2)] \exp\left(-j2\pi\frac{\xi_2}{\lambda f'}x'\right) \right\} \times \\ &\times \text{sinc}\left(\pi\frac{\Delta\xi x'}{\lambda f'}, \pi\frac{\Delta\eta y'}{\lambda f'}\right) = A_{\text{осв}}(\lambda) \frac{\Delta\xi\Delta\eta}{\lambda f'} \exp\left(-2\pi\frac{\xi_1}{\lambda f'}x'\right) \times \end{aligned}$$

$$\times \left\{ \exp [jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi_1)] + \exp [jk\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2)] \exp \left(-j2\pi \frac{d}{\lambda f'} x' \right) \right\} \times \sin c \left(\pi \frac{\Delta \xi x'}{\lambda f'}, \pi \frac{\Delta \eta y'}{\lambda f'} \right). \quad (3)$$

Распределение освещенности в задней фокальной плоскости контролируемого объектива б:

$$E_{F'}(x, y) = \left(A_{\text{осв}}(\lambda) \frac{\Delta \xi \Delta \eta}{\lambda f'} \right)^2 \cdot 4 \left\{ 1 + \cos \left[2\pi \frac{d}{\lambda f'} x' - 2\pi \frac{\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2) - \Delta l_{\text{сф}}(\xi_1)}{\lambda} \right] \right\} \times \sin^2 c \left(\pi \frac{\Delta \xi x}{\lambda f'}, \pi \frac{\Delta \eta y}{\lambda f'} \right). \quad (4)$$

Это распределение освещенности фиксируется МПИ 7.

Параметры МПИ: $a_m \times b_m$ — размеры МПИ; $a_{\text{эл}}$ — размер элемента МПИ; $E_{\text{пор}}$ — пороговая освещенность МПИ.

Если диафрагму 5 перемещать по входному зрачку объектива б, то при отсутствии поперечной сферической аберрации интерференционная картина будет неподвижна, причем ее центр будет располагаться на оптической оси контролируемого объектива б. При наличии аберрации интерференционная картина будет смещаться в направлении, перпендикулярном оптической оси контролируемого объектива, на величину, пропорциональную разнице волновых аберраций при координатах ξ_1 и ξ_2 . Связь между волновыми аберрациями в области третьих порядков определяется формулой: $\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2) = \Delta l_{\text{сф}}(\xi_1) (\xi_2/\xi_1)^4$. Используя эту зависимость и разность аберраций, можно определить их значения для координат ξ_1 и ξ_2 .

Для определения смещения центрального максимума интерференционной картины x'_{max} при наличии сферической аберрации объектива в выражение (4) принимаем

$$\cos^2 \left(\pi \frac{d}{\lambda f'} x'_{\text{max}} + \pi \frac{\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2) - \Delta l_{\text{сф}}(\xi_1)}{\lambda} \right) = 1.$$

Из этого соотношения получаем формулу для определения x'_{max} :

$$\frac{d}{\lambda f'} x'_{\text{max}} + \frac{\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2) - \Delta l_{\text{сф}}(\xi_1)}{\lambda} = 0, \quad (5)$$

тогда

$$x'_{\text{max}} = \frac{-f' [\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2) - \Delta l_{\text{сф}}(\xi_1)]}{d}. \quad (6)$$

Для регистрации смещения интерференционной картины на МПИ оно должно быть не меньше одного элемента МПИ: минимальное значение $x'_{\text{max}} = a_{\text{эл}}$. Тогда погрешность измерения волновой аберрации на ОЭС вычисляется по формуле

$$\delta l_{\text{сф}} = \delta l_{\text{сф}}(\xi_2; \lambda) - \delta l_{\text{сф}}(\xi_1; \lambda) = -\frac{a_{\text{эл}} d}{f'_{\text{к.о}}}. \quad (7)$$

Формулы (1)–(7) применяют для габаритного и энергетического расчетов ОЭС и анализа возможности использования выбранного МПИ.

Рассмотрим пример габаритного и энергетического расчета ОЭС для контролируемого объектива с фокусным расстоянием $f'_{\text{к.о}} = 100$ мм; относительным отверстием $A = D / f' < 1 : 3$; $D_{\text{к.о}} = 30$ мм.

Выберем в качестве источника излучения малогабаритный He–Ne-лазер со следующими характеристиками: мощность $\Phi_{\text{л}} = 5$ мВт; диаметр пучка по уровню $0,5 D_{\text{л}} = 1$ мм; диаметр пучка лучей на выходе из телескопической системы $D'_{\text{л}} = D_{\text{к.о}} = 30$ мм; линейное увеличение телескопической системы $\beta = -30^{\times}$.

Габаритный расчет ОЭС. Выберем кремниевый матричный приемник излучения со следующими параметрами [8]: размер МПИ: $a_{\text{м}} \times b_{\text{м}} = 6,4 \times 4,8$ мм²; размер элемента МПИ: $a_{\text{э}} \times a_{\text{э}} = 10 \times 10$ мкм²; паспортная пороговая освещенность МПИ $E_{\text{порV}}^{\text{насп}} = 1$ лк, которая регистрируется при диафрагменном числе объектива $F_{\text{насп}} = 1,5$.

Используя формулу (4), определим период косинусоидального распределения освещенности в задней фокальной плоскости контролируемого объектива:

$$T = \frac{\lambda f'_{\text{к.о}}}{d}. \quad (8)$$

Из формулы (8) получим расстояние между щелями

$$d = \frac{\lambda f'_{\text{к.о}}}{T}. \quad (9)$$

Примем $T = 10a_{\text{эл}} = 100$ мкм. Используя зависимость (9) получаем $d = 0,63$ мм.

Как следует из формулы (4), число периодов распределения освещенности ограничивается функцией $\sin c^2 \left(\pi \frac{\Delta \xi x}{\lambda f'_{\text{к.о}}}, \pi \frac{\Delta \eta y}{\lambda f'_{\text{к.о}}} \right)$, размеры которой определяются шириной щели $\Delta \xi$.

Диаметр темной зоны интерференционной картины, ограниченной первыми нулями функции $\sin c^2 \left(\pi \frac{\Delta \xi x}{\lambda f'_{\text{к.о}}}; \pi \frac{\Delta \eta y}{\lambda f'_{\text{к.о}}} \right)$ по оси x' , определим по формуле

$$2x' = \frac{2\lambda f'_{\text{к.о}}}{\Delta \xi}. \quad (10)$$

Примем число периодов интерференционной картины $N = 10$, тогда $2x' = 10T = 1$ мм. Используя зависимость (10), получаем $\Delta \xi = 0,12$ мм.

Погрешность измерения волновой aberrации объектива вычисляем по формуле (7): $\delta l_{\text{сф}} = 0,1$ мм = $0,1\lambda$; погрешность измерения поперечной aberrации

ции [4, 5]: $\delta\Delta y' = \frac{4\delta l_{\text{сф}}}{\text{tg}\sigma'} = \frac{0,4 \text{ мкм}}{0,15} = 0,003 \text{ мм}$. Из приведенных расчетов следует, что погрешность измерения сферической aberrации объектива на ОЭС с использованием МПИ в 3–5 раз меньше погрешности, получаемой при использовании метода Коттонна — Линника (0,01...0,015 мм).

На рис. 2 приведены графики распределения освещенности интерференционной картины в фокальной плоскости контролируемого объектива, построенные по формуле (4) для различных положений подвижной диафрагмы 5 (см. рис. 1).

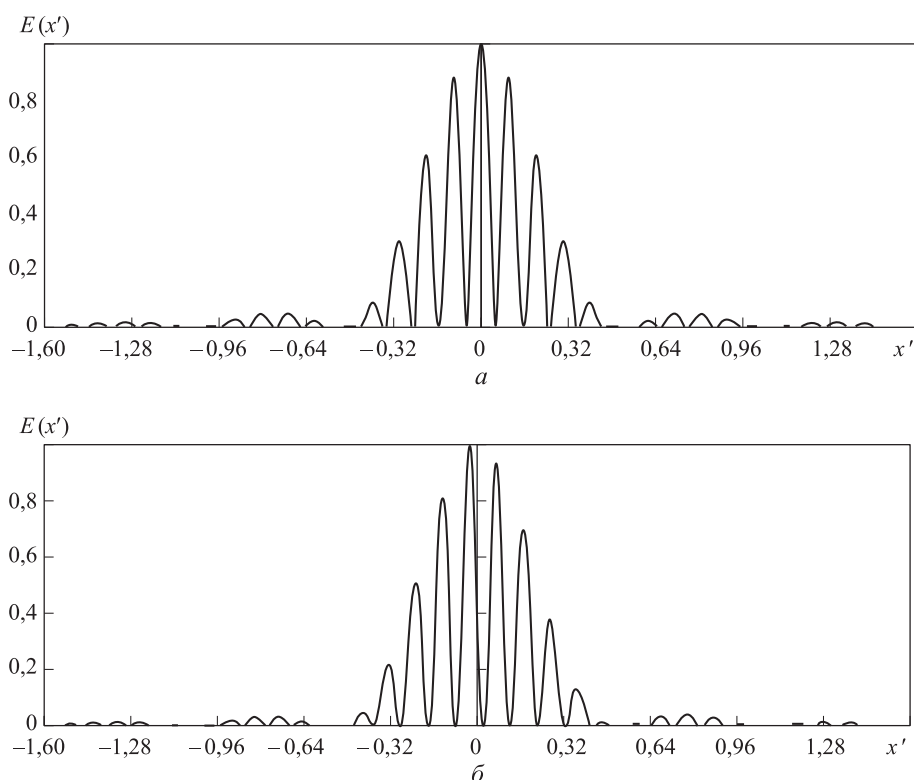


Рис. 2. Графики распределения освещенности интерференционной картины в фокальной плоскости контролируемого объектива:

a — соответствующий положению диафрагмы в параксиальной области объектива; *b* — со смещенным максимумом при $\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2; \lambda) - \Delta l_{\text{сф}}(\xi_1; \lambda) = 0,3\lambda$

График, соответствующий положению диафрагмы в параксиальной области объектива, представлен на рис. 2, *a*. При смещении диафрагмы в плоскости ξ , η , перпендикулярной оптической оси всей системы, по координате ξ объектив вносит волновые aberrации $\Delta l(\xi_1)$ и $\Delta l(\xi_2)$. Разность этих aberrаций приводит к смещению центрального максимума интерференционной картины. График со смещенным максимумом при $\Delta l_{\text{сф}}(\xi_2; \lambda) - \Delta l_{\text{сф}}(\xi_1; \lambda) = 0,3\lambda$ приведен на рис. 2, *b*. По величине смещения центрального максимума определяют величину поперечной сферической aberrации $\Delta y'$ контролируемого объектива.

Энергетический расчет ОЭС. Цель энергетического расчета — вычисление ОСШ μ в рассматриваемой ОЭС. Для измерительных систем это отношение должно удовлетворять условию: $\mu \geq 100$ [8–12]. Отношение сигнал-шум вычисляется по формуле

$$\mu = E_{\max}^{F'} / E_{\text{пор}}^{\text{к.о}}, \quad (11)$$

где $E_{\max}^{F'}$ — максимальная освещенность МПИ при $x = 0$, $y = 0$ в рассматриваемой схеме ОЭС; $E_{\text{пор}}^{\text{к.о}}$ — пороговая освещенность МПИ, пересчитанная для диафрагменного числа контролируемого объектива и источника излучения с длиной волны $\mu = 0,6328$ мкм (He–Ne-лазер).

Определим диафрагменное число контролируемого объектива

$$F_{\text{к.о}} = f'_{\text{к.о}} / D_{\text{экв}}, \quad (12)$$

где $D_{\text{экв}}$ — диаметр эквивалентного зрачка контролируемого объектива. Поскольку площадь двух прямоугольных щелей диафрагмы 5 (см. рис. 1) равна площади круглого эквивалентного зрачка, то $\frac{\pi D_{\text{экв}}^2}{4} = 2(\Delta\xi\Delta\eta)$.

В рассматриваемом примере $\Delta\xi = 0,12$ мм, принимаем $\Delta\eta = \Delta\xi = 0,12$ мм, получаем: $D_{\text{экв}} = 1,75$ мм. Используя выражение (12) для фокусного расстояния $f'_{\text{к.о}} = 100$ мм, вычисляем диафрагменное число контролируемого объектива $F_{\text{к.о}} = 57,14$.

Вычислим пороговую освещенность $E_{\text{пор}}^{\text{к.о}}$ МПИ для контролируемого объектива по формуле

$$E_{\text{пор}}^{\text{к.о}} = E_{\text{пор}}^{\text{пасп}} \left(F_{\text{к.о}} / F_{\text{пасп}} \right)^2, \quad (13)$$

где $E_{\text{пор}}^{\text{пасп}} = 1$ лк — паспортная пороговая освещенность МПИ, которая регистрируется при диафрагменном числе объектива $F_{\text{пасп}} = 1,5$ для источника излучения типа А (цветовая температура $T_c = 2856$ К).

Используя формулу (13), получаем $E_{\text{пор}}^{\text{к.о}} = 1451$ лк. Переведем полученную световую величину в энергетическую по формуле [8–11]:

$$E_{\text{пор}}^{\text{к.о}} = E_{\text{пор}}^{\text{к.о}} \frac{1}{683 K_{\text{гл}}^A}, \quad (14)$$

где $K_{\text{гл}}^A = 0,0241$ — коэффициент использования источника А глазом. Используя формулу (14), получаем: $E_{\text{пор}}^{\text{к.о}} = 88,15$ Вт/м². Пересчитаем $E_{\text{пор}}^{\text{к.о}}$ для источника А на длину волны He–Ne-лазера $\lambda = 0,6328$ мкм по формуле [8–11]:

$$E_{\text{пор}}^{\text{к.о}}(\lambda) = E_{\text{пор}}^{\text{к.о}} \frac{K_{\text{пи}}^{\text{пасп}}}{K_{\text{пи}}^{\text{раб}}}, \quad (15)$$

где $E_{\text{пор}}^{\text{к.о}}(\lambda)$ — энергетическая пороговая освещенность МПИ с контролируемым объективом для источника излучения с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм; $K_{\text{пи}}^{\text{пасп}} = 0,1747$ — коэффициент использования излучения источника А кремниевым

МПИ [8]; $K_{\text{пи}}^{\text{раб}} = 0,35$ — коэффициент использования излучения с длиной волны $\lambda = 0,6328$ мкм кремниевым МПИ [8]. Используя выражение (15), получаем $E_{\text{епор}}^{\text{к.о}}(\lambda) = 44 \text{ Вт/м}^2$.

Из формулы (4) получим выражение для вычисления $E_{\text{max}}^{F'}$ — максимальной освещенности МПИ при $x = 0, y = 0$ (см. рис. 1):

$$\begin{aligned} E_{\text{max}}^{F'} &= 4 \left[A_{\text{осв}}(\lambda) \frac{\Delta\xi\Delta\eta}{\lambda f'} \right]^2 = 4 E_{\text{осв}}(\lambda) \left(\frac{\Delta\xi\Delta\eta}{\lambda f'} \right)^2 = 4 \frac{\Phi_{\text{л}}(\lambda)}{\pi D_{\text{к.о}}^2} \left(\frac{\Delta\xi\Delta\eta}{\lambda f'} \right)^2 = \\ &= 16 \frac{\Phi_{\text{л}}(\lambda)}{\pi D_{\text{к.о}}^2} \left(\frac{\Delta\xi\Delta\eta}{\lambda f'} \right)^2. \end{aligned} \quad (16)$$

В результате подстановки исходных данных получим $E_{\text{max}}^{F'} = 10\,177 \text{ Вт/м}^2$. Значение ОСШ вычислим по формуле (11):

$$\mu = E_{\text{max}}^{F'} / E_{\text{епор}}^{\text{к.о}} = 10\,177 [\text{Вт/м}^2] / 44 [\text{Вт/м}^2] = 231,3.$$

Выполненные вычисления показывают, что ОЭС обеспечивает требуемое для измерительных систем ОСШ $\mu \geq 100$.

Выводы. 1. Оптико-электронная система позволяет выполнять высокоточное измерение сферической аберрации объектива за счет получения интерференционной картины и использования МПИ ($\delta\Delta y' \leq 0,003$ мм), ОЭС обеспечивает требуемое для измерительных систем ОСШ $\mu \geq 100$.

2. По сравнению с известным методом Коттона — Линника точность измерения повышается в 3–5 раз, ОЭС позволяет производить измерения сферической аберрации объективов, применяемых в невидимой области спектра и исключает психофизические особенности испытателя.

3. Приведенные методики расчета диафрагмы и ОСШ могут быть использованы при проектировании ОЭС для контроля объективов с различными основными характеристиками.

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. Заказов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. Теория оптических систем. СПб.: Лань, 2008. 448 с.
6. Якушенков Ю.Г. Проектирование оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2000. 488 с.

7. Шредер Г., Трайбер Х. Техническая оптика. М.: Техносфера, 2006. 424 с.
8. Якушников Ю.Г. Теория и расчет оптико-электронных приборов. М.: Логос, 2004. 472 с.
9. Кортаев 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.
12. 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

Тимашова Лариса 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).

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).

Сазонов Вячеслав Николаевич — инженер-исследователь ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева» (Российская Федерация, Московская обл., 143403, г. Красногорск, Речная ул., д. 8).

Просьба сослаться на эту статью следующим образом:

Тимашова Л.Н., Кулакова Н.Н., Сазонов В.Н. Оптико-электронная система для измерения сферической аберрации // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 6. С. 112–122. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-112-122

OPTO-ELECTRONIC SYSTEM FOR MEASUREMENT OF SPHERICAL ABERRATION

L.N. Timashova¹

N.N. Kulakova¹

V.N. Sazonov²

ti64@yandex.ru

nnkulakova@gmail.com

SAVA5491@yandex.ru

¹ Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

² JSC "Krasnogorsky Zavod" (KMZ "ZENIT"), Krasnogorsk,

Moscow Region, Russian Federation

Abstract

An opto-electronic system for measurement of spherical aberration of a lens was investigated. The article presents the functional scheme for registration of interferential pattern affected by spherical aberration on the matrix radiation receiver. Unlike the Cotton — Linnik method, application of the opto-electronic system allows us to increase the accuracy and efficiency of the measurements.

Keywords

Spherical aberration, opto-electronic system, lens, matrix radiation receiver, measurement error, the signal-noise relation, the threshold illumination, laser, diaphragm

The approach spreads the range of controlled products and eliminates the errors caused by the individual aspects of a human sight. The formulas for dimensional and energy calculations of the opto-electronic system and for the suitability estimation of the application of the chosen matrix radiation receiver are presented. As an example, the dimensional and energy calculations of the system for controlled lens with the focal length $f' = 100$ mm. The formula for calculation of measurement error of wave aberration using opto-electronic system based on compact He-Ne-laser as the radiation source is given. The error in the example given is $0,1\lambda$ ($\lambda = 0,6328 \mu\text{m}$). The formula for transition from wave aberration related to the comparison sphere coincident with the Gauss plain into transversal spherical aberration is presented. The application of the presented formula resulted 3...5 times less error of measurements of spherical aberration of the lens using the matrix radiation receiver than the error of the same experiment occurring in case of Cotton — Linnik method's application

Received 16.04.2018
© BMSTU, 2018

REFERENCES

- [1] Krivovyaz L.M., Puryaev D.T., Znamenskaya M.A. Praktika opticheskoy izmeritel'noy laboratorii [Practice 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 [Theory of optical systems]. 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] Schroder G., Treiber H. Technische Optik. Vogel Buchverlag, 2002.
- [8] Yakushenkov Yu.G. Teoriya i raschet optiko-elektronnykh priborov [Optoelectronic devices theory and calculation]. Moscow, Logos Publ., 2004. 472 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.

[12] 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 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3933-2017-4-17-26

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

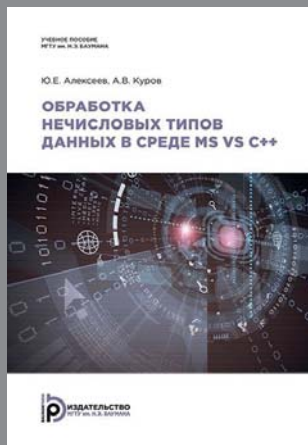
Kulakova N.N. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Bauman Moscow State Technical University (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Sazonov V.N. — research engineer, JSC "Krasnogorsky Zavod" (KMZ "ZENIT") (Rechnaya ul. 8, Krasnogorsk, Moscow Region, 143403 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Timashova L.N., Kulakova N.N., Sazonov V.N. Opto-Electronic System for Measurment of Spherical Aberration. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Priborostr.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Instrum. Eng.], 2018, no. 6, pp. 112–122 (in Russ.).

DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-112-122



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышло в свет учебное пособие авторов

Ю.Е. Алексева, А.В. Курова

**«Обработка нечисловых типов данных
в среде MS VS C++»**

Рассмотрена работа со следующими типами и структурами данных: символьным; строковым; структурным; файловым; указатели. Описаны операции, которые можно выполнять с данными каждого типа. Приведены сведения о стандартных функциях обработки этих данных и примеры программ, позволяющих лучше уяснить основные особенности работы с каждым конкретным типом данных. Представлены комплекты заданий (не менее 25 вариантов). Для студентов первого курса МГТУ им. Н.Э. Баумана, обучающихся по машино- и приборостроительным специальностям.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1
+7 (499) 263-60-45

press@bmstu.ru

www.baumanpress.ru