

С. В. Б о д р о в

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЛИННОФОКУСНОГО
ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО
ФОТОГРАФИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА**

Рассмотрена методика расчета длиннофокусного зеркально-линзового объектива, содержащего главное сферическое вогнутое зеркало, выпуклое сферическое контрзеркало и двухлинзовый компенсатор.

E-mail: rl-3@mx.bmstu.ru

Ключевые слова: *длиннофокусный объектив, фотография, зеркало, линза.*

Настоящая статья является продолжением и развитием работ, посвященных расчету зеркально-линзовых объективов [1–5]. Для фотографической съемки объектов, удаленных на значительные расстояния, применяются длиннофокусные объективы, которые обычно основаны на линзовой или зеркально-линзовой оптической схеме. Линзовые объективы имеют значительные осевые габаритные размеры, их коэффициент $k_t = \frac{L}{f'} \geq 0,8$, где L — расстояние от вершины первой поверхности до задней фокальной плоскости. Оптические схемы линзовых объективов сложны, состоят из нескольких многолинзовых компонентов и для коррекции хроматических aberrаций требуют применения особых оптических материалов, например флюорита или стекол со сверхнизким коэффициентом дисперсии. Зеркальные объективы свободны от хроматических aberrаций, имеют малые осевые габаритные размеры и простую оптическую схему, но aberrации наклонных пучков лучей ограничивают угловое поле таких систем.

Зеркально-линзовые объективы при относительно небольших осевых габаритных размерах позволяют исправить aberrации наклонных пучков лучей за счет использования линзовых элементов, а подбором материалов линз можно добиться исправления и хроматических aberrаций. Поэтому зеркально-линзовые объективы оптимально подходят для синтеза длиннофокусных объективов.

В нашей стране выпускаются несколько видов зеркально-линзовых объективов с фокусным расстоянием 1000 мм, например: МТО-1000, МС МТО-11, Рубинар 10/1000, Астро-Рубинар 100. Их основные характеристики приведены в табл. 1, где K — диафрагменное число и L_{\min} — минимальная дистанция съемки. Зарубежные оптические фирмы также изготавливают широкую линейку подобных систем, некоторые характеристики которых приведены в табл. 2.

**Основные характеристики отечественных длиннофокусных
зеркально-линзовых объективов**

Наименование объектива	f' , мм	K	2ω , градусы	Групп/элементов	Разрешающая способность, мм ⁻¹		L_{\min} , м	Масса, кг
					центр	край		
МТО-1000	1000,8	10	2,5	4/5	28	16	10,0	3,9
МС МТО-11	1000	10	2,5	4/5	30	20	8,0	2,3
МТО-100А	1084	10,5	2,5	4/5	28	18	10,0	3,6
МТО-1000АМ	1084	10,8	2,5	4/5	28	18	10,0	2,7
МС Рубинар-10/1000	1000	10	2,5	4/7	50	35	4,0	1,9
Астро-Рубинар 100	1000	10	2,5	4/7	50	35	4,0	–

Таблица 2

Основные характеристики зарубежных длиннофокусных зеркально-линзовых объективов

Наименование объектива	f' , мм	K	2ω , градусы	Групп/элементов	L_{\min} , м	Масса, кг
SMC Pentax Reflex 1000 mm	1000	11	2,5	6/8	8	2,3
SMC Pentax 67 1000 mm	1000	8	5	4/6	35	6,66
Nikkor Mirror 1000 mm	1000	11	2,5	5/5	8	1,9
Yashica Yashinon Reflex 1000 mm	1000	11	2,3	5/6	8	2,48

Анализируя приведенные в табл. 1 и 2 данные, выявили, что фотографические зеркально-линзовые объективы с фокусным расстоянием 1000 мм достаточно широко представлены на рынке, однако подобные системы с $f' = 2000$ мм изготавливают только две зарубежные компании: Pentax и Nikon. В табл. 3 приведены основные характеристики данных объективов. В нашей стране были разработаны и изготовлены в 1960-х годах только экспериментальные образцы подобных систем – ТОЗ-2000 и ТОЗ-2000М с асферическими зеркалами.

В настоящей работе рассмотрена методика расчета длиннофокусного зеркально-линзового объектива с фокусным расстоянием 2000 мм, имеющего максимально простую оптическую схему. Этому условию соответствует, например, оптическая система Максудова–Кассегрена, дополненная линзой в сходящемся после отражения от

Основные характеристики длиннофокусных зеркально-линзовых объективов с $f' = 2000$ мм

Наименование объектива	f' , мм	K	2ω , градусы	Групп/элементов	L_{\min} , м	Масса, кг
SMC Pentax-M Reflex 2000 mm	2000	13,5	1,2	6/8	20,0	8
Nikkor Mirror 2000 mm	2000	11	1,2	5/5	18,0	17,5

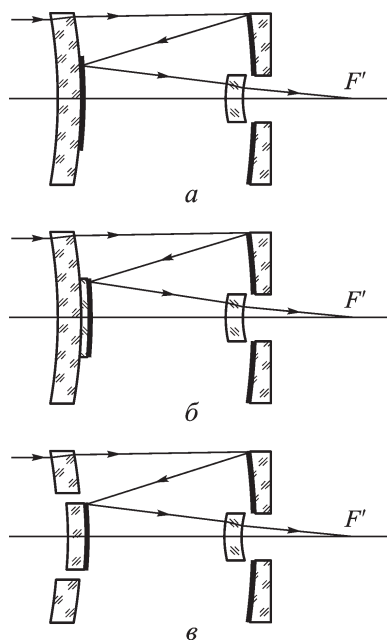


Рис. 1. Схема оптической системы Максютова–Кассегрена:

а — дополненная линзой; *б* — контрзеркало наклеено на поверхность менисковой линзы; *в* — контрзеркало закреплено на “пробке” в отверстии мениска

контрзеркала пучке лучей (рис. 1, *а*). Эта линза необходима для исправления аберраций наклонных пучков лучей, так как высота второго вспомогательного луча (H_k) на ней максимальна. Но коррекционные возможности такой схемы ограничены, так как контрзеркало нанесено на вторую поверхность менисковой линзы и его радиус кривизны не может свободно изменяться в процессе оптимизации. Дополнительный коррекционный параметр появится в том случае, если контрзеркало выполнить в виде отдельного элемента и наклеить на поверхность менисковой линзы (рис. 1, *б*) или закрепить на “пробке” в отверстии мениска (рис. 1, *в*). Для синтеза длиннофокусного зеркально-линзового объектива выбрана схема, приведенная на рис. 2. На начальной стадии расчета линзовые элементы считаем бесконечно тонкими. Тогда исходными данными для расчета системы являются: d_I — расстояние между главными плоскостями менисковой линзы и вершиной главного зеркала; d_{II} — расстояние между вершинами зеркал (отрицательное число); d_{III} — расстояние между вершиной контрзеркала и главными плоскостями коррекционной линзы; c — вынос изображения за вершину главного зеркала; n_2, n_6 и ν_2, ν_6 — показатели преломления и коэффициенты дисперсии материалов первой и второй линз соответственно; $S_I, S_{II}, S_{IV}, S_{Ixp}$ — требуемые значения сумм Зейделя.

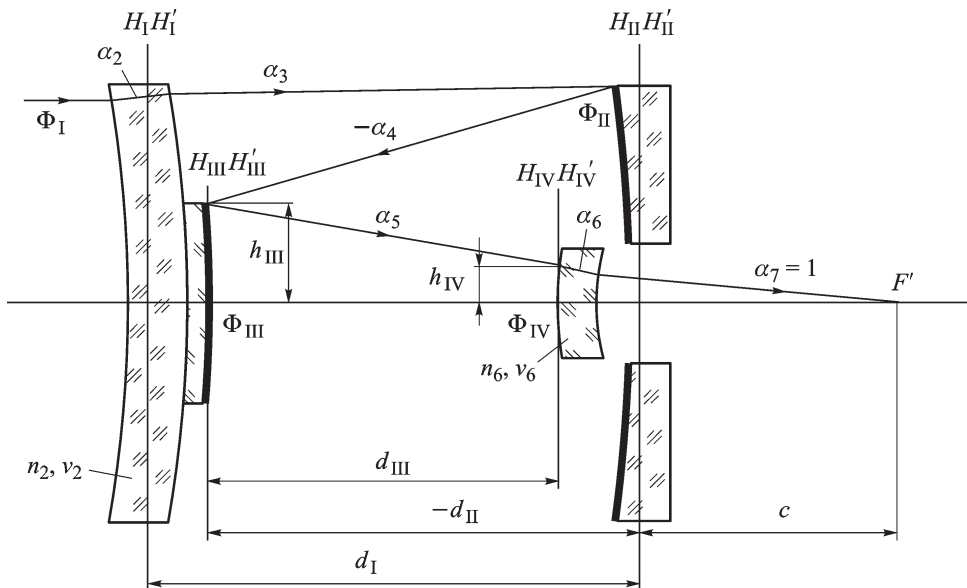


Рис. 2. Схема для синтеза длиннофокусного зеркально-линзового объектива

Расчет исходного варианта системы начинается с вычисления заднего фокального отрезка $a'_{F'} = c - d_{II} - d_{III}$, который равен высоте первого вспомогательного луча на коррекционной линзе $h_{IV} = a'_{F'}$. Затем находятся вспомогательные коэффициенты, полученные из уравнений, выражающих условия масштаба и получения требуемых значений сумм Зейделя S_{IV} , S_{Ixp} [5, 6]:

$$\delta_1 = \frac{1}{d_{III}}, \quad \delta_2 = \frac{h_{IV}}{d_{III}}, \quad \delta_3 = \frac{1 + \delta_2}{h_{IV}},$$

$$\delta_4 = \frac{\delta_1}{h_{IV}}, \quad \delta_5 = \frac{1}{\nu_2}, \quad \delta_6 = \frac{h_{IV}^2}{\nu_6},$$

$$\delta_7 = \delta_3 \delta_6 - a, \quad a = -S_{Ixp}, \quad \delta_8 = \delta_4 \delta_6,$$

$$\delta_9 = \frac{\delta_8}{\delta_5}, \quad \delta_{10} = \frac{\delta_7}{\delta_5}, \quad \delta_{11} = 1 + d_I \delta_{10},$$

$$\delta_{12} = \delta_9 d_I, \quad \delta_{13} = -\frac{\delta_{12} + 1}{d_{II}}, \quad \delta_{14} = -\frac{\delta_{11}}{d_{II}},$$

$$\delta_{15} = \delta_{10} + \delta_{14}, \quad \delta_{16} = \delta_9 + \delta_{13}, \quad \delta_{17} = \delta_1 + \delta_{13},$$

$$\delta_{18} = \delta_2 + \delta_{14}, \quad \delta_{19} = \frac{1}{n_2}, \quad \delta_{20} = \frac{1}{n_6},$$

$$\delta_{21} = \delta_9 \delta_{19} - \delta_4 \delta_{20}, \quad \delta_{22} = \delta_3 \delta_{20} - \delta_{10} \delta_{19} - S_{IV}.$$

Высота первого вспомогательного луча на контрзеркале h_{III} , равная коэффициенту центрального экранирования, определяется при реше-

нии следующего кубического уравнения:

$$A_1 h_{III}^3 + B_1 h_{III}^2 + C_1 h_{III} + D_1 = 0, \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} A_1 &= -\delta_{12}\delta_{21}, \\ B_1 &= \delta_{11}\delta_{21} + \delta_{12}(\delta_{17} - \delta_{22}) + \delta_{16}, \\ C_1 &= \delta_{11}(\delta_{22} - \delta_{17}) - \delta_{15} - \delta_{12}\delta_{18}, \\ D_1 &= \delta_{11}\delta_{18}. \end{aligned}$$

Далее вычисляются оптические силы всех компонентов системы и радиусы кривизны главного (r_3) и вторичного (r_4) зеркал:

$$\begin{aligned} \Phi_I &= h_{III}\delta_9 - \delta_{10}, \quad \Phi_{II} = \frac{\delta_{15} - h_{III}\delta_{16}}{\delta_{11} - h_{III}\delta_{12}}, \quad \Phi_{III} = \frac{h_{III}\delta_{17} - \delta_{18}}{h_{III}}, \quad \Phi_{IV} = \delta_3 - h_{III}\delta_4, \\ r_3 &= -\frac{2}{\Phi_{II}}, \quad r_4 = \frac{2}{\Phi_{III}}. \end{aligned}$$

Углы и высоты первого вспомогательного луча находятся по следующим формулам [3]:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0, \quad h_1 = 1, \quad \alpha_3 = \Phi_I, \quad h_{II} = 1 - \Phi_I d_1, \quad \alpha_4 = h_{III}\delta_{13} - \delta_{14}, \\ \alpha_5 &= \delta_1 h_{III} - \delta_2, \quad h_{IV} = a'_{F'}, \quad \alpha_7 = 1. \end{aligned}$$

Если апертурная диафрагма совпадает с главным зеркалом, то углы и высоты второго вспомогательного луча будут определяться формулами

$$\begin{aligned} H_I &= a_p = \frac{d_1}{h_{II}}, \quad \beta_3 = 1 + a_p \Phi_I, \quad H_{II} = 0, \quad \beta_4 = -\beta_3, \quad H_{III} = d_{II}\beta_3, \\ \beta_5 &= \beta_3(1 + d_{II}\Phi_{III}), \quad H_{IV} = H_{III} - d_{III}\beta_5. \end{aligned}$$

Если апертурная диафрагма совпадает с первой поверхностью системы, то углы и высоты второго вспомогательного луча вычисляются следующим образом:

$$\begin{aligned} H_I &= 0, \quad \beta_1 = \beta_3 = 1, \quad H_{II} = -d_1, \quad \beta_4 = d_1\Phi_{II} - 1, \\ H_{III} &= H_{II} - d_{II}\beta_4, \quad \beta_5 = 1 - d_1\Phi_{II} + H_{III}\Phi_{III}, \quad H_{IV} = H_{III} - d_{III}\beta_5. \end{aligned}$$

Аберрационные параметры главного (P_3, W_3) и вторичного (P_4, W_4) зеркал определяются по известным формулам [3]

$$\begin{aligned} P_3 &= -\frac{(\alpha_4 - \Phi_I)^2 (\alpha_4 + \Phi_I)}{4}, \quad W_3 = \frac{\alpha_4^2 - \Phi_I^2}{2}, \\ P_4 &= \frac{(\alpha_5 - \alpha_4)^2 (\alpha_5 + \alpha_4)}{4}, \quad W_4 = \frac{\alpha_5^2 - \alpha_4^2}{2}. \end{aligned}$$

Углы α_2 и α_6 первого вспомогательного луча, определяющие форму линз объектива, находятся из условия получения заданных значений

первой и второй сумм Зейделя решением системы уравнений

$$\begin{aligned}\alpha_2^2 \delta_{39} - \alpha_2 \delta_{38} + \alpha_6^2 \delta_{45} + \alpha_6 \delta_{46} + \delta_{47} &= 0; \\ \alpha_2^2 \delta_{49} + \alpha_2 \delta_{50} + \alpha_6^2 \delta_{51} + \alpha_6 \delta_{52} + \delta_{53} &= 0.\end{aligned}$$

Предварительно вычисляются значения второго блока вспомогательных коэффициентов:

$$\begin{aligned}\delta_{23} &= (\mu_6 - 1)^{-2}, \quad \delta_{24} = \delta_{23} \mu_6, \quad \delta_{25} = \alpha_5 \delta_{23} (2\mu_6 + 1), \quad \delta_{26} = \alpha_5^2 \delta_{23} (\mu_6 + 2), \\ \delta_{27} &= \alpha_5^3 \delta_{23}, \quad \delta_{28} = (\mu_6 - 1)^{-1}, \quad \delta_{29} = \delta_{28} \mu_6, \quad \delta_{30} = \alpha_5 \delta_{28} (1 + \mu_6), \\ \delta_{31} &= \alpha_5^2 \delta_{28}, \quad \delta_{32} = \delta_{23} (2 + \mu_6), \quad \delta_{33} = \delta_{23} (1 + 2\mu_6), \quad \delta_{34} = \delta_{28} (1 + \mu_6), \\ \delta_{35} &= (\mu_2 - 1)^{-2}, \quad \delta_{36} = (\mu_2 - 1), \quad \delta_{37} = \Phi_1^3 \delta_{35}, \quad \delta_{38} = \Phi_1^2 \delta_{35} (2 + \mu_2), \\ \delta_{39} &= \Phi_1 \delta_{35} (1 + 2\mu_2), \quad \delta_{40} = \delta_{35} \mu_2, \quad \delta_{41} = -\Phi_1^2 \delta_{36}, \quad \delta_{42} = \Phi_1 \delta_{36} (\mu_2 + 1), \\ \delta_{43} &= \delta_{36} \mu_2, \quad \delta_{44} = h_{II} P_3 + h_{III} P_4 - S_I, \quad \delta_{45} = h_{IV} (\delta_{33} - \delta_{25}), \\ \delta_{46} &= h_{IV} (\delta_{26} - \delta_{32}), \quad \delta_{47} = \delta_{37} + h_{IV} (\delta_{23} - \delta_{27}) + \delta_{44}, \\ \delta_{48} &= H_{II} P_3 + H_{III} P_4 + W_3 + W_4 - S_{II}, \quad \delta_{49} = H_I \delta_{39}, \quad \delta_{50} = \delta_{42} - H_I \delta_{38}, \\ \delta_{51} &= H_{IV} (\delta_{33} - \delta_{25}), \quad \delta_{52} = H_{IV} (\delta_{26} - \delta_{32}) - \delta_{30} + \delta_{34}, \\ \delta_{53} &= H_I \delta_{37} + H_{IV} (\delta_{23} - \delta_{27}) + \delta_{41} + \delta_{31} - \delta_{28} + \delta_{48},\end{aligned}$$

где H_I , H_{II} , H_{III} и H_{IV} — высоты второго вспомогательного луча на главных плоскостях менисковой линзы, главного зеркала, контрзеркала и второй линзы соответственно.

После определения углов α_2 и α_6 вычисляются значения радиусов кривизны линзовых компонентов [7]:

$$r_1 = \frac{n_2 - 1}{n_2 \alpha_2}, \quad r_2 = \frac{1 - n_2}{\Phi_1 - n_2 \alpha_2}, \quad r_5 = \frac{h_{IV} (n_6 - 1)}{n_6 \alpha_6 - \alpha_5}, \quad r_6 = \frac{h_{IV} (1 - n_6)}{1 - n_6 \alpha_6}.$$

Расчет исходного варианта завершается определением значения третьей суммы Зейделя по следующей формуле:

$$\begin{aligned}S_{III} &= H_I^2 (P_1 + P_2) + \frac{H_{II}^2 P_3}{h_{II}} + \frac{H_{III}^2 P_4}{h_{III}} + \frac{H_{IV}^2 (P_5 + P_6)}{h_{IV}} + 2H_I (W_1 + W_2) + \\ &+ \frac{2H_{II} W_3}{h_{II}} + \frac{2H_{III} W_4}{h_{III}} + \frac{2H_{IV} (W_5 + W_6)}{h_{IV}} + \Phi_1 - \frac{\alpha_4 + \Phi_I}{h_{II}} + \frac{\alpha_5 + \alpha_4}{h_{III}} + \frac{1 - \alpha_5}{h_{IV}}.\end{aligned}$$

Таким образом, предлагаемая методика позволяет получить вариант объектива, состоящего из тонких компонентов, с заданными значениями фокусного расстояния и выноса изображения за вершину главного зеркала, а также с требуемыми значениями сумм Зейделя S_I , S_{II} , S_{IV} , S_{Ixp} .

При расчете первого исходного варианта объектива величины f' и s задаются равными номинальным значениям, а требуемые значе-

ния сумм Зейделя принимаются нулевыми. Однако практика расчета подобных систем показала, что при замене тонких компонентов линзами конечной толщины существенно изменяются значения как заднего фокусного расстояния и заднего фокального отрезка, так и аберраций третьего порядка. Особенно сильное влияние на все эти характеристики оказывает толщина первой менисковой линзы. Введение конечных толщин линз приводит к уменьшению заднего фокусного расстояния и заднего фокального отрезка. Поэтому при расчете тонкого объектива необходимо задавать значения этих характеристик больше номинальных. Суммы Зейделя после ввода реальных толщин линз также претерпевают значительные изменения, которые определяются при первоначальном расчете. При последующих вычислениях также вводятся соответствующие поправки к требуемым значениям сумм Зейделя.

После расчета нескольких вариантов объектива с различными значениями d_I , d_{II} и d_{III} для дальнейшей оптимизации выбирается вариант с наиболее близким к нулю значением третьей суммы Зейделя.

В качестве примера рассмотрим последовательность расчета по предлагаемой методике длиннофокусного зеркально-линзового объектива с фокусным расстоянием 2000 мм, относительным отверстием 1 : 12,5 и угловым полем $2\omega = 1,2^\circ$. Объектив предназначен для работы в видимой области спектра $\lambda_h \dots \lambda_C = 0,40466 \dots 0,65627$ мкм (основная длина волны $\lambda_D = 0,58929$ мкм). В качестве материала линз выберем наиболее распространенное и дешевое стекло марки К8 ($n_D = 1,5163$ и $\nu = 32,41665$). Зададим следующие значения исходных данных: $f' = 2100$ мм, $d_I = 600$ мм, $d_{II} = -d_{III} = -590$ мм, $c = 75$ мм, $S_I = -6,1$, $S_{II} = -1,2$, $S_{IV} = 1,5$, $S_{Ixp} = 0,0025$.

Приведенные осевые расстояния будут соответственно равны: $d_I = 0,28571$, $d_{II} = -d_{III} = -0,28095$, $c = 0,03571$.

Из трех корней кубического уравнения (1), равных $-0,18966$, $0,32365$ и $26,93564$, выбираем значение $h_{III} = 0,32365$, которое и будет определять коэффициент центрального экранирования системы. Оптические силы компонентов объектива и радиусы кривизны зеркал будут соответственно равны: $\Phi_I = -0,08015$, $\Phi_{II} = 2,51150$, $\Phi_{III} = -4,52339$, $\Phi_{IV} = -0,69604$, $r_3 = -1672,311$ мм, $r_4 = -928,507$ мм.

Далее, вычислив аберрационные параметры зеркал (P_3 , W_3 , P_4 , W_4) и вспомогательные коэффициенты $\delta_{23} \dots \delta_{53}$, получим при решении системы уравнений (2) значения углов первого вспомогательного луча внутри линз объектива $\alpha_2 = -2,33926$ и $\alpha_6 = 0,18904$. Тогда радиусы кривизны тонких линз будут иметь следующие значения: $r_1 = -305,5316$ мм, $r_2 = -312,5921$ мм, $r_5 = -52,4543$ мм, $r_6 = -54,2822$ мм. Таким образом, конструктивные параметры исходного варианта тонкого объектива будут определены. Его параксиальные характеристики и суммы Зейделя соответствуют заданным значениям.

На следующем этапе расчета вводятся конечные толшины линз исходя из технологических требований, а получение желаемого значения фокусного расстояния обеспечивается корректировкой воздушных промежутков.

Далее приведены осевые расстояния полученного исходного варианта объектива, его парааксиальные характеристики и значения сумм Зейделя: $d_1 = 12,5$ мм, $d_2 = 588$ мм, $d_3 = -582,7$ мм, $d_4 = 582,7$ мм, $d_5 = 7$ мм, $f' = 2000,452$ мм, $s'_{F'V} = 26,863$ мм, $S_I = 0,11315$, $S_{II} = 0,65056$, $S_{III} = -0,82799$, $S_{IV} = 1,42889$, $S_{Ixp} = -0,00046$, $S_{IIxp} = 0,00039$.

Завершающий этап расчета объектива заключается в оптимизации исходного варианта с помощью любой из известных программ автоматизированной коррекции аберраций. Оптимизация ранее рассмотренного варианта объектива выполнена с помощью программы “ОПАЛ” и получены следующие значения конструктивных параметров: $r_1 = -318,28$ мм, $r_2 = -327,13$ мм, $r_3 = -1660,47$ мм, $r_4 = -909,62$ мм, $r_5 = -147,12$ мм, $r_6 = -154,29$ мм, $d_1 = 15,66$ мм, $d_2 = 590$ мм, $d_3 = -577,67$ мм, $d_4 = 570$ мм, $d_5 = 6$ мм.

Оптимизированный объектив имеет аберрационный кружок для осевой точки изображения диаметром 0,0088 мм, а пятно рассеяния для края поля ($\omega = 36'$) составляет 0,0276 мм в меридиональном сечении и 0,0124 мм в сагиттальном сечении. Однако для максимальной длины волны диаметр дифракционного кружка Эри в данной оптической системе составляет 0,02 мм. Поэтому для точки на оси и для зоны поля ($\omega = 25,5'$) 80 % энергии будет собираться в кружке диаметром 0,025 мм, а на краю поля диаметр кружка с таким же содержанием энергии увеличится до 0,03 мм. В табл. 4 приведены значения функции передачи модуляции полученной оптической системы с учетом

Таблица 4

Значения функции передачи модуляции рассчитанного объектива

Пространственная частота ν , мм ⁻¹	Точка на оси	Точка вне оси ($\omega = 36'$)	
		меридиональное сечение	сагиттальное сечение
10	0,853	0,804	0,819
20	0,707	0,579	0,609
30	0,568	0,399	0,429
40	0,447	0,292	0,311
50	0,377	0,244	0,261
60	0,336	0,219	0,241
70	0,308	0,198	0,225

дифракции. Если в качестве приемника в фотографическом объективе используется матрица с размером элемента, например, 7 мкм, то ее оптическая разрешающая способность составляет 71 мм^{-1} , поэтому в табл. 4 максимальное значение частоты ограничено значением 70 мм^{-1} . В рассчитанном объективе контраст по уровню 0,3 наблюдается для осевой точки изображения на максимальной частоте 70 мм^{-1} , а на краю поля такой же контраст соответствует частоте 40 мм^{-1} . Все это указывает на высокое качество изображения объектива.

Предлагаемая методика показала высокую эффективность, позволяя осуществить рациональный выбор исходного варианта длиннофокусного зеркально-линзового фотографического объектива для его последующей оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Б о г а ч е в Ю. В., Б о д р о в С. В. Светосильные зеркально-линзовые объективы с двухлинзовым компенсатором // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 1996. – № 3. – С. 105–109.
2. Б о д р о в С. В., Б о г а ч е в Ю. В. Светосильные зеркально-линзовые объективы с двухлинзовым компенсатором // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 1999. – № 3. – С. 105–109.
3. Б о д р о в С. В., Б о г а ч е в Ю. В. Светосильные зеркально-линзовые объективы с двухлинзовым компенсатором // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2000. – № 3. – С. 63–69.
4. Б о д р о в С. В., Б о г а ч е в Ю. В. Методика расчета светосильного зеркально-линзового объектива со сферическими поверхностями // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2001. – № 4. – С. 76–83.
5. Б о д р о в С. В., Б о г а ч е в Ю. В. Расчет зеркально-линзовых объективов: Метод. указания для курсового и дипломного проектирования. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1998. – 35 с.
6. Ш а п о ч к и н Б. А., К и р ю ш и н С. И., Б о г а ч е в Ю. В. Расчет зеркально-линзового объектива: Учеб. пособие по курсовому и дипломному проектированию. – М.: МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1984. – 32 с.
7. З а к а з н о в Н. П., К и р ю ш и н С. И., К у з и ч е в В. И. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1992. – 448 с.

Статья поступила в редакцию 24.05.2010

Сергей Васильевич Бодров родился в 1957 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1981 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Оптико-электронные приборы научных исследований” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 40 научных работ в области расчета оптических систем оптико-электронных приборов.

S.V. Bodrov (b. 1957) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1981. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Optical and Electronic Research Instruments” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 40 publications in the field of design of optical systems of optical and electronic instruments.