

Длиннофокусный трехкомпонентный зеркально-линзовый объектив

© С.В. Бодров

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрена методика расчета длиннофокусного зеркально-линзового объектива, содержащего два зеркала Манжесена и однолинзовый компенсатор в параллельном пучке лучей. Исследованы способы улучшения качества изображения исходной оптической схемы путем оптимизации по программе OPAL.

Ключевые слова: длиннофокусный объектив, зеркало Манжесена, оптимизация оптической системы, модуляционная передаточная функция.

Для получения крупномасштабных фотографических снимков удаленных объектов применяются длиннофокусные объективы с фокусным расстоянием 1000 мм и выше. Данные объективы относятся к особой группе фотообъективов, называемых телеобъективами. Такие оптические системы по сравнению с нормальными объективами отличаются уменьшенными осевыми габаритами. Степень укорочения длины определяется коэффициентом телеобъектива

$$k_t = \frac{L}{f'},$$

где L — расстояние от вершины первой поверхности до задней фокальной плоскости.

У линзовых телеобъективов коэффициент $k_t > 0,8$. Поэтому если фокусное расстояние системы превышает 1 000 мм, то ее осевые габариты становятся недопустимо большими. Оптическая схема подобного объектива сложна и состоит из нескольких многолинзовых компонентов. Исправление хроматических аберраций линзового длиннофокусного объектива представляет собой задачу, для решения которой требуется применение особых оптических материалов, например флюорита или стекол со сверхнизкой дисперсией.

В зеркальных объективах полностью отсутствуют хроматические аберрации, осевые габариты значительно меньше по сравнению с линзовыми системами. Значение коэффициента телеобъектива зеркальных систем доходит до 0,25...0,3. Однако при отсутствии линзовых элементов аберрации наклонных пучков настолько ограничивают угловое поле, что использование зеркальных систем в ка-

честве фотографических объективов становится практически невозможным.

Таким образом, для синтеза длиннофокусных объективов оптимально подходят зеркально-линзовые оптические системы, сочетающие положительные качества как линзовой, так и зеркальной оптики. В России выпускаются зеркально-линзовые объективы с фокусным расстоянием 1 000 мм нескольких типов, например: «МТО-1000», «Рубинар» и «Астро-Рубинар» [1, 2]. За рубежом подобные системы изготавливают такие известные оптические фирмы, как Pentax, Nikon и Yashica. На рынке зеркально-линзовые объективы с фокусным расстоянием 1 000 мм достаточно широко представлены целым рядом моделей. Однако известны только два объектива с расстоянием $f' = 2\,000$ мм, которые выпускались компаниями Pentax и Nikon небольшими сериями. Система Pentax-M Reflex 2000 mm с относительным отверстием 1:13,5 состоит из восьми оптических элементов в шести группах. Более светосильный объектив Nikkor Mirror 2000 mm имеет относительное отверстие 1:11, а его оптическая схема содержит пять элементов в пяти группах [3].

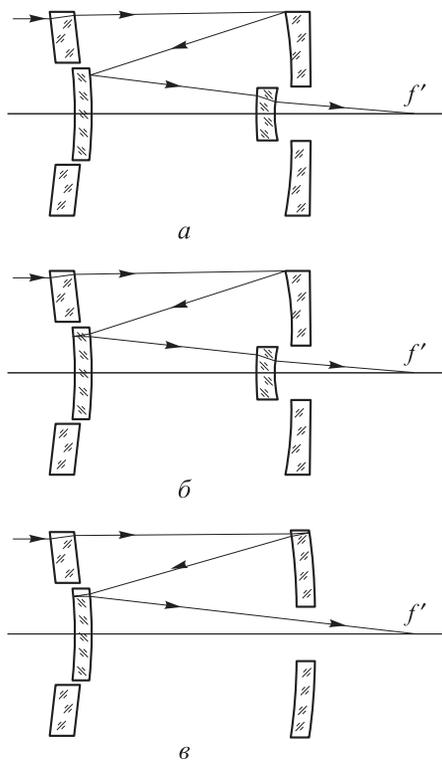


Рис. 1. Схема оптической системы зеркально-линзового объектива: *а* — с двумя сферическими зеркалами и двухлинзовым компенсатором; *б* — с контрзеркалом в виде зеркала Манжена; *в* — с двумя зеркалами Манжена и однолинзовым компенсатором

Целью данной работы является разработка методики расчета длиннофокусного зеркально-линзового объектива, который при сохранении качества изображения имеет более простую оптическую схему. При минимизации осевых габаритов системы требуется применить две отражающие поверхности, изменяющие направление хода световых лучей. Для уменьшения хроматических аберраций также необходимы как минимум два линзовых элемента. В работе [4] автором рассмотрена методика расчета объектива, состоящего из четырех оптических

компонентов (рис. 1, *а*). Первая менисковая линза расположена первой по ходу лучей перед главным зеркалом в параллельном пучке, а вторая линза находится вблизи плоскости изображения в

сходящемся после отражения от контрзеркала пучке лучей. В рассчитанном объективе контраст по уровню 0,3 наблюдался для осевой точки изображения на частоте 70 мм^{-1} , а на краю поля такой же контраст соответствовал частоте 40 мм^{-1} . В статье [5] описан расчет системы, в которой контрзеркало выполнено в виде зеркала Манжена (рис. 1, б). Это позволило повысить качество изображения для точки вне оси при сохранении прежнего числа компонентов оптической системы.

В данной работе рассмотрена методика расчета зеркально-линзового объектива с фокусным расстоянием 2 000 мм, у которого оба отражающих компонента являются зеркалами Манжена, а линзовый компенсатор в сходящемся пучке лучей отсутствует (рис. 1, в). Число компонентов такой оптической системы сокращается до трех.

Для синтеза длиннофокусного зеркально-линзового объектива выбрана схема, приведенная на рис. 2. Первый компонент системы представляет собой одиночную линзу, расположенную первой по ходу лучей в параллельном пучке. Вторым компонентом является зеркало Манжена, отражающая поверхность которого играет роль главного зеркала. Третьим компонентом объектива служит второе зеркало Манжена, отражающая поверхность которого выполняет функцию контрзеркала. На начальном этапе расчета объектива линзовые элементы считаем бесконечно тонкими.

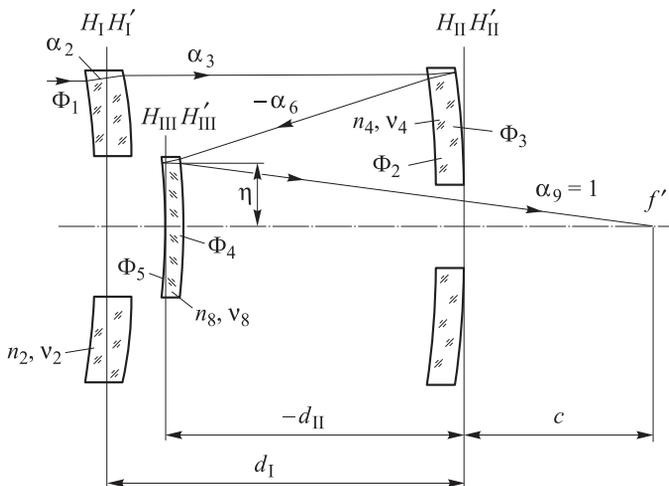


Рис. 2. Схема, выбранная для синтеза длиннофокусного трехкомпонентного зеркально-линзового объектива

Исходными данными для расчета системы являются следующие величины: d_I — расстояние между главными плоскостями первого и второго компонентов; d_{II} — расстояние между главными плоскостями второго и третьего компонентов; c — вынос изображения за глав-

ные плоскости второго компонента; Φ_1 — оптическая сила первого компонента; n_2 и ν_2 — показатель преломления и коэффициент дисперсии материала первого компонента; n_4 , n_8 и ν_4 , ν_8 — показатели преломления и коэффициенты дисперсии материалов первого и второго компонентов соответственно; S_{II} , S_{IV} , S_{Ixp} — требуемые значения второй, четвертой и первой хроматической сумм Зейделя.

Расчет исходного варианта системы начинаем с вычисления коэффициента центрального экранирования $\eta = c - d_{II}$, который равен высоте первого вспомогательного луча на главных плоскостях третьего компонента $h_{III} = \eta$. Затем находим значение высоты первого вспомогательного луча на главных плоскостях второго компонента $h_{II} = 1 - \Phi_1 d_1$. Угол первого вспомогательного луча между зеркалами Манжена определяем из отношения

$$\alpha_6 = \frac{h_{II} - \eta}{d_{II}}.$$

Значения оптических сил всех компонентов данной схемы (см. рис. 2) должны обеспечивать выполнение трех следующих условий [6]: получение заданного значения фокусного расстояния

$$\Phi_1 + h_{II}(2\Phi_2 + \Phi_3) + \eta(2\Phi_4 + \Phi_5) = 1; \quad (1)$$

получение требуемого значения четвертой суммы Зейделя

$$\frac{\Phi_1}{n_2} + \frac{2\Phi_2}{n_4} - \Phi_3 + \frac{2\Phi_4}{n_8} - \Phi_5 = S_{IV}; \quad (2)$$

получение заданного значения первой хроматической суммы S_{Ixp}

$$\frac{\Phi_1}{\nu_2} + \frac{2h_{II}^2\Phi_2}{\nu_4} + \frac{2\eta^2\Phi_4}{\nu_8} + S_{Ixp} = 0. \quad (3)$$

Предварительно необходимо вычислить ряд вспомогательных коэффициентов, которые получены из уравнений (1)–(3), выражающих приведенные выше условия:

$$\delta_1 = \frac{1 + \alpha_6}{\eta}; \quad \delta_2 = \frac{\Phi_1}{n_2} - S_{IV}; \quad \delta_3 = \frac{2}{n_4}; \quad \delta_4 = \frac{2}{n_8};$$

$$\delta_5 = \delta_4 + 2; \quad \delta_6 = \delta_1 - \delta_2; \quad \delta_7 = \frac{\Phi_1}{\nu_2} + S_{Ixp}; \quad \delta_8 = \frac{2h_{II}^2}{\nu_4};$$

$$\delta_9 = \frac{2\eta^2}{\nu_8}; \quad \delta_{10} = \delta_5\delta_8 - \delta_3\delta_9; \quad \delta_{11} = \delta_6\delta_9 + \delta_5\delta_7; \quad \delta_{12} = -\frac{\delta_9}{\delta_{10}};$$

$$\delta_{13} = -\frac{\delta_{11}}{\delta_{10}}; \quad \delta_{14} = h_{II}(2\delta_{12} + 1); \quad \delta_{15} = 2h_{II}\delta_{13} + \eta\delta_1 + \Phi_1 - 1.$$

Далее определяем оптические силы всех компонентов системы и радиусы кривизны зеркал Манжена по следующим формулам:

$$\Phi_3 = -\frac{\delta_{15}}{\delta_{14}}; \quad \Phi_2 = \Phi_3\delta_{12} + \delta_{13}; \quad \Phi_4 = \frac{\Phi_3 - \Phi_2\delta_3 + \delta_6}{\delta_5}; \quad \Phi_5 = \delta_1 - 2\Phi_4;$$

$$r_4 = -\frac{2}{\Phi_3}; \quad r_3 = r_5 = \frac{r_4(n_4 - 1)}{\Phi_2 r_4 + (n_4 - 1)}; \quad r_7 = \frac{2}{\Phi_5}; \quad r_6 = r_8 = \frac{r_7(n_8 - 1)}{(n_8 - 1) - r_7\Phi_4}.$$

Значения углов и высот первого вспомогательного луча, необходимые для дальнейших вычислений, находим из известных формул [7]:

$$\alpha_1 = 0; \quad h_1 = h_2 = 1; \quad \alpha_3 = \Phi_1; \quad h_3 = h_4 = h_5 = h_{II}; \quad \alpha_4 = \frac{\Phi_1}{n_4} + \frac{(n_4 - 1)h_3}{n_4 r_3};$$

$$\alpha_5 = -\alpha_4 + \frac{2h_4}{r_4}; \quad \alpha_6 = \frac{h_{II} - \eta}{d_{II}}; \quad h_6 = h_7 = h_8 = \eta;$$

$$\alpha_7 = -\frac{\alpha_6}{n_7} + \frac{(n_7 + 1)h_6}{n_7 r_6}; \quad \alpha_8 = -\alpha_7 + \frac{2h_7}{r_7}; \quad \alpha_9 = 1.$$

Апертурной диафрагмой данного зеркально-линзового объектива является оправа второго компонента. Тогда углы и высоты второго вспомогательного луча будут:

$$\beta_1 = 1; \quad H_1 = H_2 = \frac{d_1}{h_{II}}; \quad \beta_3 = \frac{1}{h_{II}}; \quad H_3 = H_4 = H_5 = 0;$$

$$\beta_6 = -\beta_3; \quad H_6 = H_7 = H_8 = \frac{d_{II}}{h_{II}}.$$

Аберрационные поверхностные параметры второго ($P_3, P_4, P_5, W_3, W_4, W_5$) и третьего ($P_6, P_7, P_8, W_6, W_7, W_8$) компонентов определяем по формулам [7]:

$$P_3 = \frac{(\alpha_4 - \Phi_1)^2 (\alpha_4 \mu_4 - \Phi_1)}{(\mu_4 - 1)^2}; \quad W_3 = \frac{(\alpha_4 - \Phi_1)(\alpha_4 \mu_4 - \Phi_1)}{\mu_4 - 1};$$

$$P_4 = -\frac{(\alpha_5 - \alpha_4)^2 (\alpha_5 + \alpha_4)}{4\mu_4}; \quad W_4 = \frac{\alpha_5^2 - \alpha_4^2}{2};$$

$$P_5 = \frac{(\alpha_6 - \alpha_5)^2 (\alpha_5 \mu_4 - \alpha_6)}{(\mu_4 - 1)^2}; \quad W_5 = \frac{(\alpha_6 - \alpha_5)(\alpha_5 \mu_4 - \alpha_6)}{\mu_4 - 1};$$

$$P_6 = \frac{(\alpha_7 - \alpha_6)^2 (\alpha_6 - \alpha_7 \mu_8)}{(1 - \mu_8)^2}; \quad W_6 = \frac{(\alpha_7 - \alpha_6)(\alpha_6 - \alpha_7 \mu_8)}{1 - \mu_8};$$

$$P_7 = \frac{(\alpha_8 - \alpha_7)^2 (\alpha_8 + \alpha_7)}{4\mu_8}; \quad W_7 = \frac{\alpha_8^2 - \alpha_7^2}{2};$$

$$P_8 = \frac{(1 - \alpha_8)^2 (1 - \alpha_8 \mu_8)}{(1 - \mu_8)^2}; \quad W_8 = \frac{(1 - \alpha_8)(1 - \alpha_8 \mu_8)}{1 - \mu_8},$$

где $\mu_4 = \frac{1}{n_4}$; $\mu_8 = \frac{1}{n_8}$.

Свободным параметром остается один угол α_2 первого вспомогательного луча, который определяет форму линзы первого компонента. Его значение находят из условия получения заданного значения второй суммы Зейделя S_{II} с помощью выражения

$$H_1(P_1 + P_2) + H_6(P_6 + P_7 + P_8) + W_1 + W_2 + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + \\ + W_7 + W_8 - S_{II} = 0.$$

Предварительно вычисляют значения второго блока вспомогательных коэффициентов, которые позволяют упростить выражения для абберационных поверхностных параметров линзы первого компонента объектива (P_1, P_2 и W_1, W_2):

$$\delta_{16} = \frac{\mu_2}{\mu_2 - 1}; \quad \delta_{17} = \frac{1}{(1 - \mu_2)^2}; \quad \delta_{18} = \Phi_1^3 \delta_{18}; \quad \delta_{19} = \Phi_1^2 \delta_{18} (2 + \mu_2);$$

$$\delta_{20} = \Phi_1 \delta_{18} (1 + 2\mu_2); \quad \delta_{21} = (1 - \mu_2)^{-1}; \quad \delta_{22} = \Phi_1^2 \delta_{23}; \quad \delta_{23} = \Phi_1 \delta_{23} (\mu_2 + 1);$$

$$\delta_{24} = \delta_{23} \mu_2; \quad \delta_{25} = H_6(P_6 + P_7 + P_8) + W_3 + W_4 + W_5 + W_6 + W_7 + W_8 - S_{II}.$$

Значение угла первого вспомогательного луча внутри линзы первого компонента α_2 находят при решении следующего квадратного уравнения:

$$A\alpha_2^2 + B\alpha_2 + C = 0, \quad (4)$$

где $A = H_1 \delta_{20} + \delta_{16} + \delta_{24}$; $B = -(H_1 \delta_{19} + \delta_{23})$; $C = H_1 \delta_{18} + \delta_{22} + \delta_{25}$.

Определив значения угла α_2 , вычисляем величины радиусов кривизны первого компонента объектива [7]:

$$r_1 = \frac{n_2 - 1}{n_2 \alpha_2}; \quad r_2 = \frac{1 - n_2}{\Phi_1 - n_2 \alpha_2}.$$

В завершение расчета исходного варианта найдем значения первой и третьей сумм Зейделя по формулам

$$S_I = P_1 + P_2 + h_3(P_3 + P_4 + P_5) + h_6(P_6 + P_7 + P_8);$$

$$S_{III} = H_1^2(P_1 + P_2) + \frac{H_6^2(P_6 + P_7 + P_8)}{\eta} + 2H_1(W_1 + W_2) +$$

$$+ \frac{2H_6(W_6 + W_7 + W_8)}{\eta} + \Phi_1 - \frac{\alpha_6 + \Phi_1}{h_3} + \frac{1 + \alpha_6}{\eta},$$

предварительно вычислив поверхностные абберрационные параметры первого компонента (P_1 , P_2 и W_1 , W_2):

$$P_1 = \frac{\alpha_2^3 \mu_2}{(\mu_2 - 1)^2}; \quad P_2 = \delta_{18} - \alpha_2 \delta_{19} + \alpha_2^2 \delta_{20} - \alpha_2^3 \delta_{17} \mu_2;$$

$$W_1 = \alpha_2^2 \delta_{16}; \quad W_2 = \delta_{22} - \alpha_2 \delta_{23} + \alpha_2^2 \delta_{24}.$$

Таким образом, предлагаемая методика позволяет получить исходный вариант объектива, состоящего из тонких компонентов, с заданными величинами фокусного расстояния и выноса изображения за главные плоскости второго компонента, а также с требуемыми значениями сумм Зейделя S_{II} , S_{IV} и $S_{I \text{ xp}}$.

Введение конечных толщин в вариант объектива с тонкими линзовыми компонентами не приводит к заметному изменению фокусного расстояния и заднего фокального отрезка, поэтому при расчете исходного варианта объектива с тонкими компонентами можно задавать такие величины этих характеристик, которые равны номинальным значениям. Суммы Зейделя также после ввода конечных значений толщин линзовых элементов не претерпевают изменений, поэтому не требуется вводить каких-либо поправок для получения желаемых значений сумм Зейделя.

Завершающим этапом синтеза объектива является оптимизация исходного варианта с помощью одной из известных программ автоматизированного расчета оптических систем, например OPAL или ZEMAX. После расчета нескольких вариантов с различными значениями исходных величин d_I и d_{II} для оптимизации выбираем объектив с наиболее близкими к нулю значениями первой и третьей сумм Зейделя.

В качестве примера рассмотрим расчет по предлагаемой методике длиннофокусного зеркально-линзового объектива со следующими основными характеристиками: $f' = 2\,000$ мм; $1:K = 1:11$ и $2\omega = 1,2^\circ$. Объектив предназначен для работы в области спектра $\lambda_h \dots \lambda_c =$

$= 0,40466\dots 0,65627$ мкм (основная длина волны $\lambda_D = 0,58929$ мкм). В качестве материала всех линзовых компонентов используем самое распространенное и дешевое стекло марки К8 ($n_D = 1,5163$ и $\nu = 32,4207$). Зададим следующие значения исходных данных: $f' = 2\,000$ мм; $c = 70$ мм; $\Phi_1 = 0,4$; $d_1 = 600$ мм; $d_{II} = -590$ мм; $S_{II} = 0$; $S_{IV} = 0$; $S_{I\text{xp}} = 0,00011$. Приведенные величины осевых расстояний будут соответственно: $d_1 = 0,3$; $d_{II} = -0,295$; $c = 0,035$.

В результате расчета получаем следующие оптические силы компонентов объектива: $\Phi_2 = -0,243099$; $\Phi_3 = 2,150297$; $\Phi_4 = -0,124215$; $\Phi_5 = -2,37098$. Соответственно радиусы кривизны поверхностей обоих зеркал Манжена будут: $r_3 = r_5 = -1\,293,663$ мм; $r_4 = -18\,602,08$ мм; $r_6 = r_8 = -2\,116,613$ мм; $r_7 = -1\,687,063$ мм.

Далее последовательно вычисляем значения углов и высот вспомогательных лучей, абберационных параметров зеркал Манжена и величины вспомогательных коэффициентов $\delta_{16}\dots\delta_{25}$. Решение квадратного уравнения (4) дает два корня: $0,7541837$ и $0,4192997$. Для дальнейших расчетов выбираем значение угла первого вспомогательного луча внутри линзового компенсатора $\alpha_2 = 0,4192997$. При этом радиусы кривизны тонкого линзового компенсатора будут иметь следующие значения: $r_1 = 1\,624,136$ мм, $r_2 = 4\,379,429$ мм. Таким образом, конструктивные параметры исходного варианта тонкого объектива полностью определены, а его парааксиальные характеристики и величины сумм Зейделя соответствуют заданным значениям.

На следующем этапе расчета введем конечные толщины линзовых элементов системы, исходя из технологических требований. Получение требуемого значения фокусного расстояния обеспечивается корректировкой воздушных промежутков d_2 и d_5 . Ниже приведены осевые расстояния варианта объектива с конечными толщинами линзовых компонентов, его парааксиальные характеристики и значения сумм Зейделя: $d_1 = 17$ мм; $d_2 = 575$ мм; $d_3 = 15$ мм; $d_4 = -15$ мм; $d_5 = -565$ мм; $d_6 = -6$ мм; $d_7 = 6$ мм; $f' = 1987,94$ мм; $s'_{f'} = 661,64$ мм; $S_I = -0,2294$; $S_{II} = -0,005$; $S_{III} = 1,347$; $S_{IV} = 0$; $S_V = 2,4437$; $S_{I\text{xp}} = 0$; $S_{II\text{xp}} = -0,0048$.

Заключительным этапом расчета объектива является оптимизация исходного варианта с помощью любой из известных программ автоматизированной коррекции aberrаций. Оптимизация рассматриваемого варианта объектива выполнена по волновым aberrациям с помощью программы OPAL. В результате получены следующие конструктивные параметры: $r_1 = 2\,956,995$ мм; $r_2 = -21\,791$ мм; $r_3 = -1\,097,144$ мм; $r_4 = -1\,718,572$ мм; $r_5 = -1\,097,144$ мм; $r_6 = -669,761$ мм; $r_7 = -1\,054,472$ мм; $r_8 = -669,761$ мм; $d_1 = 18$ мм; $d_2 = 581$ мм; $d_3 = 17$ мм; $d_4 = -17$ мм; $d_5 = -574$ мм; $d_6 = -6$ мм; $d_7 = 6$ мм.

Данный объектив имеет абберационный кружок для осевой точки изображения диаметром 0,0304 мм, а пятно рассеяния для края поля ($\omega = 36'$) составляет 0,01476 мм в меридиональном сечении и 0,00976 мм — в сагиттальном. Диаметр дифракционного кружка Эри в данной оптической системе составляет около 18 мкм. Рассчитанный объектив фокусирует в кружок такого диаметра 59 % энергии осевого пучка, на зоне поля ($\omega = 25'27''$) доля собранной энергии увеличивается до 65 %, а на краю поля ее величина составляет 60 %.

В таблице приведены значения модуляционной передаточной функции синтезированной оптической системы с учетом дифракции. В рассчитанном объективе контраст по уровню 0,3 наблюдается для осевой точки изображения на частоте 72 мм^{-1} , а на краю поля такой же контраст соответствует частоте 52 мм^{-1} в меридиональном сечении и 76 мм^{-1} — в сагиттальном. Все это говорит о высокой эффективности применения предлагаемой методики.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Абрамов Г. *Этапы развития отечественного фотоаппаратостроения*. URL: <http://www.photohistory.ru> (дата обращения 23.04.2013).
- [2] *Объективы Лыткаринского завода оптического стекла* (технические характеристики). URL: <http://www.lzos.ru> (дата обращения 16.03.2013).
- [3] *Nikkor Mirror lenses*. URL: <http://www.nicovandijk.net/mirrorlenses.htm> (дата обращения 12.03.2013).
- [4] Бодров С.В. Методика расчета длиннофокусного зеркально-линзового фотографического объектива. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 4, с. 18–26.
- [5] Бодров С.В. Синтез длиннофокусного зеркально-линзового объектива. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. № 1, опубликовано 05.03.2013. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/516.html>
- [6] Дубовик А.П., Апенко А.С., Дурейко Г.В., Жилкин А.М., Запругаева Л.А., Романов Д.А., Свешникова И.С. *Прикладная оптика*. Москва, Недра, 1982, 612 с.
- [7] Заказнов Н.П., Кирюшин С.И., Кузичев В.И. *Теория оптических систем*. 4-е изд., стер. Санкт-Петербург, Изд-во «Лань», 2008, 448 с.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Бодров С.В. Длиннофокусный трехкомпонентный зеркально-линзовый объектив. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/824.html>

Бодров Сергей Васильевич 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.