

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ДЛИННОФОКУСНОГО СВЕТОСИЛЬНОГО ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

В.И. Заварзин¹

zavarzin@bmstu.ru

С.В. Бодров¹

bodrov@bmstu.ru

М.К. Крылова²

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

² АО «НПЦАП», Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рост числа искусственных спутников Земли в околоземном космическом пространстве вызывает необходимость разработки оптико-электронных систем для дистанционного зондирования Земли и мониторинга космического пространства. Предложена оптическая схема длиннофокусного светосильного зеркально-линзового объектива и разработан методика его расчета. Схема объектива состоит из выпукло-плоской линзы, зеркала Манжена и двухлинзового компенсатора, установленного перед плоскостью изображения. Оптические элементы объектива объединены в три компонента. Выполнен расчет объектива с фокусным расстоянием 1500 мм, относительным отверстием $1 : 2,4$, угловым полем $2\omega = 2^\circ 22'$, который имеет высокое качество изображения при обеспечении оптимальных массогабаритных характеристик. Максимальный диаметр компонентов объектива и осевые габариты от вершины первой поверхности до плоскости изображения составляют 0,4 и 0,6 от фокусного расстояния соответственно. Показано, что при сравнительно несложной конструкции в предложенной оптической схеме можно получить достаточно совершенную коррекцию сферической аберрации, хроматизма и меридиональной комы. Наличие в системе четырех линзовых элементов, выполненных из трех обычных оптических материалов, позволяет исключить асферические поверхности, тем самым делая систему более технологичной при производстве и контроле ее элементов. Это дает возможность применять такую схему для

Ключевые слова

Зеркально-линзовый объектив, длиннофокусный объектив, контроль космического пространства, дистанционное зондирование Земли

создания оптико-электронной аппаратуры, характеризующейся простотой реализации в результате использования хорошо освоенных технологий изготовления линзовых и зеркальных элементов

Поступила 13.05.2024

Принята 09.07.2024

© Автор(ы), 2025

Введение. В настоящее время создание и развитие космических средств и технологий дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) является одним из важнейших направлений применения космической техники для бизнеса, социально-экономических и научных целей. В последние годы происходит резкий рост числа искусственных спутников Земли (ИСЗ) в околоземном космическом пространстве (КП) [1]. С их использованием решается множество научных, технических и экономических задач. Постоянно обновляемые базы данных ДЗЗ являются наиболее оперативными и эффективными инструментами получения объективной информации о состоянии и динамических изменениях земных ландшафтов и инфраструктурных объектов. Потребность в систематической сплошной съемке земной поверхности в оптическом диапазоне с минимальным временным интервалом между просмотром любого района постоянно возрастает и требует увеличения числа космических аппаратов (КА) на орбите. Кроме того, КА обеспечивают предоставление широкого спектра услуг по навигации, метеорологии, связи, доступу к сети Интернет и т. д. Время, в течение которого действующие ИСЗ функционируют на орбите, измеряется годами и десятилетиями, однако после истечения срока службы все они неизбежно переходят в разряд космического мусора (КМ). В настоящее время на орбите Земли находится более 23 тыс. известных и задокументированных единиц КМ размером более 10 см, и это число непрерывно увеличивается [2]. К таким объектам относятся не только вышедшие из строя ИСЗ, но и ступени ракет-носителей, а также обломки столкнувшихся КА. Наибольшую опасность представляют крупные элементы КМ, поэтому наряду с ДЗЗ необходимо осуществлять постоянный мониторинг околоземного КП для получения информации о назначении, принадлежности, состоянии и параметрах орбит как действующих КА, так и КМ. Эти сведения должны регулярно обновляться на основе результатов наблюдений.

Для решения перечисленных задач требуется современная аппаратура, во всем мире широко применяют оптический диапазон длин волн. Массогабаритные характеристики оптико-электронной аппаратуры во многом определяются оптической схемой (ОС) и технологическими возможностями ее реализации. В связи с этим разработка ОС, предназначенных для решения указанных задач, является актуальной задачей [3–9]. Подобные

системы также могут применяться для поиска и расчета траектории движения комет и астероидов [10].

Постановка задачи. Для синтеза длиннофокусных объективов, имеющих небольшие осевые габариты, часто используют зеркальные схемы. Зеркальные объективы имеют простую ОС, содержащую два или три зеркала. Как правило, зеркала должны быть асферическими, поэтому угловое поле таких систем ограничено [11]. Особый интерес представляют высокоапертурные зеркально-линзовые системы, не содержащие асферические поверхности. При сравнительно несложной конструкции с использованием линзовых компенсаторов можно получить достаточно совершенную коррекцию сферической аберрации и меридиональной комы. Наличие в системе линзовых элементов позволяет уйти от асферических поверхностей, что делает систему более технологичной при производстве и контроле ее элементов [12–17]. Классические ОС и методы их расчета уже не могут в полной мере обеспечить все возрастающие требования к ОС.

Цель работы — поиск ОС и разработка методики расчета светосильного длиннофокусного зеркально-линзового объектива с улучшенными оптическими и эксплуатационными характеристиками для перспективной и высокоэффективной оптико-электронной аппаратуры контроля КП или ДЗЗ.

Решение задачи. Значительные достижения последнего времени в области оптического приборостроения в значительной мере стали возможны вследствие появления новых высококласных ОС, имеющих повышенные характеристики и близкое к дифракционному качество изображения. Объектив должен иметь минимальную массу и габариты, а также обеспечивать достаточную прочность для сохранения характеристик в процессе транспортировки и эксплуатации. Одним из направлений развития таких систем является повышение технологичности конструкции объектива, т. е. обеспечение заданных свойств при сокращении числа оптических элементов. Рассмотрим схему зеркально-линзового объектива, состоящую из трех компонентов (рис. 1). Первый компонент по направлению хода лучей является выпукло-плоской линзой, после прохождения которой излучение попадает на второй компонент — зеркало Манжена. Отражающее покрытие этого компонента играет в схеме роль главного зеркала. Отраженный от зеркала Манжена свет приходит на плоское контрзеркало, функцию которого выполняет отражающее покрытие, нанесенное в центральной части второй поверхности выпукло-плоской линзы. Затем излучение проходит через третий компонент — двухлинзовый компенсатор — и создает действительное изображение в задней фокальной плоскости объектива, где устанавливается матричный приемник излучения.

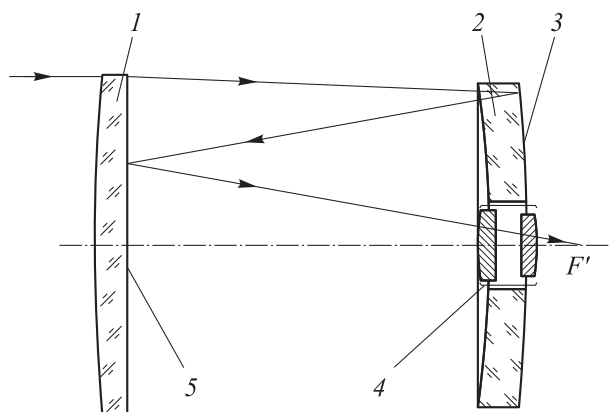


Рис. 1. Схема зеркально-линзового объектива:

1 — выпукло-плоская линза; 2, 3 — зеркало Манжена; 4 — двухлинзовый компенсатор;
5 — плоское контрзеркало

Расчет ОС зеркально-линзового объектива выполним в три этапа. На первом этапе проведем габаритный расчет, получив значения оптических сил компонентов, на втором — определим форму линз компенсатора из условия исправления сферической aberrации объектива и меридиональной комы третьего порядка, на третьем — выполним оптимизацию полученного исходного варианта объектива.

На первом этапе расчета все линзовые компоненты системы будем полагать тонкими (рис. 2). Условия нормировки для этой ОС: $h_1 = f' = 1$, $\alpha_1 = 0$, $\alpha_{11} = 1$.

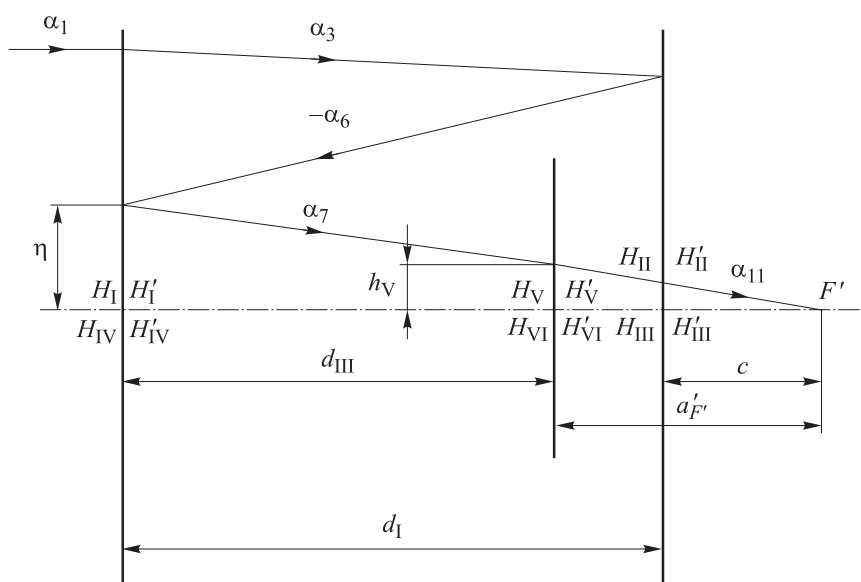


Рис. 2. Схема объектива из тонких компонентов

Исходные данные для габаритного расчета: расстояние от главных точек выпукло-плоской линзы до зеркала Манжена d_I ; расстояние от главных точек контрзеркала до линзового компенсатора d_{III} ; вынос изображения за вершину тонкого зеркала Манжена c ; коэффициент линейного экранирования η ; показатель преломления n_2 и коэффициент дисперсии ν_2 материала первой по направлению хода лучей выпукло-плоской линзы; показатель преломления n_4 и коэффициент дисперсии ν_4 материала зеркала Манжена; показатели преломления n_8, n_{10} и коэффициенты дисперсии ν_8, ν_{10} материалов первой и второй линз компенсатора; заданные значения первой (S_{I3}), второй (S_{II3}) и четвертой (S_{IV3}) сумм Зейделя.

Габаритный расчет объектива начинается с вычисления заднего фокального отрезка тонкой системы

$$a'_{F'} = d_I - d_{III} + c. \quad (1)$$

Причем ему будут равны значения приведенных высот первого вспомогательного луча на главных плоскостях тонких линз компенсатора $a'_{F'} = h_V = h_{VI}$.

Угол первого вспомогательного луча между зеркалом Манжена и контрзеркалом:

$$\alpha_6 = \frac{a'_{F'} - \eta}{d_{III}}. \quad (2)$$

Поскольку контрзеркало плоское, угол α_6 после отражения от него будет равен $\alpha_7 = -\alpha_6$.

Оптическую силу первой выпукло-плоской линзы Φ_I и высоту первого вспомогательного луча на главных плоскостях зеркала Манжена h_{II} определяют следующим образом:

$$\Phi_I = \frac{d_I (a'_{F'} - \eta) - d_{III} (\eta - 1)}{d_I d_{III}}, \quad (3)$$

$$h_{II} = 1 - \Phi_I d_I.$$

Далее находятся оптические силы линзовой составляющей зеркала Манжена Φ_{II} , зеркальной части зеркала Манжена Φ_{III} , первой (Φ_V) и второй (Φ_{VI}) линз компенсатора. Значения оптических сил всех компонентов определяют по формулам:

$$\Phi_V = \frac{\delta_8 \delta_{10} - \delta_9 + \delta_1 + 2 \delta_8 - \delta_2 \delta_{12}}{\delta_7 \delta_{10} + 2 \delta_7 + \delta_{11} - \delta_{12}}, \quad (4)$$

$$\Phi_{VI} = \delta_2 - \Phi_V, \quad \Phi_{II} = \Phi_V \delta_7 - \delta_8, \quad \Phi_{III} = \delta_1 - 2\Phi_{II}.$$

Предварительно вычисляют вспомогательные коэффициенты:

$$\begin{aligned}\delta_1 &= -\frac{(\Phi_I + \alpha_6)}{h_{II}}, \delta_2 = \frac{1 - \alpha_7}{a'_{F'}}, \delta_3 = \frac{\Phi_I}{v_2}, \delta_4 = \frac{2h_{II}^2}{v_4}, \\ \delta_5 &= \frac{a'^2_{F'}}{v_8}, \delta_6 = \frac{a'^2_{F'}}{v_{10}}, \delta_7 = \frac{\delta_6 - \delta_5}{\delta_4}, \delta_8 = \frac{\delta_6 \delta_2 + \delta_3}{\delta_4}, \\ \delta_9 &= \frac{\Phi_I}{n_2} - S_{IV3}, \delta_{10} = \frac{2}{n_4}, \delta_{11} = \frac{1}{n_8}, \delta_{12} = \frac{1}{n_{10}}.\end{aligned}$$

Найденные оптические силы компонентов системы обеспечивают получение желаемого значения фокусного расстояния объектива, исправление хроматической аберрации положения ($S_{I\text{ xp}} = 0$) и заданное значение четвертой суммы Зейделя.

Далее рассчитывают приведенные значения радиусов кривизны выпукло-плоской линзы и тонкого зеркала Манжена:

$$r_1 = \frac{n_2 - 1}{\Phi_I}, \quad r_2 = r_6 = \infty, \quad r_4 = -\frac{2}{\Phi_{III}}, \quad r_3 = \frac{(n_4 - 1)r_4}{\Phi_2 r_4 + (n_4 - 1)}. \quad (5)$$

Форма линз компенсатора, установленного в сходящемся после контрзеркала пучке лучей, определяется углами первого вспомогательного луча α_8 и α_{10} , которые находят при решении системы нелинейных уравнений

$$\begin{aligned}\alpha_8^2 \delta_{34} + \alpha_8 \delta_{35} + \alpha_{10}^2 \delta_{36} + \alpha_{10} \delta_{37} + \delta_{38} &= 0; \\ \alpha_8^2 \delta_{29} + \alpha_8 \delta_{30} + \alpha_{10}^2 \delta_{31} + \alpha_{10} \delta_{32} + \delta_{33} &= 0.\end{aligned} \quad (6)$$

Предварительно вычисляют значение угла первого вспомогательного луча между линзами компенсатора

$$\alpha_9 = h_V \Phi_V - \alpha_6. \quad (7)$$

С использованием формулы для углов и высот [18] необходимо определить высоту второго вспомогательного луча на главных плоскостях тонкого зеркала Манжена H_{II} и тонкого компенсатора H_V .

Входящие в систему уравнений коэффициенты вычисляют по формулам:

$$\begin{aligned}\delta_{13} &= S_{I3} - P_1 - P_2 - h_{II} (P_3 + P_4 + P_5), \\ \delta_{14} &= \frac{1}{(\mu_8 - 1)^2}, \delta_{15} = (2\mu_8 + 1)(\alpha_9 - \alpha_7), \\ \delta_{18} &= \frac{1}{(\mu_{10} - 1)^2}, \delta_{19} = (2\mu_{10} + 1)(1 - \alpha_9),\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\delta_{16} &= (\mu_8 + 2)(\alpha_7^2 - \alpha_9^2), \delta_{17} = \alpha_9^3 - \alpha_7^3, \\
\delta_{20} &= (\mu_{10} + 2)(\alpha_9^2 - 1), \delta_{21} = 1 - \alpha_9^3, \\
\delta_{22} &= S_{II3} - H_{II}(P_3 + P_4 + P_5) - W_1 - W_2 - W_3 - W_4 - W_5, \\
\delta_{23} &= \frac{1}{\mu_8 - 1}, \delta_{24} = (1 + \mu_8)(\alpha_9 - \alpha_7), \delta_{25} = \alpha_7^2 - \alpha_9^2, \delta_{26} = \frac{1}{\mu_{10} - 1}, \\
\delta_{27} &= (1 + \mu_{10})(1 - \alpha_9), \delta_{28} = \alpha_9^2 - 1, \delta_{29} = H_V \delta_{14} \delta_{15}, \\
\delta_{30} &= H_V \delta_{14} \delta_{16} + \delta_{23} \delta_{24}, \delta_{31} = H_V \delta_{18} \delta_{19}, \delta_{32} = H_V \delta_{18} \delta_{20} + \delta_{26} \delta_{27}, \\
\delta_{33} &= H_V (\delta_{14} \delta_{17} + \delta_{18} \delta_{21}), \delta_{34} = h_V \delta_{14} \delta_{15}, \delta_{35} = h_V \delta_{14} \delta_{16}, \\
\delta_{36} &= h_V \delta_{18} \delta_{19}, \delta_{37} = h_V \delta_{18} \delta_{20}, \delta_{38} = h_V (\delta_{14} \delta_{17} + \delta_{18} \delta_{21}) - \delta_{13}, \\
\mu_8 &= 1/n_8, \mu_{10} = 1/n_{10}, P_k = (\delta\alpha_k / \delta\mu_k)^2 \delta(\alpha_k \mu_k), \\
W_k &= \left(\frac{\delta\alpha_k}{\delta\mu_k} \right) \delta(\alpha_k \mu_k).
\end{aligned}$$

Значения приведенных радиусов кривизны линз компенсатора [18]:

$$r_7 = \frac{h_V (n_8 - 1)}{n_8 \alpha_8 - \alpha_7}, r_8 = \frac{h_V (1 - n_8)}{\alpha_9 - n_8 \alpha_8}, r_9 = \frac{h_V (n_{10} - 1)}{n_{10} \alpha_{10} - \alpha_9}, r_{10} = \frac{h_V (1 - n_{10})}{1 - n_{10} \alpha_{10}}. \quad (8)$$

В результате габаритного расчета и расчета в области аберраций третьего порядка, выполненных по (1)–(8), будут получены значения конструктивных параметров объектива с тонкими линзовыми компонентами. Далее необходимо по методикам из [18] ввести реальные значения радиусов и толщин линз и на третьем этапе расчета выполнить оптимизацию исходного варианта.

Пример. По предлагаемой методике выполним расчет объектива с исходными данными: $d_I = 0,45$; $d_{III} = 0,42$; $c = 0,08$; $\eta = 0,5$; $n_2 = n_4 = 1,5164$ (К8); $v_2 = v_4 = 31,681$; $n_8 = 1,4875$ (ЛК3); $v_8 = 34,331$; $n_{10} = 1,8064$ (ТФ10); $v_{10} = 13,091$.

Согласно методике, по (1)–(3) находим значения заднего фокального отрезка системы из тонких компонентов, угла первого вспомогательного луча и оптической силы выпукло-плоской линзы: $a'_{F'} = 0,11$; $\alpha_6 = -0,92856$; $\Phi_I = 0,18254$. Оптические силы остальных компонентов объектива, вычисленные по (4): $\Phi_{II} = -0,06878$; $\Phi_{III} = 0,95035$; $\Phi_V = 4,72874$; $\Phi_{VI} = -4,07939$.

Приведенные к единичному фокусному расстоянию значения радиусов кривизны выпукло-плоской линзы и тонкого зеркала Манжена, согласно (5): $r_1 = 2,82897$; $r_2 = r_6 = \infty$; $r_3 = r_5 = -1,64376$; $r_4 = -2,10448$. Угол первого вспомогательного луча между линзами компенсатора, вычисленный по (7): $\alpha_9 = 1,44873$.

После вычисления вспомогательных коэффициентов $\delta_{13} - \delta_{38}$ при решении системы нелинейных уравнений (6) находим значения углов первого вспомогательного луча: $\alpha_8 = 1,509$; $\alpha_{10} = 0,921$.

Завершается расчет в области аббераций третьего порядка определением приведенных значений радиусов кривизны линз компенсатора (8): $r_7 = 0,04075$; $r_8 = 0,06737$; $r_9 = 0,41259$; $r_{10} = 0,13365$.

Получены конструктивные параметры зеркально-линзового объектива с тонкими линзовыми компонентами. На третьем этапе проектирования выполним оптимизацию исходного варианта с реальными значениями конструктивных параметров.

С использованием предлагаемой методики рассчитана ОС со следующими основными характеристиками: заднее фокусное расстояние $f' = 1500$ мм, относительное отверстие $1 : K = 1 : 2,38$, угловое поле в пространстве предметов $2\omega = 2^\circ 22'$. Объектив рассчитан для работы в спектральном диапазоне $0,45 \dots 0,9$ мкм при основной длине волны излучения $\lambda_0 = 0,587$ мкм.

После оптимизации исходного варианта системы, выполненной с использованием программы *Zemax*® [19, 20], получены значения конструктивных параметров объектива (табл. 1). Последним компонентом системы является защитное стекло матричного приемника.

Таблица 1

Значения конструктивных параметров зеркально-линзового объектива

Радиус, мм	Толщина, мм	Материал	Показатель преломления для $\lambda_0 = 0,587$ мкм
–	–	Воздух	1,0
3403	57	К8	1,516396
∞	675	Воздух	1,0
–1927	58,5	К8	1,516396
–3051	–58,5	–К8	–1,516396
–1927	–675	–Воздух	–1,0
∞	660	Воздух	1,0
527,9	28	ЛК3	1,487480

Окончание табл. 1

Радиус, мм	Толщина, мм	Материал	Показатель преломления для $\lambda_0 = 0,587$ мкм
-2086	46	Воздух	1,0
-345,7	15	ТФ10	1,806363
-371,8	75,3	Воздух	1,0
∞	7,0	К8	1,516396
∞	–	Воздух	1,0

Светосильный зеркально-линзовый объектив имеет следующие аберрации для длины волны 0,587 мкм (по абсолютному значению): поперечная сферическая аберрация не более 0,0016 мм, меридиональная кома не более 0,014 мм; астигматическая разность не более 0,023 мм; дисторсия не более 0,12 %.

Эта система фокусирует изображение в кружок диаметром 0,02 мм; 85,2 % энергии для осевого пучка, 83,5 % для зоны поля и 82,5 % энергии для пучка на краю поля. Значения модуляционно-передаточной функции (МПФ) синтезированного объектива приведены в табл. 2.

Таблица 2

Значения МПФ синтезированного объектива с учетом дифракции

Частота, мм ⁻¹	$\omega = 0$	$\omega = -1^{\circ}11'05''$	$\omega = -0^{\circ}50'17''$
		Меридиональное / сагиттальное сечение	Меридиональное / сагиттальное сечение
5	0,99	0,98 / 0,98	0,98 / 0,98
10	0,96	0,93 / 0,95	0,94 / 0,96
15	0,93	0,88 / 0,92	0,90 / 0,92
20	0,90	0,82 / 0,88	0,85 / 0,89
25	0,87	0,77 / 0,84	0,80 / 0,85
30	0,84	0,72 / 0,80	0,76 / 0,81
35	0,80	0,66 / 0,76	0,71 / 0,78
40	0,77	0,61 / 0,73	0,67 / 0,74
45	0,75	0,55 / 0,70	0,62 / 0,71
50	0,72	0,50 / 0,67	0,58 / 0,69

Диаграмма пятен рассеяния полученной ОС, по результатам анализа которой максимальный среднеквадратический радиус пятна рассеяния (RMS) составляет 6,4 мкм, показана на рис. 3.

Приведенные результаты свидетельствуют о высоком качестве изображения рассчитанного объектива.

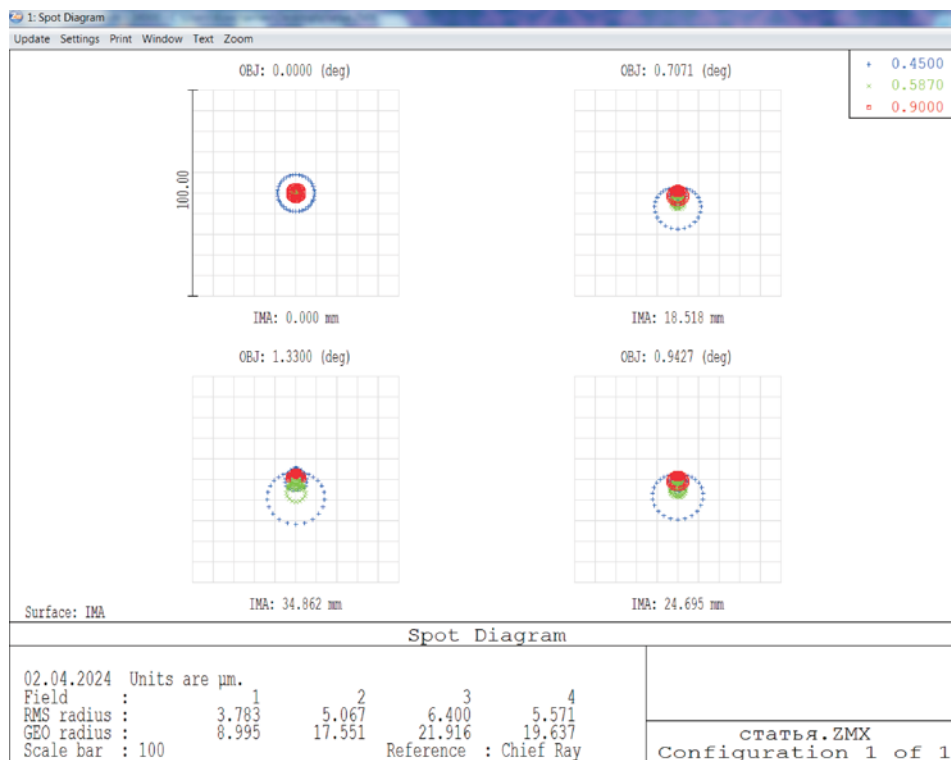


Рис. 3. Диаграмма пятен рассеяния ОС в программе Zemax®

Обсуждение полученных результатов. Предлагаемая ОС позволяет решить достаточно сложную задачу синтеза светосильного длиннофокусного объектива с использованием простой и экономичной элементной базы, включающей в себя плоские и сферические поверхности. Схема является технологичной, так как состоит только из трех компонентов и в ней отсутствуют подвижные механические детали. Контрзеркало в объективе плоское и нанесено на поверхность линзовой детали, что не требует дополнительной оправы и ее центрировки. Отсутствие растяжек, необходимых для крепления этого узла в корпусе объектива, например, построенного на базе двухзеркальных систем Кассегрена или Ричи — Кретьена, положительно влияет на структуру получаемого системой изображения [21].

Объектив имеет довольно компактную конструкцию. Максимальный диаметр компонентов объектива и продольные габариты от вершины первой поверхности до плоскости изображения составляют 0,4 и 0,6 фокусного расстояния соответственно.

Применение зеркально-линзовых схем должно быть обоснованным по отношению к зеркальным, поскольку они работают в широком спектральном диапазоне, часто выходящем за видимый диапазон, а линзовые

элементы дополнительно вносят хроматические аберрации, которые проявляются даже в параксиальной области. Установленный вблизи плоскости изображения двухлинзовый компенсатор не только исправляет аберрации внеосевых пучков лучей, позволяя увеличить угловое поле системы, но и корректирует хроматические аберрации. В предложенной схеме объектива возможно устранить хроматизм положения, а также значительно уменьшить вторичный спектр подбором трех марок обычных стекол. Число линз в схеме можно уменьшить, вводя асферическую поверхность или киноформный элемент, но это может снизить технологичность конструкции, увеличит себестоимость изготовления объектива и уменьшит возможности коррекции хроматических аберраций.

Полученные результаты свидетельствуют о высоком качестве изображения рассчитанного объектива. Таким образом, предложенная методика расчета светосильного длиннофокусного зеркально-линзового объектива доказала эффективность.

Заключение. Предложена ОС светосильного зеркально-линзового длиннофокусного компактного объектива и разработана методика его расчета. Рассчитан объектив с фокусным расстоянием 1500 мм, относительным отверстием $1 : 2,4$, угловым полем $2\omega = 2^\circ 22'$, который состоит из трех компонентов, имеет простую конструкцию и позволяет получать высокое качество изображения при обеспечении оптимальных массогабаритных характеристик.

Показано, что при сравнительно несложной конструкции с использованием линзового компенсатора можно получить достаточно совершенную коррекцию сферической аберрации, хроматической аберрации положения и меридиональной комы. Наличие в системе четырех линзовых элементов из трех обычных оптических материалов позволяет уйти от асферических поверхностей, тем самым делая систему более технологичной при производстве и контроле ее элементов. Это дает возможность использовать такую схему для создания оптико-электронной аппаратуры, характеризующейся простотой реализации за счет использования хорошо освоенных технологий изготовления линзовых и зеркальных элементов.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Гансвинд И.Н. Малые космические аппараты — новое направление космической деятельности. *Международный научно-исследовательский журнал*, 2018, № 12, с. 84–91. DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>
- [2] Вениаминов С.С. Космический мусор. Техногенное засорение космоса и его последствия. М., ИКИ РАН, 2023.

- [3] Молотов И.Е., Воропаев В.А., Юдин А.Н. и др. Комплексы электронно-оптических средств для мониторинга околоземного космического пространства. *Экологический вестник научных центров ЧЭС*, 2017, т. 14, № 4-2, с. 110–116. EDN: YMTQSO
- [4] Бельский А.Б., Здор С.Е., Колинько В.И. и др. Новый подход к разработкам оптико-электронных средств мониторинга околоземного космического пространства. *Оптический журнал*, 2009, т. 76, № 8, с. 22–28. EDN: KWAABV
- [5] Бакланов А.И. Анализ состояния и тенденции развития систем наблюдения высокого и сверхвысокого разрешения. *Вестник СГАУ им. С.П. Королева*, 2010, № 2, с. 80–91. EDN: NWDNBH
- [6] Алтухов А.И., Коршунов Д.С., Шабakov Е.И. Метод повышения качества снимков космических объектов. *Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики*, 2014, № 4, с. 35–40. EDN: SHNKNN
- [7] Лагуткин В.Н., Лукьянов А.П. Получение оптических изображений низкоорбитальных космических объектов при спутниковом мониторинге на скрещивающихся курсах. *Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы*, 2017, т. 4, № 4, с. 35–44. DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.35>
- [8] Здор С.Е., Колинько В.И. Проницающая способность автоматического астрономического прибора. *Прикладная оптика. Сб. тр. МНТК*, 2006, т. 6, с. 117–121.
- [9] Заварзин В.И., Сауткин В.А. Методы обнаружения сигналов в оптико-электронных системах мониторинга пространства. *Контенант*, 2012, т. 11, № 1, с. 26–31.
- [10] Шустов Б.М., Рыхлова Л.В., ред. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра. М., ФИЗМАТЛИТ, 2010.
- [11] Заварзин В.И. Двухзеркальные оптические системы с заданным значением сферической аберрации и требуемым изопланатизмом. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2003, № 3 (52), с. 29–43.
- [12] Заварзин В.И., Лотов А.И. Методика расчета зеркально-линзовых систем с зеркалом Манжена. *Контенант*, 2021, т. 2, № 4, с. 2–10. EDN: WTVZQF
- [13] Бодров С.В. Методика расчета длиннофокусного зеркально-линзового фотографического объектива. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 4 (81), с. 18–26.
- [14] Бодров С.В. Длиннофокусный трехкомпонентный зеркально-линзовый объектив. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 7 (19). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-7-824>
- [15] Arkhipov S.A., Senik B.N., Zavarzin V.I. Developing and fabricating optical systems for prospective remote-Earth-probe spacecraft. *J. Opt. Technol.*, 2013, vol. 80, iss. 1, pp. 25–27. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000025>
- [16] Zavarzin V.I., Kravchenko S.O., Mitrofanova Yu.S. Selection of optical materials to minimize longitudinal chromatic aberration in a prospective broad-coverage medium-resolution multispectral instrument. *J. Opt. Technol.*, 2016, vol. 83, iss. 10, pp. 593–598. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000593>

- [17] Заварзин В.И., Кравченко С.О., Морозов С.А. Методика расчета объективов с зеркалами Манжена на основе трехзеркальной системы с эксцентрично расположенным полем изображения. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 1 (13). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-1-521>
- [18] Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л., Машиностроение, 1969.
- [19] Малькин А.А. Использование макросов при проектировании центрированных оптических систем в программе Zemax. *Оптический журнал*, 2016, т. 83, № 3, с. 45–47. EDN: WMNZTN
- [20] Качурин Ю.Ю., Каратеева А.А. Оптимизация расчета афокальных систем с использованием языка макросов программы Zemax. *Оптический журнал*, 2019, т. 86, № 1, с. 48–51. DOI: <https://doi.org/10.17586/1023-5086-2019-86-01-48-51>
- [21] Заварзин В.И., Орешечкин С.С. Проектирование оптических схем Корша и Ричи — Кретьена с линзовым корректором для малогабаритных систем дистанционного зондирования Земли. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2023, № 4 (145), с. 4–23. EDN: HAQVFG

Заварзин Валерий Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана, декан факультета «Оптико-электронное приборостроение» МГТУ им. Н.Э. Баумана (Российская Федерация, 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1).

Бодров Сергей Васильевич — 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).

Крылова Милена Константиновна — инженер АО «НПЦАП» (Российская Федерация, 117342, Москва, ул. Введенского, д. 1).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Заварзин В.И., Бодров С.В., Крылова М.К. Методика расчета длиннофокусного светосильного зеркально-линзового объектива. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2025, № 1 (150), с. 34–49. EDN: YMKBHO

CALCULATION METHOD OF A LONG-FOCUS HIGH-APERTURE CATADIOPTRIC OBJECTIVE

V.I. Zavarzin¹

zavarzin@bmstu.ru

S.V. Bodrov¹

bodrov@bmstu.ru

M.K. Krylova²

¹BMSTU, Moscow, Russian Federation

²Scientific and Production Center of Automation and Instrument Engineering
n. a. academician N.A. Pilyugin, Moscow, Russian Federation

Abstract

The growing number of artificial satellites in the near-Earth space causes an urgent need for the development of optoelectronic systems for Earth remote sensing and space monitoring. The article proposes an optical layout of a long-focus high-aperture catadioptric objective and develops the methodology of its design. The layout of the objective optical system consists of a convex-plane lens, a Mangen lens and a two-lens compensator installed near the image plane. The optical elements of the objective are combined into three groups. The lens presented in the paper has the effective focal length of 1500 mm, F -number 2.4 and angular field of view $2^{\circ}22'$, provides high image quality while ensuring optimal mass and dimensional characteristics. The maximum diameter of the lens components and the total axial length from the top of the first surface to the image plane are $0.4F'$ and $0.6F'$ respectively. It is shown that with a relatively simple construction in the proposed optical scheme it is possible to obtain a sufficiently perfect correction of spherical aberration, chromatic aberrations and tangential coma. Based on four lens elements made of three conventional optical materials the objective has no aspherical surfaces, thus making the system more technologically advanced in the production and assembling. It allows to use this layout for creation of optoelectronic equipment characterized by simplicity of realization due to well mastered technologies of manufacturing of lens and mirror elements

Keywords

Catadioptric system, long-focus lens, space control, remote sensing of the Earth

Received 13.05.2024

Accepted 09.07.2024

© Author(s), 2025

REFERENCES

- [1] Gansvind I.N. Small spacecraft — new direction in space activities. *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2018, no. 12, pp. 84–91 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2018.78.12.053>
- [2] Veniaminov S.S. Kosmicheskiy musor. Tekhnogennoe zasorenie kosmosa i ego posledstviya [Space debris. Technogenic littering of space and its consequences]. Moscow, SRI RAS Publ., 2023.
- [3] Molotov I.E., Voropaev V.A., Yudin A.N., et al. Optical complexes for monitoring of the near-Earth space. *Ekologicheskiy vestnik nauchnykh tsentrov ChES* [Ecological Bulletin of Research Centers of the Black Sea Economic Cooperation'], 2017, vol. 14, no. 4-2, pp. 110–116 (in Russ.). EDN: YMTQSO

- [4] Bel'skiĭ A.B., Zdor S.E., Kolin'ko V.I., et al. New approach to the development of optoelectronic facilities for monitoring near-earth space. *J. Opt. Technol.*, 2009, vol. 76, iss. 8, pp. 468–472. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.76.000468>
- [5] Baklanov A.I. Status analysis and progress trends of high- and ultrahighresolution imaging systems. *Vestnik SGAU im. S.P. Koroleva* [Vestnik of Samara University. Aerospace and Mechanical Engineering], 2010, no. 2, pp. 80–91 (in Russ.). EDN: NWDNBH
- [6] Altukhov A.I., Korshunov D.S., Shabakov E.I. Method of image quality enhancement for space objects. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2014, no. 4, pp. 35–40 (in Russ.). EDN: SHNKNN
- [7] Lagutkin V.N., Lukyanov A.P. Obtaining optical images of leo space objects during satellite monitoring on the crossing courses. *Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy* [Rocket-Space Device Engineering and Information Systems], 2017, vol. 4, no. 4, pp. 35–44 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.17238/issn2409-0239.2017.4.35>
- [8] Zdor S.E., Kolinko V.I. [Penetrating ability of an automatic astronomical instrument]. *Prikladnaya optika. Sb. tr. MNTK* [Applied Optics. Proc. Int. Sci.-Tech. Conf.], 2006, vol. 6, pp. 117–121 (in Russ.).
- [9] Zavarzin V.I., Sautkin V.A. Signal detection methods in the optoelectronic systems of space monitoring. *Kontenant*, 2012, vol. 11, no. 1, pp. 26–31 (in Russ.).
- [10] Shustov B.M., Rykhlova L.V., eds. *Asteroidno-kometnaya opasnost: vchera, segodnya, zavtra* [Asteroid and comet hazard: yesterday, today, tomorrow]. Moscow, FIZMATLIT Publ., 2010.
- [11] Zavarzin V.I. Two-mirror optical systems with specified spherical aberration and required deviation from sine condition. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2003, no. 3 (52), pp. 29–43 (in Russ.).
- [12] Zavarzin V.I., Lotov A.I. Method for calculating mirror lens systems with a mangen mirror and a compensator in converging beams. *Kontenant*, 2021, vol. 2, no. 4, pp. 2–10 (in Russ.). EDN: WTVZQF
- [13] Bodrov S.V. Procedure of design of long-focus mirror-lens photographic objective. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2010, no. 4 (81), pp. 18–26 (in Russ.).
- [14] Bodrov S.V. Three-component long-focus catadioptric system. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 7 (19) (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-7-824>
- [15] Arkhipov S.A., Senik B.N., Zavarzin V.I. Developing and fabricating optical systems for prospective remote-Earth-probe spacecraft. *J. Opt. Technol.*, 2013, vol. 80, iss. 1, pp. 25–27. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.80.000025>
- [16] Zavarzin V.I., Kravchenko S.O., Mitrofanova Yu.S. Selection of optical materials to minimize longitudinal chromatic aberration in a prospective broad-coverage medium-resolution multispectral instrument. *J. Opt. Technol.*, 2016, vol. 83, iss. 10, pp. 593–598. DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000593>

- [17] Zavarzin V.I., Kravchenko S.O., Morozov S.A. Technique for calculation of mangin mirror objectives based on a 3-mirror system with eccentric position of a field of image. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 1 (13) (in Russ.). DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2013-1-521>
- [18] Slyusarev G.G. Metody rascheta opticheskikh sistem [Calculation methods of optical systems]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1969.
- [19] Mal'kin A.A. Using macros when designing centered optical systems in the Zemax program. *J. Opt. Technol.*, 2016, vol. 83, iss. 3, pp. 173–174.
DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.83.000173>
- [20] Kachurin Yu.Yu., Karateeva A.A. Optimization of afocal system design using the Zemax macro language. *J. Opt. Technol.*, 2019, vol. 86, iss. 1, pp. 39–41.
DOI: <https://doi.org/10.1364/JOT.86.000039>
- [21] Zavarzin V.I., Oreshechkin S.S. Designing Korsch and Ritchey — Chretien optical schemes with a lens corrector for the small-sized earth remote sensing systems. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2023, no. 4 (145), pp. 4–23 (in Russ.). EDN: HAQVFG

Zavarzin V.I. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, Dean of the Department of Optoelectronic Instrumental Engineering, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Bodrov S.V. — Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Professor, Department of Laser and Optoelectronic Systems, BMSTU (2-ya Baumanskaya ul. 5, str. 1, Moscow, 105005 Russian Federation).

Krylova M.K. — Engineer, Scientific and Production Center of Automation and Instrument Engineering n. a. academician N.A. Pilyugin (Vvedenskogo ul. 1, Moscow, 117342 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Zavarzin V.I., Bodrov S.V., Krylova M.K. Calculation method of a long-focus high-aperture catadioptric objective. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Instrument Engineering*, 2025, no. 1 (150), pp. 34–49 (in Russ.).
EDN: YMKBHO