

# Оптический журнал

Расчёт, проектирование и производство оптических систем

УДК 681.786.3

## Широкоугольный зеркально-линзовый концентрический объектив

© 2021 г. А. Я. ГЕБГАРТ, КАНД. ТЕХН. НАУК;  
М. П. Колосов, ДОКТОР ТЕХН. НАУК

АО «Научно-производственное предприятие «Геофизика-Космос», Москва

E-mail: yapuch2003@inbox.ru

Поступила в редакцию 21.04.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-10-11-14

Представлена и анализируется новая оптическая система широкоугольного зеркально-линзового концентрического изохроматического объектива с действительным изображением. Получены условия его изохроматической коррекции. Приведён вариант практической реализации объектива.

**Ключевые слова:** объектив, хроматизм, изохроматизм, сферическая аберрация, дисторсия.

**Коды OCIS:** 120, 4570, 220, 4830

### ВВЕДЕНИЕ

Зеркально-линзовые оптические системы, содержащие линзовый компенсатор, выполненный из одной марки преломляющего материала (например, компенсаторы Максутова, Волосова, Чуриловского), получили широкое распространение [1, 2]. Эти компенсаторы предназначены для исправления тех или иных монохроматических аберраций системы и хроматизма самого компенсатора при работе в угловых полях порядка нескольких градусов. Существенное увеличение величин полей угловых оптических систем до значений  $2\omega \geq 100^\circ$  возможно при использовании зеркально-линзовых концентрических систем.

Концентрические системы обладают такими специфическими свойствами, как отсутствие астигматизма, комы, дисторсии и хроматизма увеличения, имеют сферическую поверхность изображения. Изменение освещённости в их изображении в пределах углового поля  $2\omega$  пропорционально  $\cos\omega$ . Наличие указанных свойств обусловлено тем, что в концентрических системах центры кривиз-

ны сферических поверхностей совмещены, совпадают с центром зрачка или его изображением, и, следовательно, главные лучи проходят всегда по нормали к оптическим поверхностям.

Методика расчёта концентрических систем, а также некоторые системы концентрических объективов наиболее полно представлены в работе [3]. В этой работе приведена и исследована изохроматическая концентрическая моноблочная зеркально-линзовая система объектива, которая полностью свободна от хроматизма в любом спектральном диапазоне. Её линзовый компонент выполнен из одной марки преломляющего материала. Недостатком этой системы является то, что она имеет мнимую поверхность изображения.

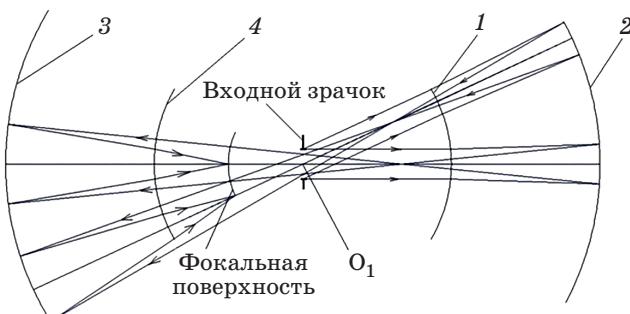
Целью работы является создание и исследование широкоугольного изохроматического концентрического моноблочного зеркально-линзового объектива, который полностью свободен от хроматизма, имеет реальную поверхность изображения и достаточно большое значение заднего вершинного фокального отрезка.

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ШИРОКОУГОЛЬНОГО ИЗОХРОМАТИЧЕСКОГО КОНЦЕНТРИЧЕСКОГО ОБЪЕКТИВА

Отмеченная выше зеркально-линзовая концентрическая моноблочная система [3] состоит из двух преломляющих и одной зеркальной поверхности. При определённых соотношениях между радиусами она обладает свойством изохроматичности при мнимом положении поверхности изображения. Можно предположить, что введение в такую моноблочную систему ещё одной зеркальной сферической поверхности позволит создать широкоугольную изохроматическую концентрическую систему, обладающую действительным изображением.

Рассмотрим концентрическую оптическую систему, представленную на рис. 1, которая содержит, расположенные по ходу луча, сферическую преломляющую поверхность 1, сферические зеркала 2, 3 и сферическую преломляющую поверхность 4. Центры кривизны всех поверхностей совпадают друг с другом в точке  $O_1$ , где расположен центр входного и выходного зрачков. Пространство между преломляющими входной и выходной поверхностями 1 и 4 заполнено стеклом одной марки. Пучок лучей, пройдя преломляющую поверхность 1, отразившись от зеркал 2, 3, и, преломившись на поверхности 4, выходит из системы. Главные плоскости  $HH'$  в этой системе совмещены и находятся в центре кривизны  $O_1$  [3, 4].

Исследуем известное выражение оптической силы концентрической системы [3],



**Рис. 1.** Оптическая концентрическая изохроматическая система с действительной поверхностью изображения. 1 — сферическая преломляющая поверхность, 2 — сферическая отражающая зеркальная поверхность, 3 — сферическая отражающая зеркальная поверхность, 4 — сферическая преломляющая поверхность.

которое в нашем случае будет иметь следующий вид:

$$\Phi = \sum_{k=1}^{k=4} [(n_{k+1})^{-1} - (n_k)^{-1}] / r_k, \quad (1)$$

где  $n_k$  — показатель преломления,  $r_k$  — радиус кривизны  $k$ -ой поверхности.

Преобразуя выражение (1), получим следующее:

$$\begin{aligned} \Phi &= -[(1/n - 1)/r_1 + (-1/n - 1/n)/r_2 + \\ &\quad + (1/n + 1/n)/r_3 + (1 - 1/n)/r_4] = \\ &= -[(1/r_1 - 2/r_2 + 2/r_3 - 1/r_4)/n - 1/r_1 + 1/r_4]. \end{aligned} \quad (2)$$

Приравняв нуль члены, содержащие показатель преломления  $n$ , получим условие исправления хроматизма положения для всех длин волн, то есть условие изохроматизма:

$$1/r_1 - 1/r_4 = 2(1/r_2 - 1/r_3). \quad (3)$$

Оптическая сила такой системы будет иметь вид

$$\Phi = 1/f' = [1/r_1 - 1/r_4] = 2(1/r_2 - 1/r_3), \quad (4)$$

где  $f'$  — фокусное расстояние объектива.

Данная система может обеспечить действительное изображение и вынос выходного зрачка, если выполняются следующие условия:

- наличие разных знаков радиусов кривизны  $r_2$  и  $r_3$  зеркал 2 и 3, а также радиусов кривизны  $r_1$  и  $r_4$  преломляющих поверхностей 1 и 4;

- преломляющие и отражающие поверхности должны быть вогнутыми.

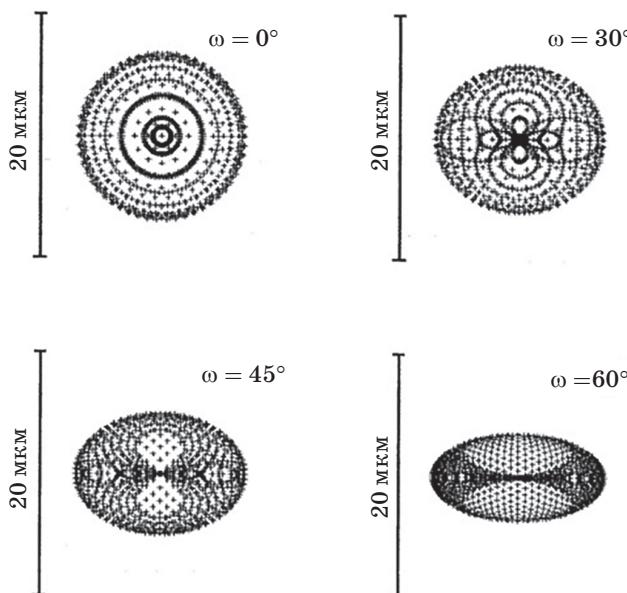
Из выражения (4) следует, что оптическая сила не зависит от показателя преломления и такая оптическая система объектива свободна от хроматизма для любых преломляющих материалов в любой области спектра.

Выполнение в объективе условий концентричности позволяет считать такую систему свободной от астигматизма, дисторсии, комы, хроматизма увеличения, а поперечную aberrацию широкого пучка лучей — постоянной по полю для соответствующих координат зрачка с учётом их проекции на направление падающего пучка. При выборе поверхности наилучшей установки возможно некоторое выравнивание меридиональной и сагиттальной составляющей поперечной aberrаций.

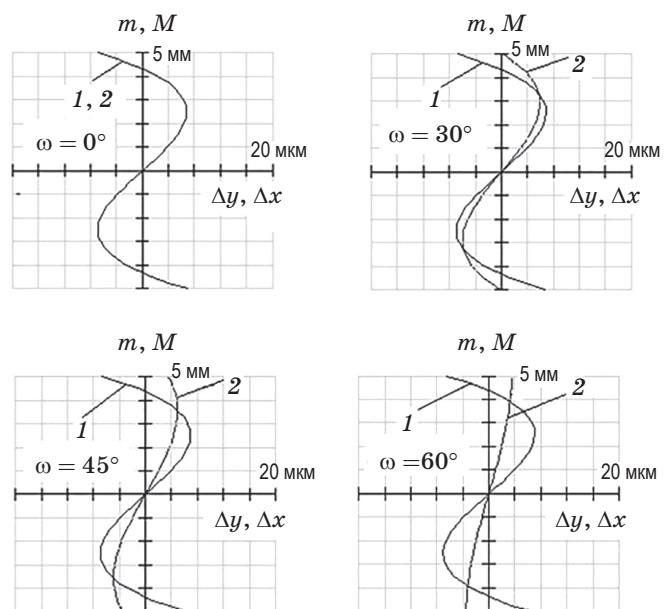
В качестве примера рассмотрим результаты расчёта концентрической изохроматической системы с фокусным расстоянием  $f' = 25$  мм, относительным отверстием  $2a/f' = 1:2,5$  и угловым полем  $120^\circ$ . В этой системе использовались следующие конструктивные параметры, удовлетворяющие условию (3): радиусы кривизны поверхностей  $r_1 = -50$  мм, радиусы  $r_2 = -100$  мм,  $r_3 = 100$  мм,  $r_4 = 50$  мм. Преломляющими материалами в данном расчёте (примере) являются стекло K8 и селенид цинка ZnSe. Расчёт проведён для спектральных диапазонов  $\Delta\lambda = 0,365\text{--}2,3$  мкм для K8 и  $\Delta\lambda = 0,55\text{--}18$  мкм для ZnSe. Выбор указанных материалов был обусловлен необходимостью проиллюстрировать отсутствие влияния показателей преломления на геометрические aberrации в широкой спектральной области.

Результаты расчёта данной системы для стекла K8 на поверхности наилучшей установки для различных координат углового поля  $\omega$  приведены на рис. 2 и рис. 3.

Так, на рис. 2 приведена диаграмма пятен рассеяния для точек углового поля  $\omega = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ , а на рис. 3 — графики поперечной меридиональной  $\Delta_y$  — 2 и сагиттальной  $\Delta_x$  — 1 составляющих сферохроматической aberrации в зависимости от величины входного зрачка соответственно  $m$  и  $M$  для точек углового по-



**Рис. 2.** Диаграмма пятен рассеяния концентрической изохроматической системы с действительной поверхностью изображения.



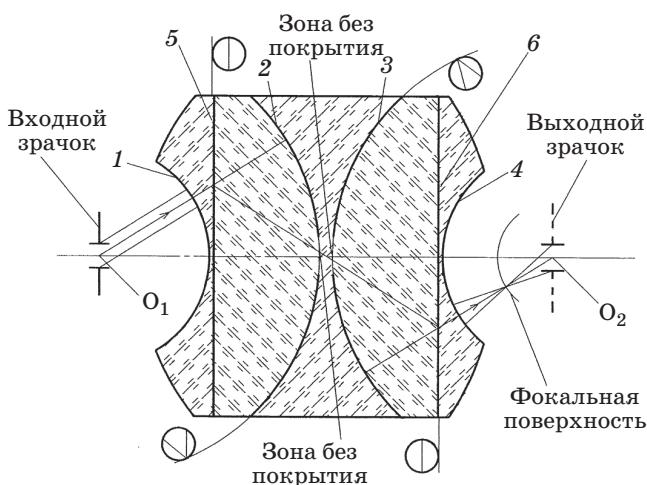
**Рис. 3.** Графики сагиттальной 1 и меридиональной 2 составляющих поперечной aberrации концентрической изохроматической системы с действительной поверхностью изображения.

ля  $\omega = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ . Максимальный размер геометрического пятна рассеяния по полю составляет 0,0142 мм. Практически такие же результаты были получены для преломляющего материала ZnSe.

Анализ приведённых результатов показал, что оптическая система свободна от хроматических aberrаций в любом спектральном диапазоне для любой марки стекла и преломляющего материала.

Реализация данной оптической системы при обеспечении моноблочности конструкции может быть достигнута за счёт введения между преломляющими и зеркальными поверхностями двух плоских светоделителей, что приводит к достаточно низкому коэффициенту пропускания.

Полученная таким образом широкоугольная моноблочная изохроматическая оптическая система (рис. 4) содержит сферические преломляющие поверхности 1 и 4, сферические зеркала 2 и 3 с центральной зоной без покрытия, плоские светоделители 5 и 6. В этой системе центры кривизны преломляющей поверхности 1 и сферического зеркала 2 совпадают друг с другом в точке  $O_1$ , а через плоские светоделители 5, 6 с центрами кривизны преломляющей поверхности 4 и сферического



**Рис. 4.** Оптическая система широкогоугольного концентрического моноблочного изохроматического объектива. 1 — сферическая преломляющая поверхность, 2 — сферическая отражающая зеркальная поверхность, 3 — сферическая отражающая зеркальная поверхность, 4 — сферическая преломляющая поверхность, 5 — плоский светоделитель, 6 — плоский светоделитель.

зеркала 3 в точке  $O_2$ . Входной зрачок объектива вынесен, а его центр совпадает с центрами кривизны поверхностей 1 и 2  $O_1$ . Центр выходного зрачка совпадает с центрами кривизны поверхностей 3, 4  $O_2$ . Конструктивно оптический моноблок выполнен в виде пяти склеенных оптических элементов.

Оптическая система объектива работает следующим образом. Пучок лучей от бесконечно удаленного источника, пройдя последовательно преломляющую сферическую поверхность 1, отразившись от сферического зеркала 2 и плоского светоделителя 5, попадает в зону без зеркального покрытия в сферических зеркалах 2 и 3. Пройдя указанную зону и отразившись от плоского светоделителя 6 и сферического зеркала 3, пучок проходит сферическую преломляющую поверх-

ность 4 и строит изображение на сферической фокальной поверхности, описанной из центра кривизны  $O_2$ , радиус которой равен фокусному расстоянию системы. Радиусы кривизны поверхностей 1–4 должны соответствовать условию изохроматизма (3), при этом фокусное расстояние объектива будет определяться выражением (4). В этом случае все свойства, обусловленные концентричностью поверхностей и отсутствием хроматизма, сохраняются. Следует отметить, что в центральной части углового поля ввиду наличия зоны без зеркального покрытия имеется «слепая зона» порядка  $10^\circ$ . Вне этой зоны изменение освещенности от центра к краю углового поля  $\omega$  происходит в соответствии с законом cos $\omega$ .

При создании подобных изохроматических систем выбор преломляющего материала, а также клея и светоделительного покрытия определяется только полосой их пропускания в заданном рабочем спектральном диапазоне, а также технологическими возможностями изготовления.

Следует отметить, что оптические системы с небольшим коэффициентом пропускания необходимы для решения специальных задач, например, в области создания приборов систем ориентации космических аппаратов (КА). Так, в [5] представлена моноблочная конструкция зеркально-линзового объектива широкогоугольного датчика Солнца, содержащая плоскую поверхность, концентрические поверхности и два светоделителя.

Таким образом, в данной работе на основе проведенных аналитических исследований впервые разработан изохроматический широкогоугольный моноблочный концентрический объектив с действительным изображением, который предполагается использовать в оптических системах, не требующих высокого пропускания, например, в приборах ориентации КА по Солнцу.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1975. 640 с.
2. Русинов М.М. Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. 383 с.
3. Попов Г.М. Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении. М.: Наука, 1969. 135 с.
4. Чуриловский В.Н. Теория оптических приборов. М.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1966. 564 с.
5. Гебгардт А.Я., Колесов М.П. Оптика приборов ориентации космических аппаратов. М.: Университетская книга, 2017. 152 с.