

Анализ качества изображения двухзеркальных апланатических систем и зеркально-линзовых объективов с двухлинзовыми компенсаторами

© Ю.В. Богачев

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

Для 10 схем зеркально-линзовых объективов на основе двухзеркальной системы Кассегрена и двухлинзового компенсатора, линзы которого расположены перед первым зеркалом, между первым и вторым зеркалами и после второго зеркала, предложено предварительную оценку ожидаемого качества изображения объектива проводить сравнением с качеством изображения двухзеркальных апланатических и изопланатических систем с аналогичными оптическими характеристиками. Рассмотрение ограничено сверхсветосильными и узкоугольными объективами с относительными отверстиями до 1:0,8 и угловыми полями в пространстве предметов до 6° и 10° .

Ключевые слова: *оптические системы, двухзеркальные объективы, зеркально-линзовые объективы, апланатическая коррекция, качество изображения.*

В оптических системах обзора с узким полем с многоэлементными приемниками, предназначенных для анализа излучения малой интенсивности и используемых, например, в приборах слежения за перемещающимися объектами, необходимо применять зеркальные и зеркально-линзовые объективы, имеющие допустимое качество изображения по всему полю. В практике расчета светосильных зеркально-линзовых объективов одним из важнейших вопросов является выбор оптимальной исходной схемы системы, позволяющей при минимальном количестве компонентов достигнуть требуемого качества изображения. При этом критериями качества изображения, помимо теоретически достижимого дифракционного предела разрешения, обычно являются результаты абберрационной коррекции, достигнутые в известных, например по литературным и патентным данным, объективах, имеющих аналогичные основные оптические характеристики и схожих по числу компонентов схемы. Однако такой подход к установлению критерия качества изображения рассчитываемого объектива «от достигнутого» при простоте и доступности имеет недостаток неопределенности, связанный с субъективными моментами привлечения для анализа ограниченного количества известных объективов. В качестве практического критерия качества изображения зеркально-линзовых объективов предложено использовать данные по абберраци-

онному расчету двухзеркальных апланатических и изопланатических систем с аналогичными оптическими характеристиками [1].

На рис. 1 приведены оптические схемы зеркально-линзовых объективов, содержащих базовую двухзеркальную систему Кассегрена и двухлинзовый компенсатор, линзы которого находятся перед первым зеркалом, между зеркалами и после второго зеркала. Использование двух зеркал значительно сокращает осевые габариты объектива, что

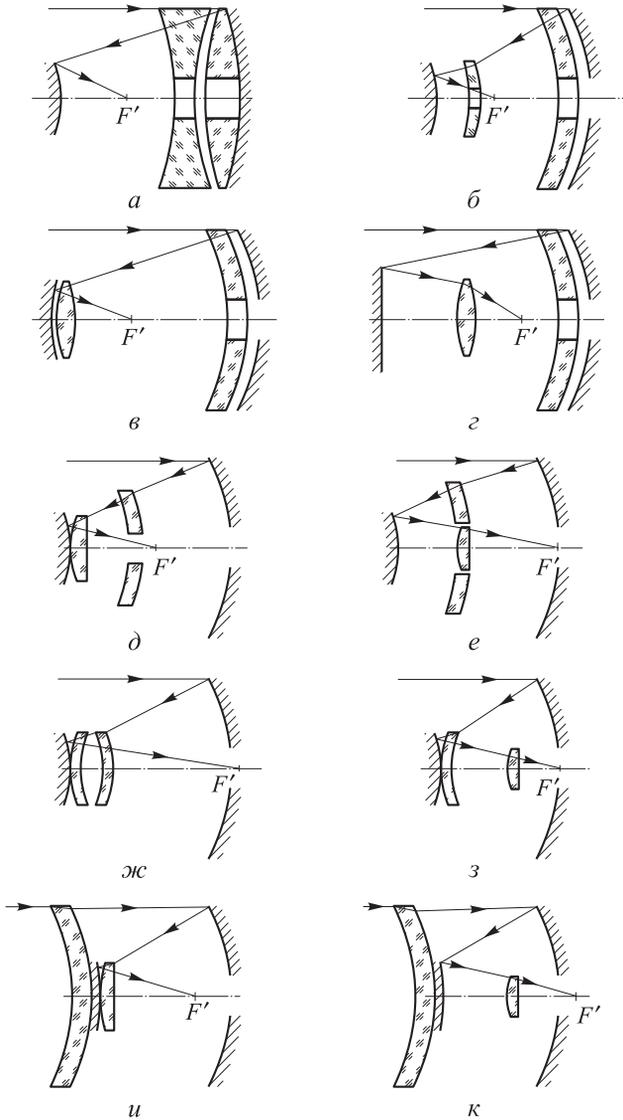


Рис. 1. Схемы светосильных зеркально-линзовых объективов с двухлинзовым компенсатором:

а – в пучке параллельных лучей перед первым зеркалом; *б, в* – в сходящемся пучке лучей между зеркалами; *г-д* – в сходящемся пучке лучей между зеркалами и после второго зеркала; *и, к* – в пучке параллельных лучей перед первым зеркалом и сходящемся пучке лучей после второго зеркала

особенно важно при расчете длиннофокусных систем. Для исправления сферической аберрации в таких объективах применяют асферизацию первого зеркала, а коррекцию полевых аберраций, в первую очередь комы, осуществляют выбором оптических сил и изменением форм линз компенсатора. Наличие двух линз компенсатора позволяет производить ахроматизацию объектива, действующего в широком спектральном диапазоне длин волн, составляющем несколько микронметров.

Рассмотрим кратко коррекционные возможности объективов, оптические схемы которых показаны на рис. 1. В объективе, содержащем двухлинзовый компенсатор перед первым зеркалом (рис. 1, а), оправа которого служит апертурной диафрагмой, достигают исправления сферической и сферохроматической аберраций, но коррекция полевых аберраций, в первую очередь комы затруднительна ввиду расположения линз компенсатора вблизи входного зрачка и, как следствие, их незначительного влияния на аберрации широких наклонных пучков лучей. Применение для этой цели второго зеркала ограничено использованием его кривизны для получения требуемого положения плоскости изображения объектива. Следует также учитывать, что при установке крупногабаритных линзовых деталей, соизмеримых с диаметром первого зеркала, увеличивается масса объектива, что в ряде случаев недопустимо. Такую схему можно применять для создания светосильных объективов, содержащих только сферические поверхности, но с угловыми полями, не превышающими 3° .

Схемы объективов, показанные на рис. 1, б–г, обеспечивают лучшие возможности исправления внеосевых аберраций, однако наличие одной из линз компенсатора вблизи первого зеркала в ряде случаев также ограничивает ее использование при расчете светосильных объективов из-за нежелательного увеличения массы объектива. Применение этих схем для синтеза светосильных объективов возможно при угловых полях до 4° и размере аберрационного пятна вне оси 0,6...0,7 мрад [2].

Для расчета объективов с увеличенными полями до 6° ... 10° предпочтительнее схемы с линзовым компенсатором, расположенным в сходящемся пучке лучей после первого зеркала. При этом одну или обе линзы компенсатора помещают вблизи второго зеркала в двойном ходе лучей (рис. 1, д–з), а вторая линза находится в сходящемся пучке лучей после второго зеркала (рис. 1, е, з). Линзы такого компенсатора оказывают малое влияние на сферическую аберрацию, поэтому для ее исправления используется асферизация первого зеркала. Для коррекции сферической аберрации объектива можно применять изменение формы первой по ходу лучей линзы компенсатора (рис. 1, д, е). Однако объективы, построенные по указанным схемам,

имеют повышенный коэффициент центрального экранирования, что значительно уменьшает эффективное относительное отверстие объектива.

Анализ приведенных схем зеркально-линзовых объективов с двухлинзовым компенсатором позволяет выделить схемы (см. рис. 1, е, з), в которых коррекцию внеосевых aberrаций проводят изменением формы линзы, находящейся в сходящемся пучке лучей после второго зеркала. Расположение такой линзы на значительном удалении от входного зрачка, который размещают вблизи первого зеркала, позволяет эффективно использовать изменение ее формы для исправления комы. Остаточная сферическая aberrация объектива устраняется асферизацией первого зеркала.

Особо следует выделить схемы, приведенные на рис. 1, и, к. Передняя линза компенсатора, расположенная в пучке параллельных лучей на удалении от первого зеркала, а следовательно, от входного зрачка, влияет как на сферическую aberrацию, так и на aberrации наклонных пучков лучей. Помещенная в сходящемся пучке лучей вторая линза компенсатора также влияет на полевые aberrации. В объективе, построенном по этим схемам, возможно исправление сферической aberrации при использовании только сферических поверхностей, поскольку выбор оптической силы и изменение формы первого по ходу луча отрицательного мениска хорошо компенсирует сферическую aberrацию первого зеркала. Недостатком последних двух схем является большой диаметр первой линзы компенсатора, что ведет к увеличению массы объектива.

Для сравнения качества изображения рассмотренных схем зеркально-линзовых объективов предлагается использовать данные расчета светосильных апланатических и изопланатических двухзеркальных систем. Объективы по схеме Кассегрена, состоящие из первого большого зеркала 1 и второго малого зеркала 2 (рис. 2), находят применение в оптико-электронных устройствах различного назначения. Кроме того, такие системы используются как основная часть объективов,

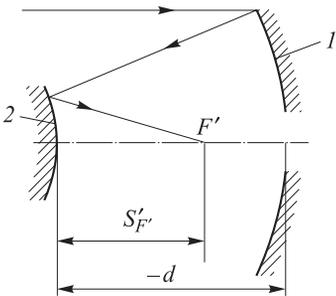


Рис. 2. Оптическая схема двухзеркального объектива

содержащих линзовые компенсаторы. Методики расчета двухзеркальных апланатических систем приведены в работах [3–5]. Для достижения апланатической коррекции оба зеркала должны иметь асферическую форму. При этом из условия получения стигматического изображения осевой точки и выполнения условия синусов определяют координаты точек профиля поверхностей обоих зеркал, а последующей аппроксимацией

находят коэффициенты уравнений асферических поверхностей зеркал. Исследования показали, что апланатическую коррекцию в системах с относительными отверстиями 1:1 и 1:0,8 достигают соответственно при четырех и пяти последовательных членах уравнений асферических поверхностей зеркал [6]. Апертурной диафрагмой является оправа первого зеркала, коэффициент линейного экранирования не более 0,5.

При использовании для анализа поля излучения объективов с многоэлементными приемниками необходимо получить примерно равных размеров абберационные пятна рассеяния в изображениях осевой и внеосевой точек. Такая степень коррекции аббераций, при которой выполняется условие исправления комы, но сферическая абберация остается не скомпенсированной в допустимых пределах, называется изопланатической. Методика определения координат профиля асферических поверхностей зеркал двухзеркальной изопланатической системы приведена в работе [1]. Аналогичных результатов уменьшения размеров абберационных пятен рассеяния в изображениях внеосевых точек достигают в апланатической двухзеркальной системе при смещении плоскости изображения относительно плоскости Гаусса до получения равных размеров абберационных пятен на оси и вне оси [7].

Для более полного анализа абберационной коррекции двухзеркальных апланатических систем рассмотрены объективы, имеющие двукратное изменение расстояния между зеркалами ($-d/f' = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6$), отличающиеся положением плоскости изображения относительно вершины первого зеркала. В системах с относительными отверстиями 1:1 и 1:0,8 первое зеркало представляет поверхность деформированного гиперboloида, а второе зеркало имеет поверхность деформированного сплюснутого эллипсоида. В табл. 1 приведены величины абберационных пятен рассеяния на оси $\Delta u'_0$ и вне оси $\Delta u'_{\omega}$, мрад, для апланатических систем с относительными отверстиями 1:1 и 1:0,8 и угловыми полями $2\omega = 4^\circ$ и 6° . Сравнивая данные, приведенные в табл. 1, с качеством изображения объектива, ограниченно дифракцией, отметим, что для объектива с относительным отверстием 1:1 угловой размер абберационного пятна на оси составляет 0,043 мрад (при $\lambda = 3,5$ мкм).

Анализ абберационной коррекции вариантов систем, приведенных в табл. 1, показал, что в объективах с относительным отверстием 1:1 размер абберационного пятна на оси не превышает 0,07 мрад, а при повышении относительного отверстия до 1:0,8 — 0,28 мрад. Для системы с параметрами $-d/f' = 0,4$ и $S'_F/f' = 0,4$ существенное превышение указанных величин объясняется тем, что поверхность вто-

рого зеркала переходит от выпуклой к вогнутой форме, близка к planoидной и для ее аппроксимации необходима альтернативная форма задания уравнения поверхности.

Таблица 1

Аберрационные пятна рассеяния на оси и вне оси в плоскости Гаусса, мрад, $S'_{F'}/f' = 0,4$

2ω	$-d/f'$			
	0,3	0,4	0,5	0,6
Относительное отверстие 1:1				
0°	0,03	0,21	0,07	0,03
4°	2,6	2,8	2,2	1,9
6°	5,7	6,0	5,0	4,2
Относительное отверстие 1:0,8				
0°	0,18	1,33	0,28	0,05
4°	2,3	2,3	2,0	1,8
6°	5,7	5,1	4,5	3,9

Как отмечено выше, уменьшения размеров аберрационных пятен рассеяния в изображениях внеосевых точек предмета достигают в изопланатических объективах за счет увеличения аберрационного пятна рассеяния изображения осевой точки. Аналогичный результат получается в апланатических объективах при смещении плоскости установки относительно плоскости Гаусса до получения примерно равных аберрационных пятен на оси и вне оси (табл. 2). Приведенные в табл. 2 данные показывают, что в системах с относительными отверстиями 1:1 и 1:0,8 возможно получение величин аберрационных пятен на оси и по полю до 1,0...1,3 мрад при полях до 4° и 2,2...2,4 мрад при полях до 6°.

Таблица 2

Аберрационные пятна рассеяния в плоскости установки, смещенной относительно плоскости Гаусса, при получении равных размеров пятен на оси и на краю поля, мрад, $S'_{F'}/f' = 0,4$

2ω	$-d/f'$			
	0,3	0,4	0,5	0,6
Относительное отверстие 1:1				
4°	1,5	1,4	1,1	1,0
6°	3,2	3,1	2,6	2,2
Относительное отверстие 1:0,8				
4°	1,6	2,4	1,3	1,0
6°	3,8	4,0	2,9	2,4

Оптические характеристики и величины абберационных пятен рассеяния на оси $\Delta u'_0$ и вне оси $\Delta u'_\omega$, мрад, зеркально-линзовых объективов (см. рис. 1)

Оптическая схема на рис. 1	1:K	2ω	$\Delta u'_0$	$\Delta u'_\omega$
<i>a</i>	1:1	3°	0,14	1,38
<i>б</i>	1:1	8°	0,9	4,1
<i>в</i>	1:1	3°	0,44	0,49
<i>в</i>	1:1	8°	1,0	1,0
<i>г</i>	1:0,9	3°	0,36	1,27
<i>д</i>	1:1	6°	0,48	0,80
<i>e</i>	1:1	10°	0,16	1,1
<i>ж</i>	1:1	10°	1,0	1,0
<i>з</i>	1:0,84	4°30'	0,9	1,0
<i>з</i>	1:1	6°	0,96	0,96
<i>з</i>	1:0,83	4°30'	0,89	0,95
<i>з</i>	1:1,4	3°	0,82	1,04
<i>з</i>	1:1	10°	0,03	0,6

Для сравнения данных по величинам абберационных пятен рассеяния в изображениях осевой и внеосевых точек изображения в апланатических и изопланатических двухзеркальных системах в табл. 3 приведены аналогичные результаты, полученные при абберационной коррекции светосильных зеркально-линзовых объективов, схемы которых показаны на рис. 1. В табл. 3 представлены типы оптических схем, основные оптические характеристики (относительные отверстия 1:K и угловые поля $2\omega^\circ$), а также угловые размеры абберационных пятен на оси $\Delta u'_0$ и вне оси $\Delta u'_\omega$, мрад. Анализ данных, показанных в табл. 3, и их сравнение с величинами, приведенными в табл. 1 и 2, показал, что при расчете зеркально-линзовых объективов получены результаты, сопоставимые с абберациями двухзеркальных апланатических и изопланатических систем. Это подтверждает возможность их использования для предварительной экспертной оценки предполагаемого качества изображения объектива до проведения абберационных расчетов, а также позволяет выбрать оптимальную исходную оптическую схему объектива.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Богачев Ю.В., Заварзин В.И., Кирюшин С.И. Исследования по расчету зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем. *Расчеты оптических систем и фотокиноаппаратуры. Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана*, 1984, № 421, с. 61–71.

- [2] Бодров С.В., Богачев Ю.В. *Расчет зеркально-линзовых объективов*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1988, с. 2–34.
- [3] Schwarzschild K. *Teorie del Spiegeltelescope*, 1905.
- [4] Chretien H. *Rev. d'Optique*, 1922, 1.
- [5] Roberts G.E. *JOSA*, 1964, vol. 54, no. 9.
- [6] Богачев Ю.В., Василенко С.А. Исследование двухзеркальных апланатических объективов с относительным отверстием 1:2. *Расчеты оптических систем и фотоаппаратуры*. Тр. МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987, № 489, с. 12–20.
- [7] Богачев Ю.В., Василенко С.А. Возможности двухзеркальных апланатических систем. *34th Int. Wiss. Koll.* TH Ilmenau, 1989, с. 191–194.

Статья поступила в редакцию 24.06.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Богачев Ю.В. Анализ качества изображения двухзеркальных апланатических систем и зеркально-линзовых объективов с двухлинзовыми компенсаторами. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 7.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/834.html>

Богачев Юрий Викторович родился в 1941 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1964 г. Канд. техн. наук, доцент кафедры «Оптико-электронные приборы научных исследований» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 107 научных публикаций в области расчета оптических систем. e-mail: UVBok1941@mail.ru