

# РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.318

## ВАРИАНТЫ КОМПОЗИЦИИ ВЫСОКОАПЕРТУРНОГО ЗЕРКАЛЬНОГО ОБЪЕКТИВА КОМПАКТНОЙ КОНСТРУКЦИИ

© 2012 г. В. А. Зверев, доктор техн. наук; Ю. А. Подгорных

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: julijapdg@gmail.com

Показано, что применение афокальной системы Мерсенна, обладающей известными анаберрационными свойствами, позволяет построить ряд компактных зеркальных и зеркально-линзовых систем, обладающих апланатической, анастигматической и плананастигматической коррекцией aberrаций образованного изображения, при этом длина системы примерно в четыре раза меньше диаметра ее входного зрачка.

*Ключевые слова:* отражающая поверхность, афокальная система, апланатическая коррекция aberrаций, линзовый компенсатор.

Коды OCIS: 200.0200, 220.0220.

Поступила в редакцию 22.02.2012.

Габариты оптической системы определяют ее диаметром входного зрачка и расстоянием от ее первой поверхности до плоскости изображения, т. е. длиной системы. Длина системы определяется ее конструкцией. Рассмотрим варианты композиции компактной зеркальной системы на основе свойств отражающей поверхности, принятой в качестве базовой, имеющей форму параболоида вращения.

Предположим, что на поверхность параболоида падает луч, параллельный его оси, на расстоянии  $\rho$  от нее. Поверхность параболоида определим уравнением вида

$$\rho^2 = 2r_0z, \quad (1)$$

где  $\rho^2 = x^2 + y^2$ ,  $r_0$  – радиус кривизны поверхности параболоида в его осевой точке. Продифференцировав уравнение (1), получаем

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{dz}{d\rho} = \frac{\rho}{r_0}, \quad (2)$$

где  $\varphi$  – угол, образованный нормалью к поверхности параболоида в точке падения луча с его оптической осью. В рассматриваемом случае  $\sigma' = 2\varphi$ . Тогда  $f' = \rho/\sin 2\varphi = r_0/(2\cos^2(\sigma'/2))$ . При этом  $\lim(\sigma' \rightarrow 0) f' = f'_0 = r_0/2$ .

Соблюдение условия синусов определяется соотношением  $\rho_0 = f'_0 \sin \sigma'$ . В предельном случае, т. е. при  $\sigma' \rightarrow \pi/2$ , имеем  $\rho_0 = f'_0$ . В результате получаем, что при соблюдении условия синусов предельное значение диафрагменного числа  $F = -0,5$ . В рассматриваемом случае из-за отступления от условия синусов, что эквивалентно дисторсии во входном зрачке, при  $\sigma' = -\pi/2$  высота луча  $\rho_1 = r_0 \operatorname{tg}\varphi = -r_0$ . При этом диафрагменное число параболоида  $F = -0,25$ . Пусть высота падения луча на первую отражающую поверхность в соответствии с формулой (2) равна  $\rho_1 = r_0 \operatorname{tg}\varphi_1$ . Дополним эту отражающую поверхность второй, образовав известную афокальную систему Мерсенна. Высота луча, отраженного добавленной поверхностью, составляет  $\rho_2 = r_0 \operatorname{tg}\varphi_2$ . Заметим, что в афокальной системе угол  $\sigma'_1 = \sigma_2$  и, соответственно,  $\varphi_1 = \varphi_2$ . При этом угловое увеличение изображения, образованного афокальной системой, определяется как

$$\Gamma = \frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{r_0 \operatorname{tg}\varphi_1}{r_0 \operatorname{tg}\varphi_2} = \operatorname{const}. \quad (3)$$

Отсюда следует, что в афокальной системе из двух отражающих параболоидов вращения

строго отсутствует отступление от условия синусов в пределах всей входной апертуры и не только при  $|\sigma'| \leq \pi/2$ , но и при  $|\sigma'| > \pi/2$ . При  $\sigma' = -\pi/2$  координата  $\rho = -r_0 = -2f'_0$ , а координата  $z = r_0/2 = f'_0$ . Известно [1], что при входном зрачке, расположенном в геометрическом фокусе отражающей поверхности второго порядка, независимо от расстояния до предмета, в сформированном изображении отсутствует aberrация астигматизма. В рассматриваемой системе при  $\sigma' = -\pi/2$  роль апертурной диафрагмы и входного зрачка может выполнять наружная граница отражающей поверхности первого (главного) зеркала. При этом сформированное изображение будет свободно от сферической aberrации, комы и астигматизма.

Если предположить, что отраженный вторичным зеркалом параллельный пучок лучей снова отражается от поверхности главного зеркала, как показано на рис. 1а, то все лучи пучка соберутся в осевой точке фокальной плоскости (в фокусе) главного зеркала, а следовательно, и всей системы в целом. В результате получим оптическую систему объектива [2], номинальное значение фокусного расстояния  $f'_0$  которого определяется соотношением вида

$$f'_0 = \Gamma f'_{01} = \frac{1}{2} \Gamma r_{01}. \quad (4)$$

Найдем значение фокусного расстояния системы по ходу крайнего луча.

Высота крайнего луча осевого пучка лучей, отраженного вторичным зеркалом, равна  $\rho' = \rho/\Gamma = r_{01} \operatorname{tg} \varphi_3 = r_{01} \operatorname{tg}(\sigma'/2)$ . Отсюда находим, что при  $\sigma'_1 = \pi/2$

$$\sin \sigma' = \frac{2\Gamma}{1 + \Gamma^2} \quad (5)$$

и тогда

$$f' = \frac{\rho}{\sin \sigma'} = r_{01} \frac{1 + \Gamma^2}{2\Gamma}. \quad (6)$$

При этом отступление от условия синусов можно определить как

$$\eta = \frac{f' - f'_0}{f'_0} = \frac{1}{\Gamma^2}. \quad (7)$$

Таким же отступлением условия синусов обладает отражающая поверхность параболоида вращения при том же диаметре входного зрачка  $D = 2r_{01}$  и при том же фокусном расстоянии  $f'_{0p} = f'_0$ .

Певцалева поверхность изображения имеет форму параболоида вращения, радиус кривизны в осевой точке которого  $R' = -1/(n'S_{IV})$ , где

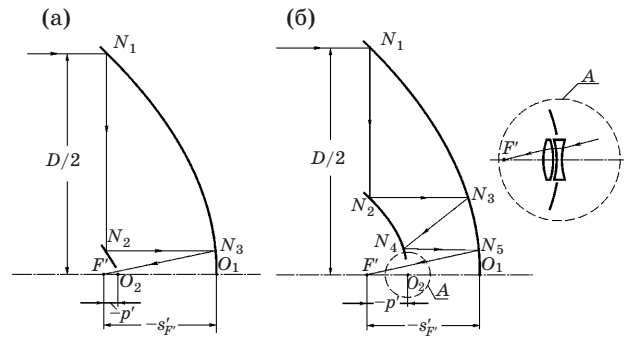


Рис. 1. Варианты композиции объектива на основе применения афокальной системы Мерсенна.

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} n_i r_i}.$$

В случае рассматриваемой системы

$$S_{IV} = 2 \frac{2 - \Gamma}{r_{01}}. \quad (8)$$

Если оптическая система представлена в виде отражающего параболоида, коэффициент  $S_{IV} = 2/r_{0p}$ , где  $r_{0p}$  – радиус кривизны параболоида в осевой точке. Из сопоставления выражений, определяющих коэффициент  $S_{IV}$ , следует, что кривизна поверхности изображения в этом случае меньше в  $\Gamma(2 - \Gamma)$  раз. Однако важно отметить, что длина рассматриваемой системы в  $\Gamma$  раз короче и равна  $L = r_{01}/2$ .

Итак, в рассматриваемой конструкции оптической системы достигается наибольший эффект укорочения системы: при диаметре входного зрачка (при  $\sigma' = \pm\pi/2$ ), в четыре раза превышающем абсолютную величину фокусного расстояния главного зеркала, длина системы равна фокусному расстоянию этого зеркала. При диаметре входного зрачка (главного зеркала), равном  $D$ , диаметр выходного зрачка (вторичного зеркала)

$$D' = \frac{D}{\Gamma}. \quad (9)$$

При этом диаметр отверстия в зеркале по ходу осевого пучка лучей

$$D'_0 = \frac{D}{\Gamma^2}. \quad (10)$$

Расстояние от вершины выпуклого зеркала до плоскости изображения (до фокальной плоскости каждой из поверхностей и всей системы в целом) определяет рабочий отрезок, равный

$$s_p = -f'_{02} = \frac{r_{01}}{2\Gamma}. \quad (11)$$

Очевидно, что при телецентрическом ходе главных лучей в пространстве изображений лучи внеосевых пучков будут “срезаться” на этом отверстии. Для того чтобы этого не было, диаметр отверстия должен быть равным

$$\tilde{D}'_0 = D' + 2l', \quad (12)$$

где  $l'$  – линейная величина изображения. Однако в этом случае крайний луч осевого пучка, минуя вторичное зеркало, падает на поверхность главного зеркала, после отражения от которой приходит в осевую точку изображения, как это показано на рис. 2, т. е. будет наблюдаться засветка “паразитным” светом не только осевой точки, но и всей поверхности изображения. Важно обратить внимание на то, что изображение, образованное “паразитными” лучами света, будет достаточно резким и наложенным на основное изображение. Поэтому необходимо полностью исключить попадание такого света на основное изображение. Эту задачу будем решать, используя соотношения параксиальной оптики. Для этого отражающие поверхности заменим их главными плоскостями, т. е. прогибом поверхностей в точках  $A'$ ,  $N_0$  и  $N$  будем пренебрегать.

Лучи, падающие в осевую и крайнюю точки изображения, пересекаются в точке  $A'$  на границе отверстия  $\tilde{D}'_0$ , которую можно считать изображением точки пересечения падающих на отражающую поверхность главного зеркала лучей в точки  $N_0$  и  $N$ . Из рисунка следует, что точка  $A$  должна лежать на продолжении параллельного оптической оси луча, падающего в точку  $N_0$  на расстоянии  $H_0$  от оси. Для определения положения точки  $A$  применим известную формулу Аббе:  $n'/s' - n/s = (n' - n)/r$ ,

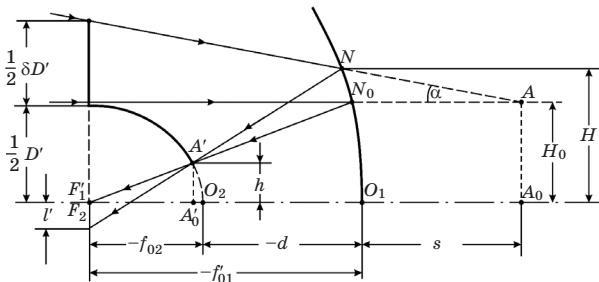


Рис. 2. Решение задачи устранения засветки изображения.

которая в случае отражающей поверхности принимает вид

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}. \quad (13)$$

Расстояние от вершины главного зеркала до плоскости, проходящей через точку  $A$  перпендикулярно оптической оси, будем считать равным  $s$ . В соответствии с формулой (13) отрезок может быть определен как

$$s = \frac{s'r}{2s' - r}. \quad (14)$$

В рассматриваемом случае  $s' = d$ , а  $r = r_{01}$ . Тогда  $s = dr_{01}/(2d - r_{01})$ . Но

$$d = \frac{1}{2}(r_{01} - r_{02}) = \frac{\Gamma - 1}{2\Gamma}r_{01}, \quad (15)$$

при этом

$$s = -\frac{\Gamma - 1}{2}r_{01}. \quad (16)$$

Из рисунка следует, что для исключения попадания “паразитного” света на поверхность изображения необходим экран в плоскости входного зрачка в виде кольцевой диафрагмы, ширина которой равна  $\delta D'/2$ . Согласно рисунку отрезок  $\delta D'/2$  равен

$$\frac{1}{2}\delta D' = H_0 - \frac{1}{2}D' + (s - f'_{01})\text{tg}\alpha, \quad (17)$$

где  $\text{tg}\alpha = (H - H_0)/s$ . Применив соотношение (16) и учитывая, что  $2f'_{01} = r_{01}$ , выражение (17) преобразуем к виду

$$D' + \delta D' = 2\frac{\Gamma H - H_0}{\Gamma - 1}. \quad (18)$$

Отрезок  $H_0$  находим из отношения сторон в подобных треугольниках –  $H_0/h = f'_{01}/f'_{02} = \Gamma$ . Отсюда следует, что

$$H_0 = \Gamma h. \quad (19)$$

Аналогично находим соотношение  $(H - H_0)/l' = d/f'_{02}$ . Отсюда, используя соотношения (15) и (19), определяем отрезок

$$H = \Gamma h + (\Gamma - 1)l'. \quad (20)$$

Подставив соотношения (19) и (20) в выражение (18), получаем

$$D' + \delta D' = 2\Gamma(h + l'). \quad (21)$$

Срезание внеосевых пучков лучей отсутствует, если  $h = D'_0/2 + l'$ . В этом случае

$$D' + \delta D' = \Gamma(D'_0 + 4l'). \quad (22)$$

В общем случае  $2l' = k'D'_0$ , где  $k' \geq 0$ . Тогда

$$D' + \delta D' = \Gamma(1 + 2k')D'_0 = \frac{1 + 2k'}{\Gamma} D. \quad (23)$$

При этом коэффициент экранирования зрачка по диаметру составит

$$k_3 = \frac{1 + 2k'}{\Gamma}. \quad (24)$$

Пусть, например, диаметр главного зеркала  $D = 5000$  мм. Тогда при  $\Gamma = 20^\times$  фокусное расстояние  $f'_{01} = -1250$  мм,  $f'_{02} = 62,5$  мм,  $f'_0 = \Gamma f'_{01} = -25\,000$  мм. Применяв формулы (9) и (10), получаем  $D' = 250$  мм,  $D'_0 = 12,5$  мм. При  $2l' = D'_0$ , т. е. при  $k' = 1$ , коэффициент  $k_3 = 0,15$ . В соответствии с формулой (12) “срезание” внеосевых пучков лучей отсутствует при диаметре отверстия в выпуклом зеркале, равном

$$\tilde{D}'_0 = (1 + k')D'_0 = 2D'_0 = 25 \text{ мм.}$$

Коэффициент пецвалевой кривизны поверхности изображения в соответствии с формулой (8) равен  $S_{IV} = 0,0144 \text{ мм}^{-1}$ . Угловое поле изображаемого рассматриваемой оптической системой пространства предметов ограничивается допустимой величиной комы изображения. При допустимом значении комы, в волновой мере равном  $W \leq 0,6\lambda$  [3, 4], где  $\lambda = \lambda_e$ , линейная величина изображения составляет  $2l' \leq 2,5$  мм, что соответствует угловому полю  $2\omega \leq 21''$ . Для компенсации остаточной комы изображения применим квазиафокальный двухлинзовый компенсатор [5], передняя узловая точка которого расположена в осевой точке изображения. В результате оптимизации по критерию качества изображения получаем компенсатор, конструктивные параметры которого представлены в табл. 1. Первая поверхность компенсатора находится на расстоянии  $r' = -62,5$  мм от осевой точки выпуклого зеркала.

ла. В результате этого угловое поле, удовлетворяющее вышеприведенному критерию качества, удалось увеличить до значений  $2\omega \leq 30''$ . На сферической поверхности, радиус кривизны которой  $R = 30$  мм, угловое поле  $2\omega \leq 1'$ .

Очевидным недостатком рассматриваемой системы является весьма малое расстояние от вершины вторичного зеркала до плоскости изображения. Задачу увеличения этого расстояния можно решить путем применения двойного хода лучей в афокальной системе, как показано на рис. 16. Угловое увеличение изображения, образованного афокальной системой при каждом проходе лучей, равно

$$\Gamma_i = -f'_{01}/f'_{02} = \sqrt{\Gamma_0}, \quad (25)$$

где  $f'_{01} = D/4$ ,  $f'_{02} = -1/\Gamma_i f'_{01}$ ,  $D$  – диаметр главного зеркала. При этом диаметр вторичного зеркала по ходу осевого пучка лучей

$$D' = D/\Gamma_i, \quad (26)$$

а диаметр отверстия во вторичном зеркале, соответственно, равен

$$D'_0 = D/\Gamma_i^3. \quad (27)$$

Для исключения засветки изображения необходим экран в плоскости входного зрачка (в плоскости апертурной диафрагмы). Как и в предыдущем случае, находим, что

$$D' + \delta D' = \left(1 + 2k' - \frac{k'}{\Gamma_0^2}\right) \frac{D}{\sqrt{\Gamma_0}}. \quad (28)$$

При этом коэффициент центрального экранирования зрачка по диаметру

$$k_3 = \frac{D' + \delta D'}{D} \leq \frac{1 + 2k'}{\sqrt{\Gamma_0}}. \quad (29)$$

Пусть, как и в предыдущем примере,  $D = 5000$  мм. Тогда при  $\Gamma_0 = 20^\times$  фокусное расстояние  $f'_{01} = D/4 = -1250$  мм. Однако фокусное расстояние вторичного зеркала

**Таблица 1.** Конструктивные параметры оптической системы компенсатора

№ пов.	Радиус, мм	Толщина, возд. пром., мм	Среда	Показатель преломл.	Световой диаметр, мм
1	-48,220	5,00	Воздух	1,000000	
2	306,680	2,00	ТК8	1,616754	19,8
3	302,810	3,00	Воздух	1,000000	20,0
4	-47,410		ТК8	1,616754	20,2
			Воздух	1,000000	20,3

$$f'_{02} = -\frac{1}{\Gamma_i} f'_{01} = -\frac{1}{\sqrt{\Gamma_0}} f'_{01} = -223,6 \text{ мм.}$$

Диаметр вторичного зеркала по ходу осевого пучка лучей

$$D' = \frac{D}{\Gamma_i} = \frac{D}{\sqrt{\Gamma_0}} = 894,4 \text{ мм,}$$

а диаметр отверстия в зеркале

$$D'_0 = \frac{D}{\Gamma_0 \sqrt{\Gamma_0}} = 44,72 \text{ мм.}$$

И в этом случае линейную величину изображения будем считать равной  $2l' = 5$  мм, что соответствует коэффициенту  $k' = 0,112$ . При этом коэффициент экранирования  $k_s = 0,274$ . Если удвоить величину изображения, приняв  $2l' = 10$  мм, то коэффициент  $k' = 0,224$ , а коэффициент  $k_s = 0,324$ , что вполне приемлемо. В изображении, образованном рассматриваемой оптической системой, отсутствуют сферическая aberrация и астигматизм, но линейная величина изображения, ограничиваемая допустимой величиной остаточной комы, равна всего лишь  $2l' = 2,4$  мм. Однако в рассматриваемой оптической системе рабочий отрезок, равный фокусному расстоянию выпуклого зеркала, увеличен по сравнению с отрезком в исходной системе в  $\sqrt{\Gamma_0}$  раз и в приведенном примере равен  $f'_{02} = -223,6$  мм, что естественным образом повышает эффективность применения двухлинзового квазиафокального компенсатора остаточной комы.

В результате оптимизации по критерию качества изображения получаем компенсатор, конструктивные параметры которого представлены в табл. 2. Первая поверхность компенсатора расположена на расстоянии  $p' = -223,6$  мм от осевой точки выпуклого зеркала. В результате этого угловое поле стало равным  $2\omega \leq 54''$ . На сферической поверхности, радиус кривизны которой  $R = 105$  мм, при том же качестве изображения угловое поле  $2\omega \leq 2'$ .

Рассмотрим возможные варианты построения зеркальной оптической системы путем дополнения компактной афокальной системы Мерсенна системой отражающих поверхностей несферической формы. Волновые aberrации в каждой точке изображения, образованного оптической системой, представляющей собой сочетание афокальной системы с двухзеркальной системой Ричи-Кретьена, практически не превышают критерия Рэлея (порядка  $\lambda/4$ ) в пределах углового поля  $2\omega \leq 30''$ . На сферической поверхности, радиус кривизны которой  $R = -32,6$  мм, при том же качестве изображения угловое поле  $2\omega \leq 1'$ . Заменив двухзеркальную систему трехзеркальной с промежуточным изображением после второй отражающей поверхности, получим оптическую систему, конструктивные параметры которой приведены в табл. 3.

Уравнения несферических поверхностей системы:

**Таблица 2.** Конструктивные параметры оптической системы компенсатора

№ пов.	Радиус, мм	Толщина, возд. пром., мм	Среда	Показатель преломл.	Световой диаметр, мм
1	-192,460	20,00	Воздух	1,00000	68,8
2	2088,549	5,00	ТК8	1,616754	
3	2119,814	10,00	Воздух	1,000000	
4	-190,779		ТК8	1,616754	
			Воздух	1,000000	69,5

**Таблица 3.** Конструктивные параметры оптической системы объектива

№ пов.	Радиус, мм	Толщина, возд. пром., мм	Среда	Показатель преломл.	Световой диаметр, мм
A <sub>1</sub>	-2500,000	-1187,50	Воздух	1,000000	5000,5
A <sub>2</sub>	-125,000	1250,00	Воздух	-1,000000	
A <sub>3</sub>	-726,663	-309,38	Воздух	1,000000	250,6
A <sub>4</sub>	-257,738	392,81	Воздух	-1,000000	256,8
A <sub>5</sub>	-400,000		Воздух	1,000000	40,1
			Воздух	-1,000000	124,3

Таблица 4. Остаточные aberrации изображения при  $R = 65,9$  мм ( $\lambda = 0,54607$  мкм)

$S_0$	$Z_0$	$Z'(0)$	$S'(0)$	$F'(0)$	$V_3P(0)$	$S'A$
	-1250	-268,9	-600,0	25002	-0,0132	-600,0
$MU = 0$	$H$	$ДС'(0)$	$TGC'$	$Y'(0)$	$W(0)$	$\Theta TA \%$
	2499	0,0218	0,100	0,00219	-0,250	-0,0155
	2164	0,0262	0,0869	0,00228	-0,195	-0,0122
	1767	0,0286	0,0709	0,00203	-0,131	-0,0085
	1250	0,0290	0,0500	0,00145	-0,0648	-0,0045
	1249	-0,0659	0,0506	-0,0015	0,0593	-0,00015
$MU$	$TGC'$	$Y'(0)$	ДИС	$Z'M$	$Z'S$	$Z'M-Z'S$
0,622-3	-0,0469	-15,5	0,00859	0,0295	0,0219	0,00765
0,880-3	-0,0662	-21,7	0,0240	-0,0297	-0,0218	-0,00790
$MU$	$H$	$TGC'$	$ДTGC'$	$ДY'$	$W(0)$	
0,880-3	2498	0,0369	0,103	-0,0080	0,428	
	2163	0,0229	0,0892	-0,0050	0,266	
	1766	0,00639	0,0726	-0,0029	0,149	
	1249	-0,0150	0,0512	-0,0015	0,0656	
	-1249	-0,117	-0,0509	0,00196	0,0857	
	-1766	-0,138	-0,0720	0,00299	0,183	
	-2163	-0,154	-0,0882	0,00383	0,285	
	-2498	-0,168	-0,102	0,00458	0,392	
$MU$	$M$	$TGC'$	$TGD'$	$ДX'$	$W(0)$	$ДY'$
0,880-3	2498	-0,0649	0,102	-0,0064	0,375	-0,0011
	2163	-0,0652	0,0879	-0,0044	0,242	-0,00071
	1766	-0,0656	0,0717	-0,0028	0,138	-0,00038
	1249	-0,0659	0,0506	-0,0015	0,0593	-0,00015

$$A_1: \rho^2 = -5000z;$$

$$A_2: \rho^2 = -250z;$$

$$A_3: \rho^2 = -1453,325z - 0,0916944542z^2;$$

$$A_4: \rho^2 = -515,475z - 9,0678022z^2;$$

$$A_5: \rho^2 = -800z - 0,7448939z^2.$$

Угловое поле изображаемого полученной системой пространства при достаточно хорошей коррекции сферической aberrации, комы и астигматизма не превышает  $2\omega \leq 50''$ . На сферической поверхности, радиус которой  $R = 65,9$  мм, угловое поле  $2\omega \leq 6'$ . При этом остаточные aberrации изображения приведены в табл. 4.

Из анализа состояния коррекции aberrаций изображения, образованного рассматриваемой оптической системой, следует, что угловая величина изображаемого пространства ограничивается прежде всего кривизной поверхности изображения. Для компенсации кривизны поверхности изображения можно применить линзу Смита [5]. Можно попытаться применить схемное решение этой задачи, для чего афокальную систему дополним трехзеркальной

системой, оптическая схема которой представлена на рис. 3. Первые две отражающие поверхности образуют телескопическую систему кеплеровского типа. Для решения поставленной задачи абсолютная величина диафрагмен-

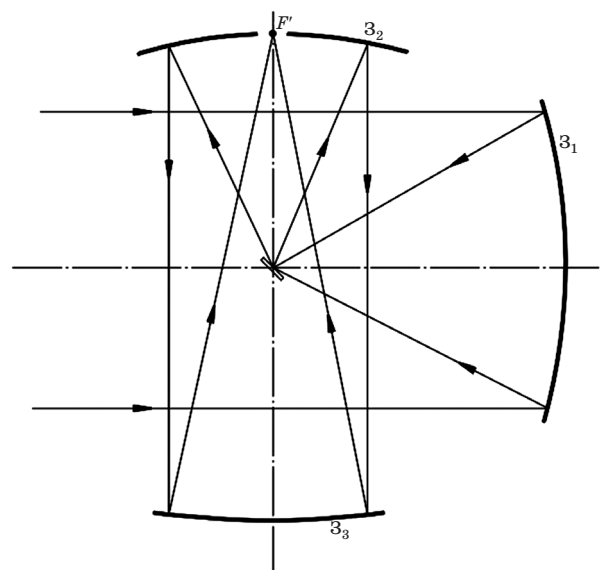


Рис. 3. Вариант композиции объектива из трех отражающих поверхностей.

ного числа первого зеркала должна удовлетворять условию  $|F| \leq 1$ . Это условие определяет высокую светосилу дополнительной трехзеркальной системы и, соответственно, оптической системы рассматриваемого объектива в целом, что превращает процесс коррекции aberrаций широкого пучка лучей в достаточно серьезную проблему.

Рассмотренные варианты оптических систем позволяют сделать вывод, что конструк-

тивное решение задачи построения компактной оптической системы объектива, диаметр которого примерно в четыре раза превышает его длину, вполне возможно. Важно отметить, что при использовании объектива для работы в более длинноволновом диапазоне излучения снижаются требования к коррекции aberrаций образованного изображения и, соответственно, повышается технологичность изготовления объектива.

\* \* \* \* \*

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Русинов М.М.* Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 206 с.
2. *Чуриловский В.Н.* О новом типе астрономического зеркального объектива, основанного на системе Мерсенна // Сб. статей "Оптическое приборостроение". М.-Л.: ЛИТМО, 1958. В. 27. С. 11-31.
3. *Марешаль А., Франсон М.* Структура оптического изображения. Пер. с франц. М.: Мир, 1964. 295 с.
4. *Сокольский М.Н.* Допуски и качество оптического изображения. Л.: Машиностроение, 1989. 221 с.
5. *Чуриловский В.Н.* Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.