

А. В. БАХОЛДИН, Г. И. ЦУКАНОВА

## ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ НЕСВЕТСИЛЬНЫХ ОРТОСКОПИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ ОБЪЕКТИВОВ

Проведены исследование, расчет и сравнительный анализ трехзеркальных систем с промежуточным изображением после отражения от двух зеркал, имеющих следующие оптические характеристики: относительное отверстие 1:30, угловое поле  $2\omega=1^\circ$ , фокусное расстояние — несколько десятков метров.

**Ключевые слова:** зеркальные объективы, астрономические объективы, дисторсия, оптический расчет.

Центрированным трехзеркальным системам с промежуточным изображением после отражения от двух зеркал, а только по этой схеме и может быть построена малогабаритная система с относительным отверстием 1:30 и угловым полем  $2\omega = 1^\circ$ , свойственна зависимость между степенью исправления дисторсии, относительным отверстием главного зеркала и величиной экранирования входного зрачка.

В системах этого типа экранирование входного зрачка вызывается двумя разными элементами. Первое экранирование — это экранирование вторым зеркалом, как в системах Кассегрена и Ричи—Кретьена, которое не зависит от относительного отверстия и углового поля системы. Второе экранирование входного зрачка возникает из-за промежуточного изображения. В зависимости от конструкции системы экранирование происходит или из-за отверстия в наклонном зеркале, расположенном после третьего зеркала, или из-за плоского зеркала, расположенного вблизи промежуточного изображения и ломающего оптическую ось третьего зеркала на  $90^\circ$ . Второе экранирование прямо пропорционально зависит от относительного отверстия и углового поля системы.

Относительное отверстие главного зеркала определяет сложность изготовления зеркала с высокой степенью точности и допуски на изготовление и сборку.

Цель настоящего исследования — получение оптимального варианта оптической системы с исправленной дисторсией и приемлемыми значениями экранирования и относительного отверстия главного зеркала. Поскольку второе экранирование зависит от относительного отверстия и углового поля, рассмотренные ранее системы с относительными отверстиями 1:10, 1:15 [1, 2] не могут быть использованы в качестве прототипов.

В работе рассматриваются только центрированные системы, работающие полным полем. В таблице приведены основные параметры системы:  $K_1$  — диафрагменное число главного зеркала,  $d_1$  — расстояние между первым и вторым зеркалом при  $f' = 1$ ,  $d_2$  — расстояние между вторым и третьим зеркалом при  $f' = 1$ ,  $\alpha_3$  — увеличение третьего зеркала,  $h_3$  — отношение диаметра осевого пучка третьего зеркала к диаметру входного зрачка,  $S_5$  — коэффициент дисторсии 3-го порядка (если  $S_5 = 7,27$ , то при  $2\omega = 1^\circ$  дисторсия составляет 0,03 %, если  $S_5 = 5,29$  — 0,02 %),  $h_2$  — экранирование по диаметру зрачка, вносимое вторым зеркалом,  $\varepsilon$  — экранирование, вносимое промежуточным изображением при  $2\omega=1^\circ$ . Из таблицы видно, что получить систему со строгим исправлением дисторсии при относительном отверстии главного зеркала 1:2,2 и экранированием, не превышающим 0,4, невозможно.

Была рассчитана и оптимизирована система № 4 с коэффициентом дисторсии  $S_5 = 5,29$  и экранированием  $\varepsilon = 0,4$  (рис. 1, где 1 — главное зеркало эллиптической формы, близкой к параболоиду, 2 — вторичное зеркало гиперболической формы, 3 — третье зеркало эллиптической формы, 4 — плоское зеркало с отверстием для пространственного разделения световых

потоков, 5 — плоскость изображения; остальные нумерованные плоские зеркала необходимы для компоновки заднего отрезка в наименьшем объеме). Осевая длина системы при  $f'=30$  м составляет 4,14 м, дисторсия при  $2\omega = 1^\circ$  равна 0,02 % (в линейной мере 0,053 мм), при  $2\omega = 45'$  дисторсия равна 0,01 % (в линейной мере 0,022 мм). Качество изображения точек по всему полю дифракционное.

Параметры рассчитанных вариантов систем

№ системы	$K_1$	$d_1$	$d_2$	$\alpha_3$	$h_3$	$S_5$	$h_2$	$\varepsilon$
1	2,2	-0,053	0,126	5,0	-0,35	6,33	0,280	0,37
2	2,2	-0,052	0,130	4,9	-0,35	5,98	0,286	0,38
3	2,2	-0,052	0,134	4,8	-0,35	5,64	0,292	0,39
4	2,2	-0,051	0,138	4,7	-0,35	5,29	0,299	0,40
5	2,2	-0,051	0,142	4,6	-0,35	4,96	0,305	0,41
6	2,2	-0,053	0,126	4,6	-0,30	5,07	0,280	0,48
7	2,0	-0,046	0,132	5,0	-0,35	5,12	0,311	0,37
8	2,0	-0,046	0,136	4,9	-0,35	4,82	0,317	0,38
9	2,0	-0,045	0,140	4,8	-0,35	4,53	0,323	0,39
10	2,0	-0,045	0,144	4,7	-0,35	4,24	0,329	0,40
11	2,0	-0,044	0,149	4,6	-0,35	3,94	0,335	0,41
12	2,0	-0,046	0,132	4,6	-0,30	3,79	0,309	0,48
13	1,8	-0,039	0,139	5,0	-0,35	4,03	0,345	0,37
14	1,8	-0,039	0,143	4,9	-0,35	3,78	0,351	0,38
15	1,8	-0,039	0,147	4,8	-0,35	3,53	0,357	0,39
16	1,8	-0,038	0,152	4,7	-0,35	3,27	0,363	0,40
17	1,8	-0,038	0,156	4,6	-0,35	3,03	0,369	0,41
18	1,8	-0,039	0,139	4,6	-0,30	2,63	0,341	0,48
19	1,6	-0,033	0,147	5,0	-0,35	3,06	0,383	0,37
20	1,6	-0,033	0,151	4,9	-0,35	2,84	0,389	0,38
21	1,6	-0,032	0,155	4,8	-0,35	2,63	0,395	0,39
22	1,6	-0,032	0,160	4,7	-0,35	2,41	0,401	0,40
23	1,6	-0,032	0,165	4,6	-0,35	2,19	0,407	0,41
24	1,6	-0,033	0,147	4,6	-0,30	1,58	0,378	0,48
25	1,4	-0,027	0,155	5,0	-0,35	2,17	0,426	0,37
26	1,4	-0,026	0,159	4,9	-0,35	1,99	0,432	0,38
27	1,4	-0,026	0,164	4,8	-0,35	1,80	0,437	0,39
28	1,4	-0,026	0,169	4,7	-0,35	1,61	0,443	0,40
29	1,4	-0,026	0,174	4,6	-0,35	1,42	0,450	0,41
30	1,4	-0,027	0,156	4,6	-0,30	0,61	0,420	0,48
31	1,2	-0,021	0,165	5,0	-0,35	1,36	0,474	0,37
32	1,2	-0,021	0,169	4,9	-0,35	1,21	0,480	0,38
33	1,2	-0,021	0,174	4,8	-0,35	1,05	0,486	0,39
34	1,2	-0,020	0,179	4,7	-0,35	0,89	0,492	0,40
35	1,2	-0,020	0,184	4,6	-0,35	0,72	0,498	0,41
36	1,2	-0,021	0,167	4,6	-0,30	-0,275	0,467	0,48
37	1,2	-0,021	0,170	4,614	-0,31	-0,0006	0,473	0,466
38	1,2	-0,020	0,179	4,5	-0,32	0,0002	0,486	0,466

Если принять допустимым значение экранирования  $\varepsilon = 0,47$ , тогда при относительном отверстии главного зеркала 1:1,2 получается система со строгим исправлением дисторсии для  $2\omega = 1^\circ$  и дифракционным качеством изображения (система № 37), ее осевая длина 5,1 м при  $f'=30$  м, диаметр главного зеркала 1 м.

При уменьшении углового поля до  $40\text{--}45'$  можно получить системы со строгим исправлением дисторсии при относительных отверстиях главного зеркала  $1:1,6\text{--}1:1,5$  и экранировании не более  $0,4$ . Одна из таких систем с  $f' = 30$  м, диаметром главного зеркала 1 м и угловым полем  $2\omega = 40'$  приведена на рис. 2 (обозначения те же, что и на рис. 1). Осевая длина системы 4 м.

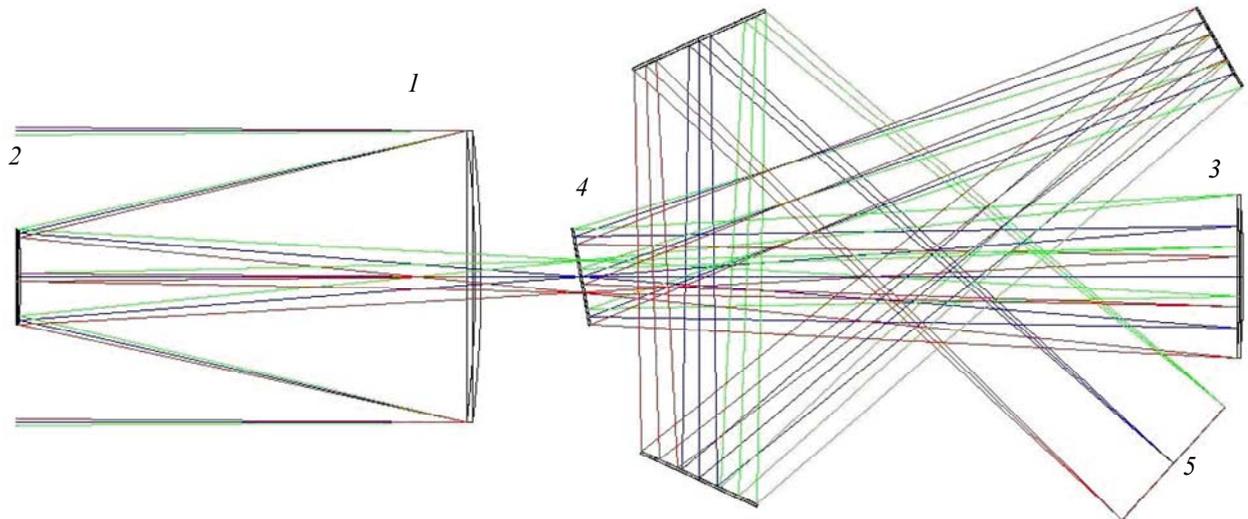


Рис. 1

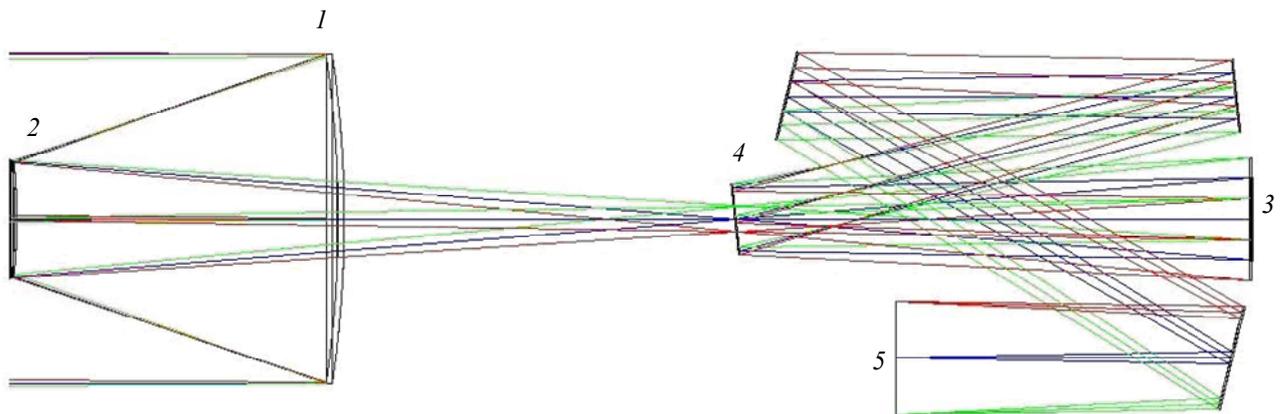


Рис. 2

Анализ результатов, полученных в работе, позволяет сделать следующие выводы: при небольших относительных отверстиях главного зеркала порядка  $1:2,2\text{--}1:1,6$  можно сделать равным нулю  $S_5$  при  $2\omega = 1^\circ$ , но тогда экранирование получается больше  $0,5$ . Если угловое поле  $2\omega = 45'$ , тогда экранирование уменьшится приблизительно в  $1,3$  раза. Увеличение относительного отверстия главного зеркала ведет к медленному уменьшению  $S_5$ , но при этом возрастает первое экранирование и становится равным второму.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чубей М. С., Цуканова Г. И., Бахолдин А. В. Специфика расчета оптической системы астрографа для проекта „Межпланетная солнечная стереоскопическая обсерватория“ // Оптич. журн. 2007. Т. 74, № 7. С. 37—41.
2. Чубей М. С., Цуканова Г. И., Бахолдин А. В. Защита от прямых засветок в системе астрографа для Межпланетной солнечной стереоскопической обсерватории // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 8. С. 70—73.

**Сведения об авторах**

- Алексей Валентинович Бахолдин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;  
E-mail: bakholdin@aco.ifmo.ru
- Галина Ивановна Цуканова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;  
E-mail: ZukanovaGI@aco.ifmo.ru

Рекомендована факультетом ОИСТ

Поступила в редакцию  
25.11.11 г.