

## ИССЛЕДОВАНИЕ И РАСЧЕТ СВЕТОСИЛЬНЫХ ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ БЕЗ ПРОМЕЖУТОЧНОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

© 2016 г. К. Д. Бутылкина, аспирант; А. В. Бахолдин, канд. техн. наук;  
Г. Э. Романова, канд. техн. наук

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: : butylkinax@gmail.com, bakholdin@aco.ifmo.ru, romanova\_g\_e@mail.ru

Рассмотрены схемы трехзеркальных систем с выпуклым вторичным и вогнутым третьим зеркалами. Приводятся диапазоны исходных параметров, в пределах которых могут быть найдены конструктивно приемлемые решения. Выполнен анализ формы зеркал в системе. Приводятся примеры расчета схем.

**Ключевые слова:** зеркальные системы, трехзеркальные объективы.

Коды OCIS: 220.1000, 350.1260, 350.6090

Поступила в редакцию 30.05.2015.

Зеркальные системы в составе космических аппаратов давно и широко используются как для решения задач обзора неба, так и для наблюдения Земли из космоса. Одними из основных требований к таким системам являются малые габариты и высокое качество изображения, обеспечивающее необходимое разрешение. При этом системы также должны иметь широкое угловое поле (до единиц градусов) [1–3]. Для решения таких задач могут применяться как зеркально-линзовые [1, 4], так и зеркальные системы без дополнительных линзовых корректоров [5–7]. Последние позволяют работать в широком спектральном диапазоне, кроме того, в этом случае не возникает дополнительных проблем с подбором материалов линзовых корректоров, обеспечивающих стабильность характеристик во всем диапазоне рабочих температур [8].

Наиболее простые зеркальные системы, решающие эти задачи, – трехзеркальные системы [1, 9, 10]. Для создания светосильных компактных систем наиболее подходящей является схема с выпуклым вторичным и вогнутым третьим зеркалами, без промежуточного изображения. Схема такой системы представлена на рис. 1 с приведением условных обозначений, используемых при расчете.

Для описания, анализа и расчета зеркальных систем традиционно применяют параксиальные лучи (нулевые лучи) и теорию aberrаций третьего порядка [11]. Для системы рассма-

триваемого типа приняты следующие условия нормировки:  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha_4 = -1$ ,  $f' = -1$ ,  $h_1 = 1$ . Для габаритного и абберационного расчетов в качестве исходных данных задаются параксиальные углы  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  и высота параксиального луча на втором зеркале  $h_2$  [12].

Для получения высокого качества изображения в системе должны быть устранены четыре монохроматические aberrации. Условие устранения кривизны плоскости изображения [8]

$$\alpha_2 - \frac{\alpha_3 + \alpha_2}{h_2} + \frac{\alpha_4 + \alpha_3}{h_3} = 0, \quad (1)$$

где  $\alpha$  – углы нулевых лучей с оптической осью,  $h$  – высоты нулевых лучей на главных плоскостях.

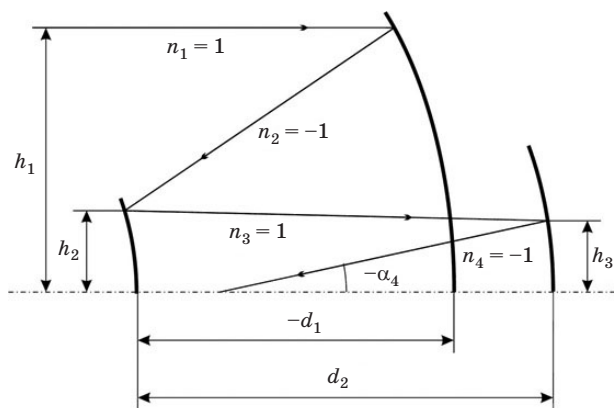


Рис.1. Принципиальная оптическая схема исследуемого объектива.

Для исправления остальных трех aberrаций параметрами выступают коэффициенты деформации зеркал –  $\sigma$  (конические константы) [8]

$$\sigma_1 = \frac{2S_2 + 2S_3 - 8a}{S_2 S_3 \alpha_2^3} - 1, \quad (2)$$

$$\sigma_2 = \frac{2S_3 - 8a}{h_2 S_2 (S_3 - S_2) (\alpha_3 + \alpha_2)^3} - \frac{(\alpha_3 - \alpha_2)^2}{(\alpha_3 + \alpha_2)^2}, \quad (3)$$

$$\sigma_3 = \frac{2S_2 - 8a}{h_3 S_3 (S_3 - S_2) (\alpha_4 + \alpha_3)^3} - \frac{(\alpha_4 - \alpha_3)^2}{(\alpha_4 + \alpha_3)^2}, \quad (4)$$

где вспомогательные величины

$$S_2 = \frac{-d_1}{h_2}, \quad S_3 = \frac{d_2 - d_1 h_3}{h_2 h_3},$$

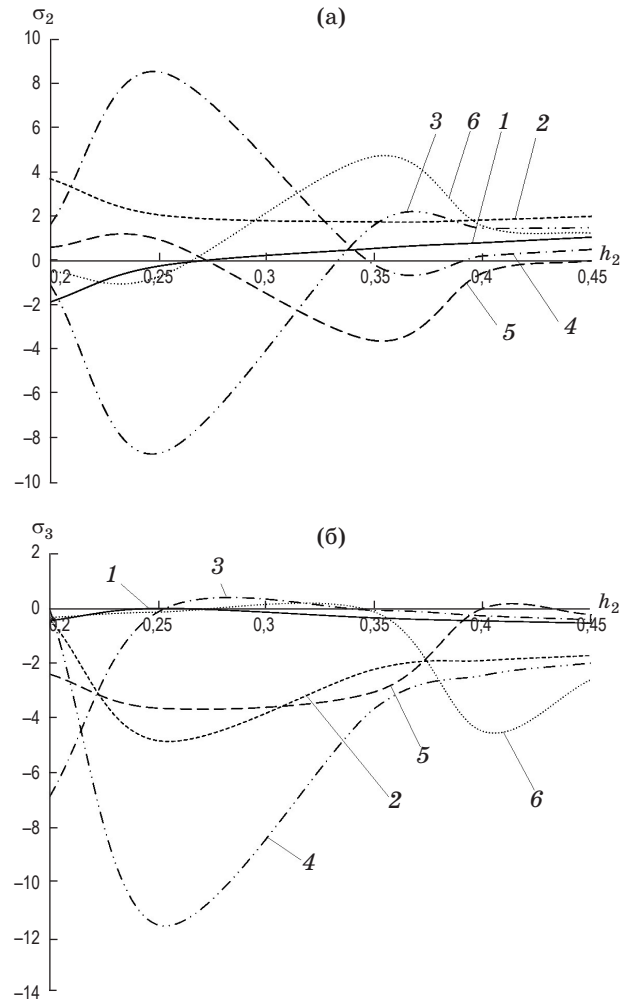
$$a = \frac{1}{2} [S_2 (\alpha_3^2 - \alpha_2^2) + S_3 (\alpha_4^2 - \alpha_3^2)],$$

$d_1$  – расстояние между первым и вторым зеркалами,  $d_2$  – расстояние между вторым и третьим зеркалами.

В рамках выбранных диапазонов исходных данных  $-2 \leq \alpha_2 \leq -1,2$ ,  $-0,1 \leq \alpha_3 \leq 0,1$  и  $0,1 \leq h_2 \leq 0,45$  были выполнены анализ схем с точки зрения габаритов и aberrационный анализ, а также определены промежутки существования приемлемых решений, в которых коэффициент центрального экранирования не превышал значения 0,55, а длина системы была не более  $1,5f'$  (см. таблицу).

В рассматриваемых системах все зеркала представляют собой асферические поверхности второго порядка. Поскольку сферические зеркала имеют ряд преимуществ при изготовлении, наличие хотя бы одного такого зеркала может значительно облегчить изготовление и юстировку системы, а также уменьшить ее стоимость. Поэтому при исследовании рассматривалась и форма зеркал в рассчитанных объективах. Форма первого зеркала меняется от эллиптической, близкой к параболической, до гиперболической, не сильно отличающейся от параболической (значения  $\sigma_1$  от  $-1,362$  до  $-0,864$ ).

Зависимости квадрата эксцентриситета второго и третьего зеркал от  $h_2$  для нескольких сочетаний значений  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$  приведены на рис. 2. Форма зеркал меняется от сплюснутого эллипсоида до гиперboloида (значения  $\sigma_2$  от  $-8,678$  до  $8,540$ ,  $\sigma_3$  от  $-11,581$  до  $0,0544$ ), следовательно, могут быть найдены системы со сферическим вторым зеркалом. Удачные системы с точки зрения дальнейшей реализации найдены в диапазоне  $-1,5 \leq \alpha_2 \leq -1,2$ . При  $\alpha_2 < -1,5$  нет систем



**Рис. 2** Зависимости коэффициентов деформации второго (а) и третьего (б) зеркал от  $h_2$  при различных значениях  $\alpha_2$  и  $\alpha_3$ . 1 –  $\alpha_2 = -1,2$ ,  $\alpha_3 = -0,05$ , 2 –  $\alpha_2 = -1,2$ ,  $\alpha_3 = 0,05$ , 3 –  $\alpha_2 = -1,35$ ,  $\alpha_3 = -0,05$ , 4 –  $\alpha_2 = -1,35$ ,  $\alpha_3 = 0,05$ , 5 –  $\alpha_2 = -1,5$ ,  $\alpha_3 = -0,05$ , 6 –  $\alpha_2 = -1,5$ ,  $\alpha_3 = 0,05$ .

со сферическими зеркалами, имеющих приемлемые габариты и коэффициент экранирования. Системы со сферическим вторым зеркалом будут иметь значительную осевую длину  $d_2$ , с точки зрения защиты от постороннего света более приемлемыми являются системы со сферическим третьим зеркалом.

Наибольшее количество приемлемых решений со сферическим вторым или третьим зеркалами имеет параллельный или близкий к параллельному ход лучей внутри системы. Например, приемлемые решения со сферическим вторым зеркалом при  $\alpha_2 = -1,2$  могут быть найдены в диапазонах  $h_2 = 0,25-0,3$  и  $h_2 = 0,4-0,45$ , а при значениях  $\alpha_2$  от  $-1,5$  до  $-1,35$  будут находиться в диапазоне  $h_2 = 0,4-0,45$ . Решения со сферическим третьим зеркалом для систем

с параллельным ходом луча между вторым и третьим зеркалами при  $\alpha_2$  от  $-1,5$  до  $-1,2$  будут сосредоточены в области значений  $h_2 = 0,35-0,42$ .

Проведенное исследование показало, что может быть получено большое количество систем с приемлемыми габаритами, исправленными сферической абберацией, комой, астигматизмом и кривизной плоскости изображения в области аббераций третьего порядка, оптимальным положением плоскости изображения. Найденные решения при дальнейшем расчете необходимо анализировать с точки зрения экранирования, вызываемого необходимостью защиты плоскости изображения от постороннего света. Не во всех найденных диапазонах (таблица) оптические схемы позволяют получить угловое поле более  $1^\circ$  в связи с возникающим экранированием плоскостью приемника, третьим зеркалом, если оно находится внутри системы, или отверстием в главном зеркале, если третье зеркало вынесено за первое зеркало.

Могут быть найдены решения, в которых используются два сферических зеркала. На рис. 3а приведена схема системы со следующими характеристиками: фокусное расстояние  $f' = 900$  мм, относительное отверстие 1:1,7, угловое поле  $2\omega = 2^\circ$ , ее частотно-контрастная характеристика (ЧКХ) приведена на рис. 3б. Система имеет

Диапазоны  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$  и  $h_2$ , дающие конструктивно приемлемые решения

$h_2$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
0,2	-1,20	$-0,05 \leq \alpha_3 \leq 0$
	-1,35	$0 \leq \alpha_3 \leq 0,07$
	-1,50	$0 \leq \alpha_3 \leq 0,09$
	-1,60	$0 \leq \alpha_3 \leq 0,09$
	-1,80	$0,07 \leq \alpha_3 \leq 0,09$
0,25	-1,20	$-0,05 \leq \alpha_3 \leq 0$
	-1,35	$0 \leq \alpha_3 \leq 0,02$
	-1,50	$0 \leq \alpha_3 \leq 0,09$
	-1,60	$0,05 \leq \alpha_3 \leq 0,09$
	-1,80	$0,07 \leq \alpha_3 \leq 0,09$
0,35	-1,20	-0,09
	-1,35	$-0,09 \leq \alpha_3 \leq -0,05$
	-1,50	$-0,07 \leq \alpha_3 \leq 0$
	-1,60	$0 \leq \alpha_3 \leq 0,05$
0,4	-1,35	$-0,09 \leq \alpha_3 \leq -0,08$
	-1,50	$-0,09 \leq \alpha_3 \leq -0,05$
	-1,60	$-0,09 \leq \alpha_3 \leq 0$
	-1,80	0,05
0,45	-1,50	-0,09
	-1,60	$-0,09 \leq \alpha_3 \leq -0,07$
	-1,80	-0,02

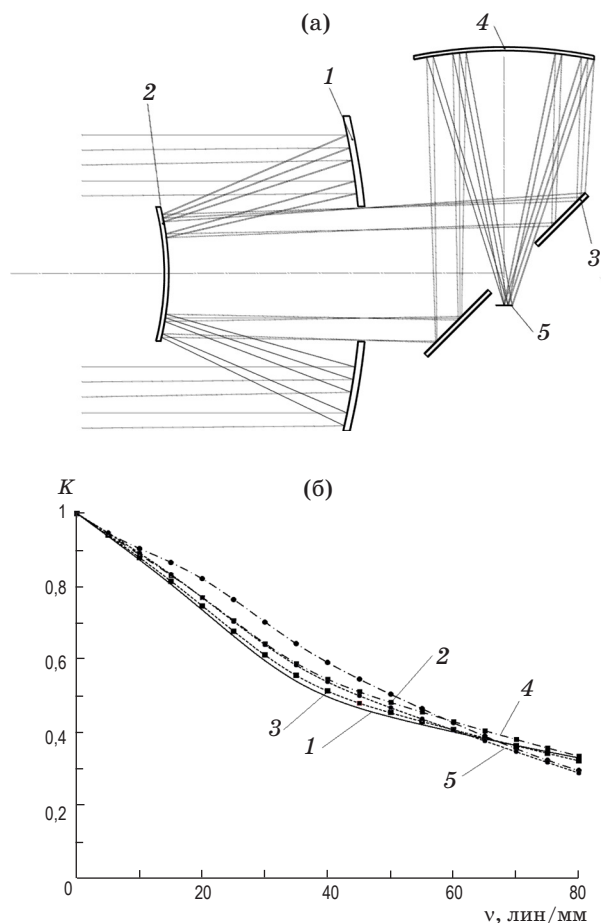
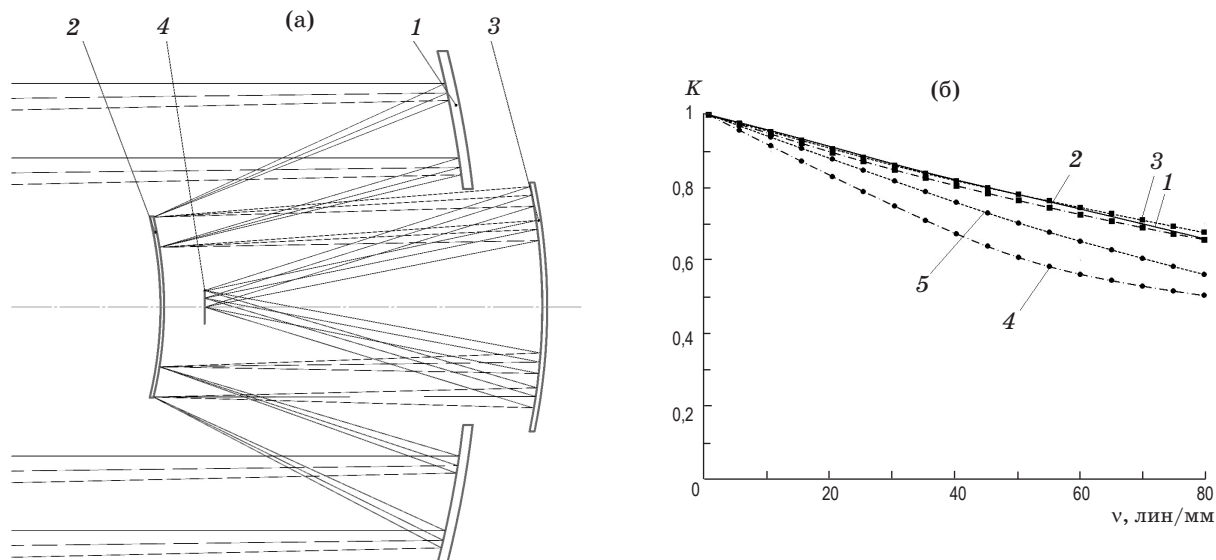


Рис. 3. Оптическая схема объектива с  $f' = 900$  мм,  $2\omega = 2^\circ$  и относительным отверстием 1:1,7 (а). 1 – асферическое главное зеркало, 2, 4 – сферические зеркала, 3 – плоское наклонное зеркало, 5 – плоскость приемника. Частотно-контрастная характеристика этого объектива (б). 1 – осевой пучок, 2, 3 –  $\omega = 0,5^\circ$  (меридиональное и сагиттальное сечения), 4, 5 –  $\omega = 1^\circ$  (меридиональное и сагиттальное сечения).

длину 1080 мм (без дополнительного наклонного зеркала), однако ее габариты могут быть уменьшены до 700 мм за счет применения плоского зеркала, как показано на рис. 3а. Первое зеркало представляет собой асферическую поверхность высшего порядка, второе и третье – сферы.

Полученная система достаточно компактна за счет излома оптической оси, позволяет разрешить контраст 0,3 на частоте 80 лин/мм и имеет преимущество – два сферических зеркала.

Еще один пример оптической системы приведен на рис. 4а, ее ЧКХ – на рис. 4б. В системе имеется одно сферическое (третье) зеркало, два других представляют собой асферические поверхности: первое – высшего порядка, второе – второго. Обеспечивается контраст 0,5 на частоте 80 лин/мм.



**Рис. 4.** Оптическая схема объектива с  $f' = 850$  мм,  $2\omega = 2,5^\circ$  и относительным отверстием 1:1,7 (а). 1–3 – асферические зеркала, 4 – плоскость фотоприемника. Частотно-контрастная характеристика этого объектива (б). 1 – осевой пучок, 2, 3 –  $\omega = 0,62^\circ$  (меридиональное и сагиттальное сечения), 4, 5 –  $\omega = 1,25^\circ$  (меридиональное и сагиттальное сечения).

Таким образом, полученные соотношения позволили найти сочетания оптимальных исходных параметров трехзеркальной системы без промежуточного изображения. Результаты проведенного исследования позволяют рассчитать светосильные широкоугольные трехзер-

кальные схемы, которые могут найти применение в системах дистанционного зондирования Земли.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации по договору № 02.G25.31.0195.

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Terebizh B. Modern optical telescopes. М.: Fizmatlit, 2005. 80 p.
2. Денисенко С.А., Камус С.Ф., Пименов Ю.Д., Тергоев В.И., Панушев П.Г. Светосильный широкоугольный телескоп АЗТ-33ВМ // Оптический журнал. 2009. Т. 76. № 10. С. 48–51.
3. Davison W.B., Angel P. Large synoptic survey telescope mechanical structure and design // Proc. SPIE 4836. Survey and Other Telescope Technologies and Discoveries. December 1. 2002. doi:10.1117/12.457315 V. 4836. P. 104–110.
4. McGuire J.P. A fast, wide field of view, catadioptric telescope for whipple // Classical Optics, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), paper IM3A.3
5. Сычев В.В. Технологические аспекты создания крупногабаритных оптических телескопов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. Журнал. 2015. № 02. С. 269–285.
6. Zhiyuan Gu, Changxiang Yan, Yang Wang. Alignment of a three-mirror anastigmatic telescope using nodal aberration theory // Opt. Exp. 2015. V. 23. № 19. P. 25182–25201.
7. Xiaohu Guo, Liqun Dong, Yuejin Zhao, Wei Jia, Lingqin Kong, Yijian Wu, Bing Li. Imaging and image restoration of an on-axis three-mirror Cassegrain system with wavefront coding technology // Appl. Opt. 2015. V. 54. № 1. P. 2798–2805.
8. Щавелев О.С., Архипова Л.Н. Атермальные оптические стекла и термостабильные космические апохроматы // Оптический журнал. 2003. Т. 70. № 8. С. 58–69.
9. Гайворонский С.В., Зверев В.А. Варианты композиции зеркальных объективов на основе оптической системы объективов Грегори и Кассегрена // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 2. С. 35–39.
10. Цуканова Г.И., Бутылкина К.Д. Светосильные трехзеркальные объективы без промежуточного изображения с выпуклым вторым и вогнутым третьим зеркалами // Оптический журнал. 2014. Т. 3. № 3. С. 3–7.
11. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.
12. Бутылкина К.Д. Исследование и разработка трехзеркальных объективов без промежуточного изображения // Аннотированный сборник научно-исслед. выпускных работ магистров Университета ИТМО. 2014. С. 36–42.