

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 520.2: 535.1

СПЕЦИФИКА РАСЧЕТА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ АСТРОГРАФА ДЛЯ ПРОЕКТА “МЕЖПЛАНЕТНАЯ СОЛНЕЧНАЯ СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ ОБСЕРВАТОРИЯ”

© 2007 г. М. С. Чубей*, канд. физ.-мат. наук; Г. И. Цуканова**, канд. техн. наук;
А. В. Бахолдин**, канд. техн. наук

* Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург
E-mail: mchubey@gao.spb.ru

** Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий
механики и оптики, Санкт-Петербург
E-mail: ZukanovaGI@aco.ifmo.ru; bakholdin@aco.ifmo.ru

Определены требования к оптической системе астрографа для Межпланетной солнечной стереоскопической обсерватории. Рассмотрены варианты ортоскопических оптических систем объективов телескопов, приведена методика расчета трехзеркальных объективов с исправленными сферической аберрацией, комой, астигматизмом, кривизной изображения и дисторсией. Определено экранирование в полученных системах. В качестве примера приведены результаты расчета астрографа с фокусным расстоянием 5 м, диафрагменным числом 10, угловым полем в пространстве предметов 1° .

Коды OCIS: 220.1000, 350.1260, 350.6090.

Поступила в редакцию 24.01.2007.

Оценки возможностей создания “космического стереоскопа” с базой, равной $\sqrt{3}a$, где a – среднее расстояние от Земли до Солнца, и обсуждение его потенциала для выполнения программ фундаментальных исследований изложены в работах [1–4] и др. Уровень требований к полезной нагрузке, ее состав и предварительный дизайн проекта изложены в работе [5].

Задача телескопа-астрографа в проекте Межпланетной солнечной стереоскопической обсерватории (МССО) – основного инструмента для решения задач астрометрии, звездной астрономии и астрофизики – обеспечить построение изображений точечных и протяженных небесных объектов с прониканием до 22-й звездной величины при отношении сигнал/шум не менее 2. Этот прибор должен позволять вести измерения положений контрастных элементов изображения и положений максимумов интенсивности точечных источников на пиксельном поле ПЗС-матрицы с точностью до долей миллисекунд дуги.

Возможны разные варианты создания полностью зеркальной оптической системы, которая должна удовлетворять главному требованию – обеспечить дифракционное качество изображения точечного объекта во всем поле. Требования к основным характеристикам:

1) диаметр входного зрачка $D \geq 500$ мм, фокусное расстояние $f' \geq 5000$ мм, относительное отверстие $D/f' \approx 1:10$;

2) приемник – ПЗС-матрица, размер пиксела 16×16 мкм;

3) угловое поле в пространстве предметов $2\omega \geq 45'$.

Необходимость проведения измерений определяет дополнительные требования к оптической системе телескопа: дисторсия должна быть исправлена во всем поле изображения, а ее остаточная величина не должна превышать 1 мкм.

Рассмотрим варианты оптической системы для телескопа-астрографа, обладающего этими свойствами, главными из которых являются дифракционное качество изображения и фактически нулевая дисторсия.

Задача по созданию телескопа с нулевой дисторсией уже ставилась при разработке космической астрометрической системы “Струве” [6], где в качестве объектива первоначально был принят зеркально-линзовый объектив Шмидта с диаметром главного зеркала 0,4 м, фокусным расстоянием 2,5 м и угловым полем около 2° . Рассматривались также зеркальные системы: зеркальный объектив Шмидта и трехзеркальный объектив (система Корша) [7]. В последнем для коррекции дисторсии вблизи плоскости изображения была установлена линза Смита.

Поскольку требуемые оптические характеристики телескопа для проектов МССО и “Струве” существенно отличаются, опыт разработки систем для проекта “Струве” может быть использован лишь частично.

Самое существенное отличие состоит в том, что в проекте “Струве” телескопы имели относительные отверстия 1:6–1:4, а в МССО 1:10–1:20. При таких малых относительных отверстиях применение зеркального телескопа Шмидта становится, по результатам расчетных оценок, нецелесообразным из-за резкого увеличения габаритов. В семействе известных зеркальных систем только зеркальный объектив Шмидта не имеет дисторсии. Таким образом, следует разработать зеркальный телескоп, в котором исправлены сферическая aberrация, кома, астигматизм, кривизна изображения и дисторсия. Поскольку в двухзеркальных телескопах это сделать невозможно, было проведено исследование трехзеркальных систем.

При небольших относительных отверстиях целесообразно применение трехзеркальных систем с промежуточным изображением после отражения от двух зеркал [7–12]. Варианты системы такого типа показаны на рис. 1.

Теоретически исправить aberrации всех пяти видов можно в любой из рассмотренных систем. Однако большинство решений оказываются конструктивно неосуществимыми либо из-за большого экранирования, либо из-за того что свет вообще может не попасть на плоскость изображения. Даже если исправить четыре вида aberrаций: сферическую, кому, астигматизм и кривизну изображения, конструктивно приемлемых систем остается очень немного, а если добавляется условие устранения дисторсии, то круг систем еще более сужается.

Исправления сферической aberrации, комы и астигматизма можно добиться изменением формы зеркал. Таким образом, для окончательной коррекции остаются три параметра: α_2 и α_3 – углы первого параксиального луча после отражения от первого зеркала и второго зеркала соответственно и h_3 – высота первого параксиального луча на третьем зеркале. Параметр α_2 определяет относительное отверстие главного зеркала, делать которое больше 1:1 нецелесообразно из-за сложностей изготовления и контроля. Варьируя параметрами α_3 и h_3 , можно получить систему с допустимым экранированием и, кроме того, исправить кривизну изображения и дисторсию.

Экранирование в системах данного типа возникает, как и в обычных двухзеркальных системах, из-за применения второго зеркала, экранирующего входной пучок лучей. Кроме этого, самое большое экранирование вносит дополнительное плоское зеркало, причем оно экранирует дважды: сначала в пучке лучей, отраженных от главного, а затем от третьего зеркала.

Поэтому при конструировании оптической системы должны быть выполнены также следующие требования:

- а) третье зеркало не должно попасть в параллельный ход лучей,
- б) плоскость изображения также не должна попасть в ход лучей,
- в) лучи, отраженные от третьего зеркала, не должны “врезаться” ни во второе, ни в третье зеркало.

Если ко всем этим требованиям добавить условие исправления дисторсии, то круг решений становится еще меньше.

Расчет и исследование систем удобно вести с применением теории aberrаций третьего порядка.

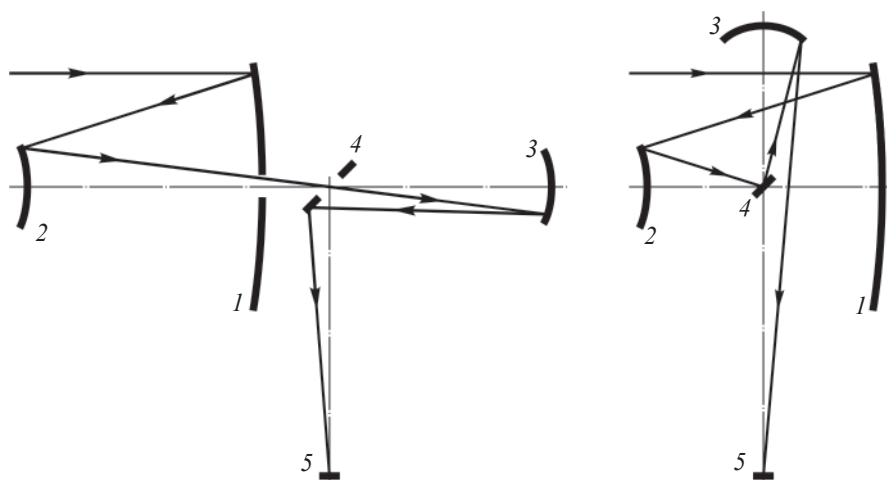


Рис. 1. Варианты трехзеркальных систем. 1 – главное зеркало, 2 – второе зеркало, 3 – третье зеркало, 4 – дополнительное плоское зеркало, 5 – плоскость изображения.

Условия устранения сферической аберрации, комы, астигматизма, кривизны изображения и дисторсии

для системы из трех зеркал определяются системой уравнений:

$$\begin{cases} S_I = h_1(P_1 + B_1) + h_2(P_2 + B_2) + h_3(P_3 + B_3) = 0, \\ S_{II} = y_2(P_2 + B_2) + y_3(P_3 + B_3) + 0,5 = 0, \\ S_{III} = y_2^2(P_2 + B_2)/h_2 + y_3^2(P_3 + B_3)/h_3 + 2y_2W_2/h_2 + 2y_3W_3/h_3 + \\ + (\alpha_2/n_2 - \alpha_1/n_1)/h_1 + (\alpha_3/n_3 - \alpha_2/n_2)/h_2 + (\alpha_4/n_4 - \alpha_3/n_3)/h_3 = 0, \\ S_{IV} = (\alpha_2 n_2 - \alpha_1 n_1)/h_1 n_1 n_2 + (\alpha_3 n_3 - \alpha_2 n_2)/h_2 n_2 n_3 + \\ + (\alpha_4 n_4 - \alpha_3 n_3)/h_3 n_3 n_4 = 0, \\ S_V = y_2^3(P_2 + B_2)/h_2^2 + y_3^3(P_3 + B_3)/h_3^2 + 3y_2^2W_2/h_2^2 + 3y_3^2W_3/h_3^2 + \\ + 2y_2(\alpha_3 + \alpha_2)/h_2^2 - 2y_3(\alpha_4 + \alpha_3)/h_3^2 = 0. \end{cases} \quad (1)$$

Основные параметры зеркал определяются следующими выражениями:

$$\begin{aligned} P_1 &= -0,25\alpha_2^3, \\ P_2 &= 0,25(\alpha_3 - \alpha_2)^2(\alpha_3 + \alpha_2), \\ P_3 &= -0,25(\alpha_4 - \alpha_3)^2(\alpha_4 + \alpha_3), \\ B_1 &= -0,25b_1\alpha_2^3, \\ B_2 &= 0,25b_2(\alpha_3 + \alpha_2)^3, \\ B_3 &= -0,25b_3(\alpha_4 + \alpha_3)^3, \\ W_1 &= 0,5\alpha_2^2, \\ W_2 &= 0,5(\alpha_3^2 - \alpha_2^2), \\ W_3 &= 0,5(\alpha_4^2 - \alpha_3^2), \end{aligned}$$

где $b_i = -e_i^2$ – коэффициент деформации поверхности зеркала (e_i – эксцентриситет), α – угол осевого параксиального луча с оптической осью ($\alpha_1 = 0$, $\alpha_4 = -1$), h – высота первого параксиального луча ($h_1 = 1$), y – высота второго параксиального луча ($y_1 = 0$).

В результате подстановок и преобразований системы уравнений (1) определяем условия, выполнение которых необходимо при расчете оптической системы телескопа-астрографа.

Условие исправления сферической аберрации ($S_I = 0$):

$$\alpha_2^3(b_1 + 1) - h_2(\alpha_3 + \alpha_2)((\alpha_3 - \alpha_2)^2 + b_2(\alpha_3 + \alpha_2)^2) + h_3(1 + \alpha_3)[(1 - \alpha_3)^2 + b_3(1 + \alpha_3)^2] = 0.$$

Условие коррекции комы ($S_{II} = 0$):

$$\begin{aligned} &\alpha_3(1 - h_2)(\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_3 + \alpha_2(1 - h_2))((\alpha_3 - \alpha_2)^2 + b_2(\alpha_3 + \alpha_2)^2) - \\ &- (1 + \alpha_3)(\alpha_2 - (\alpha_2^2 - \alpha_3^2 - \alpha_3)(1 - h_2))((1 - \alpha_3)^2 + b_3(1 + \alpha_3)^2) = 0. \end{aligned}$$

Условие исправления астигматизма ($S_{III} = 0$):

$$\begin{aligned} &\alpha_3^2(1 - h_2)^2(1 + \alpha_3)(\alpha_2 + \alpha_3)(\alpha_3 + \alpha_2(1 - h_2))((\alpha_3 - \alpha_2)^2 + b_2(\alpha_3 + \alpha_2)^2) - \\ &- (\alpha_3 - 1)(\alpha_2 - (\alpha_2^2 - \alpha_3^2 - \alpha_3)(1 - h_2))^2((\alpha_3 + 1)^2 + b_3(\alpha_3 - 1)^2) + \\ &+ 4\alpha_2\alpha_3^2(1 - h_2)(1 + \alpha_3)(\alpha_3 + \alpha_2(1 - h_2))(\alpha_3^2 - \alpha_2^2) + \\ &+ 4\alpha_2\alpha_3(1 - \alpha_3^2)(\alpha_2 - (\alpha_2^2 - \alpha_3^2 - \alpha_3)(1 - h_2)) = 0. \end{aligned}$$

Условие коррекции кривизны изображаемого пространства ($S_{IV} = 0$):

$$\alpha_2 - (\alpha_3 + \alpha_2)/h_2 + (1 + \alpha_3)/h_3 = 0.$$

Условие исправления дисторсии ($S_V = 0$):

$$\begin{aligned} & \alpha_3^3(1-h_2)^3(\alpha_2+\alpha_3)(1+\alpha_3)^2(\alpha_3+\alpha_2(1-h_2))\left((\alpha_3-\alpha_2)^2+b_2(\alpha_3+\alpha_2)^2\right)- \\ & -(\alpha_3-1)(\alpha_3+1)^2\left(\alpha_2-\left(\alpha_2^2-\alpha_3^2-\alpha_3\right)(1-h_2)\right)^3\left((\alpha_3+1)^2+b_3(\alpha_3-1)^2\right)+ \\ & +6\alpha_2\alpha_3^3(1+\alpha_3)^2\left(\alpha_3^2-\alpha_2^2\right)(\alpha_3+\alpha_2(1-h_2))+ \\ & +6\alpha_2\alpha_3(1-\alpha_3^2)(\alpha_3+\alpha_2(1-h_2))\left(\alpha_2-\left(\alpha_2^2-\alpha_3^2-\alpha_3\right)(1-h_2)\right)^2+ \\ & +8\alpha_2^2\alpha_3^2(1-h_2)(\alpha_2+\alpha_3)(1+\alpha_3)^2(\alpha_3+\alpha_2(1-h_2))- \\ & -8\alpha_2^2\alpha_3^2(1+\alpha_3)(\alpha_3+\alpha_2(1-h_2))^2\left(\alpha_2-\left(\alpha_2^2-\alpha_3^2-\alpha_3\right)(1-h_2)\right)=0. \end{aligned}$$

В качестве начальных данных задавались значения параметра α_2 , который определяет относительное отверстие главного зеркала, характеризующее технологическую осуществимость и трудоемкость изготовления главного зеркала, а также один из трех параметров: h_3 , h_2 или α_3 . Решая систему уравнений численным методом с помощью программных средств, например, Mathcad, можно получать различные варианты схем. Среди возможных вариантов решений отбираются те, которые конструктивно осуществимы и имеют допустимое экранирование.

Используя выведенные формулы, рассчитан ряд систем с устраненными пятью видами аберраций третьего порядка. Наиболее интересные решения приведены в таблице. Расчет проводился для объективов с относительными отверстиями 1:10 и экранированием по диаметру не более 0,3. Определены максимальные угловые поля для систем, в которых главное зеркало имеет диафрагменное число 1, 1,25, 1,5. Значения величин h_3 , h_2 , s'_2 , d_1 и d_2 отнесены к фокусному расстоянию всей системы.

Исследование показало, что угловое поле при одинаковом экранировании получается больше в системах с высокими относительными отверстиями главного и остальных зеркал.

На основании выполненного исследования рассчитан ряд систем, оптическая схема одной из которых показана на рис. 2. Основные характеристики этой системы: фокусное расстояние $f' = 5000$ мм, относительное отверстие $D/f' = 1/10$, угловое поле $2\omega = 1^\circ$. Габариты системы не превышают 500 мм в диаметре и 1300 мм по длине, расстояние между первым и вторым зеркалами $d_1 = 390$ мм, между вторым и третьим – $d_2 = 1210$ мм; расстояние от плоского зеркала до промежуточного изображения $s' = 1030$ мм, расстояние от второго зеркала до промежуточного изображения $s'_2 = 589$ мм. Система имеет дифракционное качество изображения и нулевую дисторсию. Экранирование по площади порядка 10%.

Главное зеркало в телескопе является близким к параболюиду эллипсоидом, вторичное зеркало – гиперболы, а третье имеет эллиптическую форму.

Параметры рассчитанных трехзеркальных систем

k_1	α_2	α_3	h_3	h_2	s'_2	d_1	d_2	2 ω , угл. мин	Примеч.*
1	-10	3,800	-0,1	0,107	0,028	-0,089	0,054	28	1
1	-10	3,332	-0,2	0,211	0,063	-0,079	0,123	47	
1	-10	2,920	-0,3	0,307	0,105	-0,069	0,208	60	2
1,25	-8	3,255	-0,1	0,094	0,029	-0,113	0,060	23	1
1,25	-8	2,914	-0,2	0,184	0,063	-0,102	0,132	38	
1,25	-8	2,611	-0,3	0,269	0,103	-0,091	0,218	48	2
1,25	-8	2,475	-0,35	0,308	0,125	-0,086	0,266	52	2
1,5	-6,67	2,883	-0,1	0,083	0,029	-0,137	0,064	19	1
1,5	-6,67	2,622	-0,2	0,163	0,062	-0,125	0,139	32	
1,5	-6,67	2,388	-0,3	0,238	0,100	-0,114	0,225	43	
1,5	-6,67	2,282	-0,35	0,273	0,120	-0,109	0,273	46	3
1,5	-6,67	2,241	-0,37	0,287	0,128	-0,107	0,293	48	2, 3

* 1 – третье зеркало попадает в ход лучей, 2 – вариант может быть реализован, 3 – если допустить экранирование по диаметру $\eta = 0,4$, то угловое поле может быть увеличено до 1° .

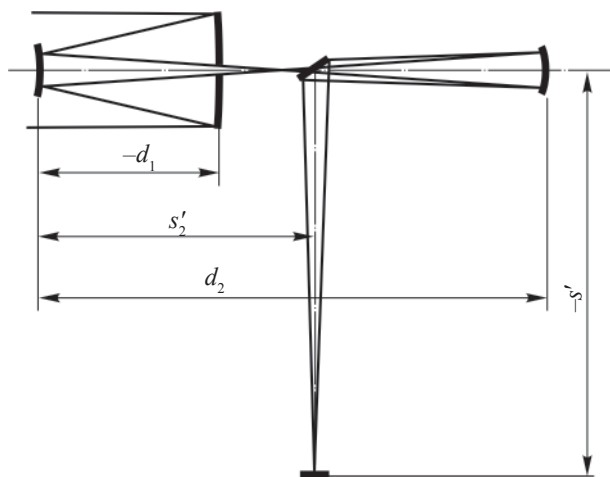


Рис. 2. Трехзеркальная ортоскопическая система (пояснения в тексте).

Конструкторские проработки показали, что при использовании в трехзеркальной системе новых оптических и конструкционных материалов реализуемые массогабаритные характеристики астрографа не превысят заданных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Grigoryev V.M. Space-born solar stereoscope experiment in solar physics // *Solar Phys.* 1993. V. 148. P. 386–391.
2. Grigoryev V.M., Papushev P.G., Chubey M.S., Kopylov I.M., Eroshkin G.I., Ilin A.E., Gorshany D.L., Pashkevich V.V., Savastanya A.V. Interplanetary Solar Stereoscopic Observatory (ISSO): scientific objectives and facilities // *Astronomy & Astrophysics Trans.* 2000. V. 19. № 3–4. P. 646–661.

3. Abalakin V.K., Chubey M.S., Eroshkin G.I., Kopylov I.M. Triangulation measurements in the Solar System // *Proc. of IAU Coll.* 2000. V. 180. P. 132–149.
4. Chebotarev V.E., Grigoryev V.M., Kononov V.S., Papushev P.G., Uspensky G.R. The problem of Designing of a Solar Stereoscopic Observatory // *Phys. Chem. Earth.* 1997. V. 22. № 5. P. 445–449.
5. Григорьев В.М., Панушев П.Г., Чупраков С.А., Чубей М.С., Кулагин Е.С., Ерошкин Г.И., Львов В.Н., Толчельникова С.А., Ягудин Л.И. Межпланетная солнечная стереоскопическая обсерватория // *Оптический журнал.* 2006. Т. 73. № 4. С. 43–48.
6. Захаренков В.Ф., Стариченкова В.Д., Чубей М.С., Флейшер А.Г., Копылов И.М., Канаев И.И., Цуканова Г.И. Оптическое оснащение орбитального комплекса для глобального обзора неба в проекте Струве // *Сб. трудов междунар. конф. “Прикладная оптика-2000”.* Т. 1. СПб.: ГОИ им. С.И. Вавилова, 2000. С. 138–140.
7. Korsch D. Anastigmatic three-mirror telescope // *Appl. Opt.* 1977. № 8. P. 2074–2077.
8. Пименов Ю.В. Исследование оптической схемы трехзеркального объектива // *ОМП.* 1977. № 7. С. 18–21.
9. Robb P. Three-mirror telescopes: design and optimization // *Appl. Opt.* 1978. V. 17. № 17. P. 2677–2685.
10. Mikhelson N.N. Three-mirror telescope anastigmats // *Opt. Acta.* 1982. V. 29. № 7. P. 979–983.
11. Цуканова Г.И., Стариченкова В.Д. Исследование конструктивных особенностей трехзеркальных объективов плананастигматов с промежуточным изображением // *Оптический журнал.* 1997. Т. 64. № 7. С. 64–67.
12. Цуканова Г.И. Трехзеркальные ортоскопические объективы с промежуточным изображением // *Оптический журнал.* 1999. Т. 66. № 12. С. 21–23.