

РАСЧЕТ, ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ПРОИЗВОДСТВО ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 535.31

ЗЕРКАЛЬНЫЕ ОБЪЕКТИВЫ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРИМЕНЕНИИ ЦЕНТРАЛЬНО-СИММЕТРИЧНЫХ ПЛАНОВИДНЫХ ЗЕРКАЛ

© 2007 г. С. А. Чупраков

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск

Исследована возможность замены плановидного зеркального корректора с эллиптической ретушью в зеркальных объективах на осесимметричный с минимально возможными углами наклона зеркального planoида. Определены предельные относительные отверстия оптических систем “зеркальный Шмидт” и “зеркальный Райт” с центрально-симметричным зеркальным корректором на основе анализа ошибок волнового фронта, обусловленных отклонением поверхности рассматриваемого корректора от корректора с эллиптической ретушью. Приведены точечные диаграммы объективов “зеркальный Шмидт” и “зеркальный Райт” с относительными отверстиями, близкими к предельным. Предложены системы светозащиты для систем “зеркальный Шмидт” и “зеркальный Райт”. Приведены конструктивные характеристики экспериментального образца объектива по схеме “зеркальный Райт”, созданного автором.

Коды OCIS: 080.0080.

Поступила в редакцию 12.01.2007.

В настоящее время известны и получили распространение на космических обсерваториях широкоугольные зеркальные объективы, построенные на основе отражающего корректора Шмидта. Впервые описанные в 1958 г. В.Н. Чуриловским [1], оптические системы содержали одиночное сферическое зеркало, зеркало в виде сплюснутого сфероида, кассегреновскую систему из двух сферических зеркал и зеркальный корректор Шмидта (плановидное зеркало), причем плановидное зеркало было установлено наклонно к оптической оси объектива. Для исправления сферической аберрации в такой системе на planoид должен быть нанесен сложный рельеф, параметры которого зависят от сферической аберрации последующей зеркальной системы и угла наклона planoида к оптической оси объектива. Форма planoида получается сложной – он имеет только одну плоскость симметрии – плоскость угла наклона. Описанные в работе [1] оптические системы имели “экстремальные” характеристики – диаметр входного зрачка до 2000 мм, относительное отверстие до 1:1 и угол наклона planoида до 30°. На основе зеркального planoида Чуриловского была успешно реализована оптическая схема телескопа астрометрической обсерватории HIPPARCOS [2] с диаметром входного зрачка 190 мм и относительным отверстием 1:7,2. В проекте большого наземного широкоугольного телескопа LAMOST [3], представляющего собой систему “зеркальный

Шмидт” с диаметром входного зрачка 4 м и фокусным расстоянием 20 м, зеркальный planoид выполняет функцию сидеростата. В таких системах умеренной светосилы зеркальный planoид Чуриловского ретуширован по эллиптическим зонам. Зеркальная поверхность, исправляющая сферическую аберрацию третьего порядка одиночного зеркала, может быть описана [3] уравнением с точностью до членов четвертого порядка:

$$z = \frac{(x^2 + y^2 \cos^2 \varepsilon)^2 - 2kH^2 (x^2 + y^2 \cos^2 \varepsilon)}{64f^3 \cos \varepsilon} (1 - e^2), \quad (1)$$

где, следуя обозначениям [3], z – отступление поверхности от плоскости, y и x – координаты на входном зрачке, e^2 – квадрат эксцентриситета главного зеркала, являющегося поверхностью второго порядка. H – полудиаметр входного зрачка системы, f – фокусное расстояние системы, ε – угол между нормалью к поверхности planoида при его вершине и направлением падающего пучка, k – коэффициент, определяющий положение “нейтральной зоны” на поверхности planoида. При $k = 0,5$ “нейтральная зона” расположена на расстоянии $0,707H$ от центра planoида – такая форма наиболее удобна при ретуши поверхности.

Представляется целесообразным определить предельные углы наклона плановидного зеркала с центрально-симметричной ретушью, связав их с

геометрическими параметрами – диаметром, фокусным расстоянием и квадратом эксцентриситета главного зеркала, расстоянием от главного зеркала до входного зрачка. Поверхность центрально-симметричного planoидного зеркала в общем случае описывается следующим выражением:

$$z_s = k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6 \dots, \quad (2)$$

где r – расстояние от оси вращения, k_i – коэффициенты, определяющие форму поверхности. Следуя обозначениям (1), для центрально-симметричного planoида уравнение (2) с точностью до членов четвертого порядка можно переписать в виде

$$z_s = \frac{(x^2 + y^2)^2 - 2kH^2(x^2 + y^2)}{64f^3 \cos \varepsilon} (1 - e^2). \quad (3)$$

Замена поверхности (1) поверхностью (3) приводит к возникновению волновой аберрации, выражение для которой после перехода от H и f к диаметру входного зрачка D и относительному отверстию системы A можно записать в виде

$$h = -2(z - z_s) = A^3 y^2 (e^2 - 1) \times \frac{\sin \varepsilon \operatorname{tg} \varepsilon (3y^2 + 4x^2 + y^2 \cos 2\varepsilon - kD^2)}{64D^3}. \quad (4)$$

Здесь y и x – соответственно меридиональная и сагиттальная составляющие зрачковых координат, а плоскость угла наклона зеркального planoида соответствует меридиональной плоскости. Воспользуемся методикой, предложенной Н.Н. Михельсоном [4], а ранее Д.Д. Максutowым, для нахождения предельного относительного отверстия системы, состоящей из наклонного planoидного зеркала и одиночного вогнутого зеркала с фокусным расстоянием f и квадратом эксцентриситета при вершине e^2 , широко применяющейся в астрономической оптике [4]. Приравняем волновую аберрацию (4) на краю зрачка предельному значению $\lambda/4$. Рассмотрим точку, лежащую в плоскости наклона зеркального planoида на краю зрачка, т. е. $x = 0$, $y = \frac{D}{2}$. Волновая аберрация в этой точке, рассчитываемая из выражения (4), не должна превышать четверти длины волны, т. е.

$$\frac{A^3 D (1 - e^2) (3 - 4k + \cos 2\varepsilon) \sin \varepsilon \operatorname{tg} \varepsilon}{1024} \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (5)$$

Решение неравенства (5) относительно A дает следующее выражение для предельного относительного отверстия:

$$A \leq 5,66 \sqrt{\frac{\lambda \operatorname{ctg} \varepsilon \csc \varepsilon}{D(1 - e^2)(3 - 2k + \cos 2\varepsilon)}}. \quad (6)$$

Формула (6) дает предельное относительное отверстие системы, состоящей из одиночного зеркала с квадратом эксцентриситета поверхности e^2 и зеркальным planoидом, наклоненным к оси системы на угол ε , установленным во входном зрачке диаметром D .

Чтобы “открыть” входной зрачок, planoид должен быть наклонен на угол

$$\varepsilon \geq \operatorname{arctg} \frac{D + 2D\omega/A}{2d}, \quad (7)$$

где d – расстояние между planoидом и главным зеркалом, ω – половина угла поля зрения. Пользуясь выражением (7), нетрудно рассчитать предельный угол наклона зеркального planoида в системах “зеркальный Шмидт” и “зеркальный Райт”. Например, если в известной системе “зеркальный Райт” задаться положением фокальной плоскости на расстоянии $\Delta = D/2$ за поверхностью зеркального planoида, то легко рассчитать квадрат эксцентриситета главного зеркала и минимальный угол наклона зеркального planoида

$$e^2 = \frac{A + 2}{A - 2}, \quad (8)$$

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \left(\frac{A}{2 - A} + \omega \right).$$

В выражениях (8) ω – половина угла поля зрения. Пользуясь соотношениями (8) и принимая коэффициент $k = 0,5$ (соответствующий минимальному отступлению рельефа planoидного зеркала от плоскости), можно записать неравенство (5) в виде

$$\frac{A^3 (A(\omega - 1) - 2\omega)^2 D}{256(A - 2)^3 (2 + (A/(2 - A) + \omega)^2)^{3/2}} \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (9)$$

Поступая сходным образом для системы “зеркальный Шмидт”, в которой $e^2 = 0$, можно записать условие для минимального угла наклона зеркального planoида

$$\varepsilon = \operatorname{arctg} \left(\frac{A}{2} + \omega \right). \quad (10)$$

Учитывая (10), неравенство (5) можно переписать в виде

$$\frac{A^3 D (A + 2\omega)^2}{256(4 + (A + 2\omega)^2)^{3/2}} \leq \frac{\lambda}{4}. \quad (11)$$

Численные решения неравенств (9) и (11) для полей зрения соответственно $\omega = 0,5^\circ$ и $\omega = 2,5^\circ$ показаны на рис. 1.

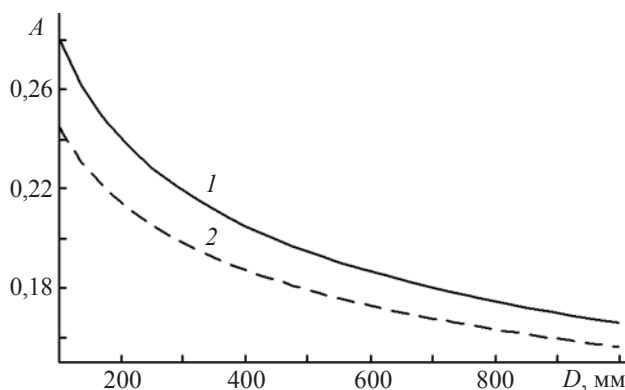


Рис. 1. Графики зависимости предельного относительного отверстия от диаметра в системах “зеркальный Шмидт” (1) и “зеркальный Райт” (2).

Расчеты реальных лучей показывают, что выражение (6) дает близкие к реальным предельные значения относительных отверстий.

В табл. 1 приведены параметры системы (№ 1), построенной по схеме “зеркальный Шмидт”, с центрально-симметричным planoидным зеркалом диаметром 200 мм, сферическим зеркалом с фокусным расстоянием 800 мм и линзой Пиацци–Смита. Оптическая схема приведена на рис. 2, где M_1 – сферическое главное зеркало, M_2 – зеркальный planoид. Входной зрачок расположен в центре кривизны сферического зеркала и совпадает с зеркальным planoидом. Защита фокальной плоскости от паразитной засветки осуществляется, как и в аналогичной системе [1], с помощью “козырька” K_1 и бленды K_2 .

Вторая система, показанная на рис. 3, построенная по схеме “зеркальный Райт”. Фокальная плоскость вынесена через отверстие в planoидном зеркале. Параметры этой системы (№ 2) также приведены в табл. 1. Диаметр входного зрачка 200 мм, фокусное расстояние 800 мм. Сохранение апланатической коррекции в такой системе возможно

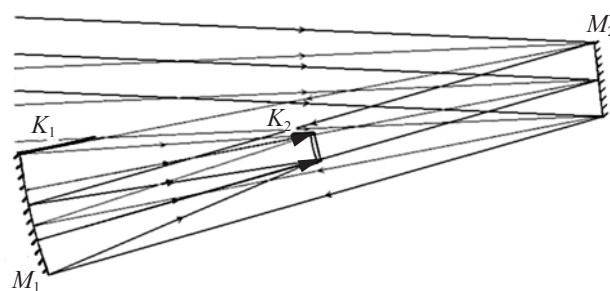


Рис. 2. “Зеркальный Шмидт” с planoидным зеркалом, наклоненным на малый угол. M_1 – сферическое главное зеркало, M_2 – зеркальный planoид, K_1, K_2 – система светозащитных бленд.

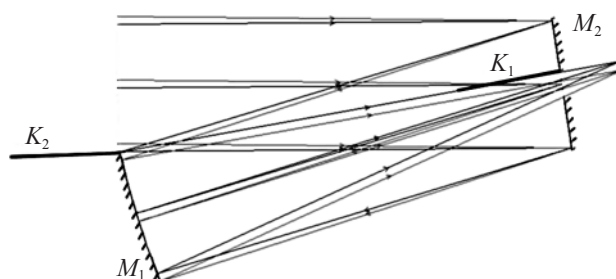


Рис. 3. “Зеркальный Райт” с planoидным зеркалом, наклоненным на малый угол. M_1 – сферическое главное зеркало, M_2 – зеркальный planoид, K_1, K_2 – соответственно светозащитный конус центрального отверстия и передняя светозащитная блenda.

при $e^2 < -1$ (8). Для защиты от паразитной засветки фокальной плоскости предусмотрены две бленды. Блenda K_1 представляет собой участок конуса пучка, отраженного от главного зеркала. При малых относительных отверстиях или малом выносе пучка

Таблица 1. Параметры систем № 1 (“Шмидт”) и № 2 (“Райт”)

№	Радиусы кривизны, мм	Толщины, мм	Показатели преломления	Световые диаметры, мм	Другие параметры
1	$r_1 = \infty^*$ (асф.) $r_2 = -1600,0$ $r_3 = -273,17$ $r_4 = \infty$	$d_1 = -1600,0$ $d_2 = 795,2$ $d_3 = 5,0$	$n_1 = 1$ $n_2 = -1$ $n_3 = 1$ $n_4 = 1,5168$ $n_5 = 1$	$D_1 = 200,0$ $D_2 \approx 340,0$ $D_{3,4} \approx 71,0$	$D/f' = 1/4$ $f' = 800,0$ $2\omega = 5^\circ$ $s' \approx 0,0654$ $\varepsilon = 6,2^\circ$
2	$r_1 = \infty^{**}$ (асф.) $r_2 = -1600,0$ (асф., $e^2 = -1,2441$)	$d_2 = -700,0$	$n_1 = 1$ $n_2 = -1$ $n_3 = 1$	$D_1 = 200,0$ $D_2 \approx 213,0$	$D/f' = 1/4$ $f' = 800,0$ $2\omega = 1^\circ$ $s' \approx -797,7$ $\varepsilon = 8,7^\circ$

* Уравнение planoидной поверхности $y = 5,5654 \times 10^{-7}x^2 + 3,0172 \times 10^{-11}x^4$.

** Уравнение planoидной поверхности $y = 8,8115 \times 10^{-7}x^2 + 6,8147 \times 10^{-11}x^4$.

за поверхность planoида длина бленды K_1 увеличивается, что приводит к экранированию входного зрачка. Уменьшение длины конуса достигается с помощью козырька K_2 .

Оба метода защиты от прямой засветки фокальной плоскости предполагают, что труба представляет собой цилиндр с люком для ввода предметного пучка. Форма люка определяется линией, являющейся пересечением цилиндра основной трубы и конуса предметного пучка. В случае “зеркального Шмидта” для реализации такой светозащиты требуется некоторое увеличение угла наклона зеркального planoида по сравнению с рассчитываемым из выражения (11). Более строгий расчет системы светозащиты довольно сложен и может быть темой для отдельной работы. В особенности это касается установления условия для минимального угла наклона (10) системы “зеркальный Шмидт”.

На рис. 4 и 5 показаны точечные диаграммы рассмотренных систем для поля зрения системы “зеркальный Шмидт” $2\omega = 5^\circ$, для системы “зеркальный Райт” $2\omega = 1^\circ$.

Несмотря на экстремальные углы наклона, в рассмотренных системах сохраняется удовлетворительное качество коррекции aberrаций для широких полей зрения. Из существующих оптических систем такую коррекцию способны обеспечить только двухзеркальные системы Ричи–Кретьена с линзовыми корректорами и преобразователями фокусного расстояния. Подобные системы могут быть использованы для астрометрических и фотографических наблюдений в широком спектральном диапазоне и могут быть отнесены к классу широкоугольных светосильных зеркальных астрономических объективов. Как показали расчеты, незначительные вариации коэффициента k в уравнении (3) и уменьшение светосилы до $1/5$ – $1/7$ дает возможность развития диаметра до 500–600 мм при сохранении дифракционного качества коррекции aberrаций. Следует отметить, что среди существующих двухзеркальных схем без сложных линзовых корректоров поля зрения и преобразователей фокусного расстояния рассмотренные системы имеют наилучшую коррекцию полевых aberrаций для своих диаметров и относительных отверстий. Кроме того, система “зеркальный Райт”, в отличие от своего зеркально-линзового аналога, имеет удачное расположение фокальной плоскости. Кроме широкого спектрального диапазона пропускания, к достоинствам рассмотренных систем можно отнести отсутствие паразитных бликов, характерных для систем с плоскопараллельным преломляющим элементом во входном зрачке, а также дифракционных эффектов от стоек или растяжек, на которых крепятся фотоприемники или ломающие зеркала. Технологич-

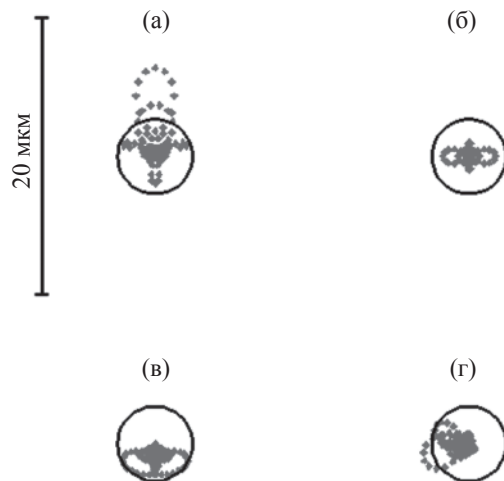


Рис. 4. Точечные диаграммы системы “зеркальный Шмидт”, характеристики которой приведены в табл. 1. Длина масштабной метки – 20 мкм. Поле зрения $2\omega = 5^\circ$. а – $\omega = 2,5^\circ$, $\Omega = 0^\circ$, б – центр поля зрения $\omega = 0^\circ$, $\Omega = 0^\circ$, в – $\omega = -2,5^\circ$, $\Omega = 0^\circ$, г – $\omega = 0^\circ$, $\Omega = 2,5^\circ$

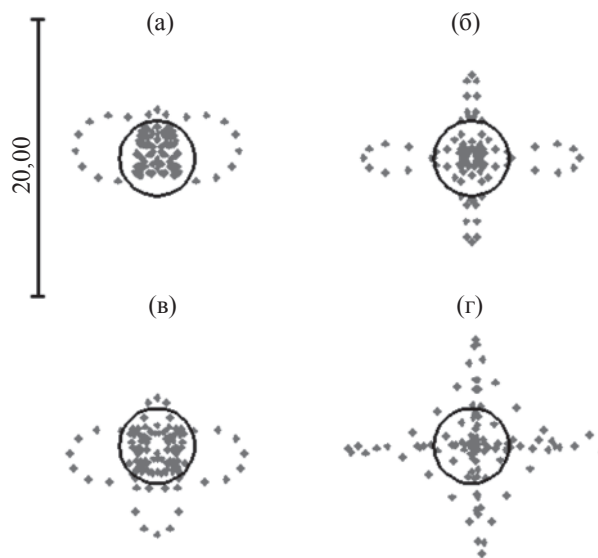


Рис. 5. Точечные диаграммы системы “зеркальный Райт”, характеристики которой приведены в табл. 1. Длина масштабной метки – 20 мкм. Поле зрения $2\omega = 1^\circ$. а – $\omega = 0,5^\circ$, $\Omega = 0^\circ$, б – центр поля зрения $\omega = 0^\circ$, $\Omega = 0^\circ$, в – $\omega = -0,5^\circ$, $\Omega = 0^\circ$, г – $\omega = 0^\circ$, $\Omega = 0,5^\circ$

ность зеркального корректора с центрально-симметричной ретушью делает описанные системы привлекательными для широкого использования.

Автором разработан и изготовлен экспериментальный экземпляр объектива по схеме “зеркальный Райт” [5], параметры которого приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры объектива [5] по схеме “зеркальный Райт”

Диаметр входного зрачка (зеркального планоида), мм	155
Диаметр главного зеркала, мм	160
Фокусное расстояние главного зеркала, мм	720
Расстояние между вершинами главного зеркала и зеркального планоида, мм	610
Угол поля зрения, свободный от засветки, 2ω , град	1,7
Угол между падающим пучком и нормалью к вершине планоидного зеркала	$8^{\circ}6'$
Квадрат эксцентриситета главного зеркала	-1,2
Максимальная (расчетная) асферичность главного зеркала, мкм	2,67
Максимальная высота рельефа зеркального планоида*, мкм	0,83

* Уравнение планоидной поверхности $y = -5,5304 \times 10^{-7}x^2 + 9,1698 \times 10^{-11}x^4$.

Как можно видеть из табл. 2, относительное отверстие системы с учетом полевого угла меньше, чем этого требует выражение (9), поэтому геометрическое пятно рассеяния (см. рис. 5б) для центра поля зрения полностью лежит внутри кружка Эри

для $\lambda = 0,55$ мкм. Измерение разрешающей способности показало, что объектив показывает стандартную миру от оптической скамьи ОСК-2 с угловым расстоянием между штрихами $0,9''$ с контрастом 15–20%, что может быть отнесено на счет неточности изготовления или методики обработки измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чуриловский В.Н. Зеркальные астрономические объективы, основанные на применении центрально-симметричных планоидных зеркал // Изв. вузов. Приборостроение. 1958. (б). № 2. С. 102–113.
2. Bernacca P.L. Project HIPPARCOS // Astrophysics and Space Science. 1985. V. 110. P. 21–45.
3. Ding-Qiang Su, Xiang-Qun Cui. Active Optics in LAMOST // Chin. J. Astron. Astrophys. 2004. V. 4. № 1. P. 1–9.
4. Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы ее расчета. М.: Физ.-мат. литература, 1995.
5. Чупраков С.А., Бородин А.Н. Широкоугольный зеркальный объектив телескопа // Патент России № 2215314. 2001.