

# ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВАЯ СИСТЕМА С МЕНИСКОВЫМ КОРРЕКТОРОМ, СОДЕРЖАЩИМ ХРОМАТИЧЕСКУЮ ПОВЕРХНОСТЬ

© 2004 г. С. А. Чупраков

ПО Новосибирский приборостроительный завод, Новосибирск

Предложена зеркально-линзовая система кассегреневского типа с корректором, работающим в двойном ходе лучей, позволяющая благодаря подбору стекол менискового корректора при сохранении или незначительном ухудшении качества коррекции aberrаций значительно упростить изготовление мениска. Внешние радиусы мениска одинаковы по абсолютной величине, а поверхность хроматической склейки – плоская.

Коды OCIS: 110.0110, 220.0220.

Поступила в редакцию 22.03.2004.

В последние годы получили распространение зеркально-линзовые оптические системы кассегреневского типа с корректорами малого размера, установленными вблизи вторичного зеркала и работающими в двойном ходе лучей. Аргунов [1], Попов [2] и впоследствии Клевцов [3] предложили несколько типов таких корректоров. Среди систем, предложенных Клевцовым, базовым элементом которых всегда является ахроматический толстый мениск, имеется вариант, основанный на не получившей распространения вследствие неудовлетворительного качества коррекции полевых aberrаций схеме [2].

Схема [2] имеет четыре параметра для апланатической коррекции, исправления хроматизма и выполнения условия масштаба – три параксиальных угла и толщину мениска. Однако, так как автор прежде всего стремился увеличить диаметр системы (до 1000 мм), основной задачей была коррекция aberrаций в центре поля зрения – прежде всего, сферохроматизма и вторичного спектра. В результате система [2] имела кому, сравнимую с комой классического кассегрена. Для получения дополнительного свободного параметра Клевцов [3] предложил ввести в мениск хроматическую склейку с кривизной примерно в 1,8–2 раза большей, чем внешние поверхности мениска, что усложняло изготовление корректора. Однако несомненным достоинством системы являлась свобода от бликов на поле зрения, более чем в два раза превышающем рабочее, что имеет большое значение при наличии в поле зрения объектов большой яркости.

Исследование систем типа [3] показало, что решение, сходное по способу коррекции aberrаций, может быть получено также при меньшей кривизне хроматической склейки. Если в системах [3] первый параксиальный луч после отражения на вторичном зеркале и преломления после вторичного входа в корректор падает на хроматическую склейку практически по нормали, а при первом входе в корректор параллелен оптической оси, то эффективная работа склейки возможна лишь при значительной кривизне хроматичес-

кой поверхности. Можно предположить, что такое перераспределение оптических сил внешних поверхностей корректора, при котором хроматическая поверхность могла бы работать при двойном ходе лучей через нее, уменьшило бы ее кривизну. В свою очередь, меньшие оптические силы поверхностей корректора уменьшают сферохроматизм и aberrации высших порядков, что дает некоторую свободу при выборе исходных конструктивных упрощений.

Установим следующие условия:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 0, \alpha_2 = \alpha_p, \alpha_4 = \alpha_3 n_3 / n_4, \alpha_8 = \alpha_7 n_7 / n_8, \alpha_9 = 1; \\ h_1 &= 1, h_{5,6} = h_4; n_{1,6,9} = 1, n_{2,5} = -1, n_3 = -n_4, \\ n_4 &= -n_B, n_7 = -n_4, n_8 = -n_3; \Delta n_{1,2,5,6,9} = 0, \\ \Delta n_3 &= \Delta n_A, \Delta n_4 = \Delta n_B, \Delta n_7 = \Delta n_4, \Delta n_8 = \Delta n_3; \\ f' &= 1, s'_F = h_8; \rho_{4,6,8} = \rho_2, \rho_7 = \rho_3 = 0; d_1 = -d, \\ d_{2,3} &= -d_C / 2, d_{4,5} = 0, d_{6,7} = d_C / 2. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь и далее:  $\alpha_i$  – углы первого параксиального луча,  $n_i$  и  $\Delta n_i$  – показатели преломления и дисперсии,  $h_i$  – высота первого параксиального луча,  $d_i$  – толщины,  $f'$  и  $s'_F$  – фокусное расстояние и последний отрезок системы. Примем внешние радиусы мениска равными по абсолютной величине, хроматическую поверхность – плоской, толщины линз мениска – равными, а расстояние между мениском и вторичным зеркалом примем нулевым (рис. 1).

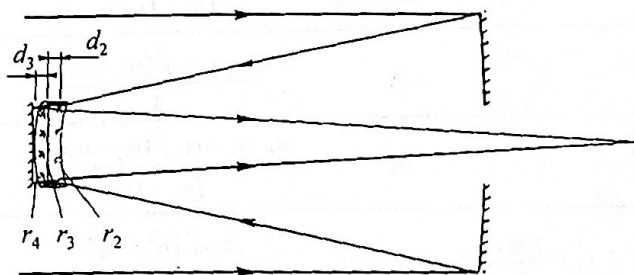


Рис. 1. Зеркально-линзовая система с менисковым корректором с равными внешними радиусами и плоской хроматической поверхностью.  $d_i$  – толщины,  $r_i$  – радиусы.



Несложные расчеты показывают, что в этом случае в системе остаются только два свободных параметра – прогиб мениска и кривизна вторичного зер-

кала, т. е. параксиальные углы  $\alpha_3$  и  $\alpha_6$ . Условия для остальных углов и толщины мениска будут выглядеть следующим образом:

$$\alpha_5 = (n_B - 1) \left[ 1 + d\alpha_P - \frac{d_C \alpha_3 (n_A + n_B)}{2n_B} \right] \times$$

$$\times \left[ -\frac{n_A \alpha_3 + \alpha_P}{(n_A - 1)(1 + d\alpha_P)} - \frac{2n_A n_B \alpha_3}{(n_B - 1)(d_C n_A \alpha_3 + n_B (d_C \alpha_3 - 2 - 2d\alpha_P))} \right],$$

$$\alpha_7 = -\frac{1}{n_B} (n_B - 1) \left[ 1 + d\alpha_P - \frac{d_C \alpha_3 (n_A + n_B)}{2n_B} \right] \times$$

$$\times \left[ -\frac{n_A \alpha_3 + \alpha_P}{(n_A - 1)(1 + d\alpha_P)} - \frac{2n_B \alpha_6}{(n_B - 1)(d_C n_A \alpha_3 + n_B (d_C \alpha_3 - 2 - 2d\alpha_P))} \right], \quad (2)$$

$$A = n_B (n_A + n_B) (n_A \alpha_3 + \alpha_P) (1 + d\alpha_P) \left[ n_A (\alpha_3 (1 - 2n_B + n_A) - \alpha_6) + \alpha_6 + \alpha_P - n_B \alpha_P \right],$$

$$B = n_B^2 (n_A + n_B)^2 (n_A \alpha_3 + \alpha_P)^2 (1 + d\alpha_P)^2 \times$$

$$\times (n_A - 1) \left[ n_A \alpha_3 (4n_B - 4 + n_A \alpha_3 (n_A - 1)) - 2n_A \alpha_3 \alpha_6 (n_A - 1) + \alpha_6^2 (n_A - 1) \right] +$$

$$+ 2\alpha_P (n_A - 1) (n_B - 1) (n_A \alpha_3 + \alpha_6) + \alpha_P^2 (n_B - 1)^2,$$

$$C = \alpha_3 (n_B - 1) (n_A + n_B)^2 (n_A \alpha_3 + \alpha_P)^2,$$

$$d_C = -\frac{A + \sqrt{B}}{C}.$$

Основные аберрационные параметры поверхностей приведены в табл. 1.

Прежде всего в системе следует исправить хроматизм положения и сферическую аберрацию.

Таблица 1. Аберрационные параметры поверхностей

$i$	$h$	$S$	$P$	$W$	$C$
1	1	0	$\frac{\alpha_P^3}{4}$	$\frac{\alpha_P^2}{2}$	0
2	$1 + d\alpha_P$	$\frac{d}{-1 - d\alpha_P}$	$\frac{n_A (\alpha_3 + \alpha_P)^2 (\alpha_3 + n_A \alpha_P)}{(n_A - 1)^2}$	$\frac{(\alpha_3 + \alpha_P)(\alpha_3 + n_A \alpha_P)}{1 - n_A}$	$\frac{(\alpha_3 + \alpha_P) \Delta n_A}{n_A - 1}$
3	$h_2 - \frac{d_C \alpha_3}{2}$	$S_2 - \frac{d_C}{2n_A h_2 h_3}$	$\frac{n_A \alpha_3^3 (n_B^2 - n_A^2)}{n_B^2}$	$\frac{\alpha_3^2 (n_A^2 - n_B^2)}{n_B^2}$	$\alpha_3 \left( \frac{n_A \Delta n_B}{n_B} - \Delta n_A \right)$
4	$h_3 - \frac{d_C \alpha_3 n_A}{2n_B}$	$S_3 - \frac{d_C}{2n_B h_3 h_4}$	$\frac{(n_A \alpha_3 - n_B \alpha_5)^2 (n_A \alpha_3 - n_B^2 \alpha_5)}{(n_B - 1)^2 n_B^2}$	$\frac{(n_B \alpha_5 - n_A \alpha_3) (n_B^2 \alpha_5 - n_A \alpha_3)}{n_B^2 (n_B - 1)}$	$\frac{(n_A \alpha_3 - n_B \alpha_5) \Delta n_B}{n_B (n_B - 1)}$
5	$h_4$	$S_4$	$\frac{(\alpha_5 - \alpha_6)^2 (\alpha_5 + \alpha_6)}{4}$	$\frac{\alpha_6^2 - \alpha_5^2}{2}$	0
6	$h_4$	$S_4$	$\frac{n_B (\alpha_6 - \alpha_7)^2 (\alpha_7 - n_B \alpha_6)}{(n_B - 1)^2}$	$\frac{(\alpha_6 - \alpha_7) (\alpha_7 - n_B \alpha_6)}{n_B - 1}$	$\frac{(\alpha_7 - \alpha_6) \Delta n_B}{n_B - 1}$
7	$h_4 + \frac{d_C \alpha_7}{2}$	$S_4 - \frac{d_C}{2n_B h_4 h_7}$	$\frac{n_B \alpha_7^3 (n_B^2 - n_A^2)}{n_A^2}$	$\frac{\alpha_7^2 (n_B^2 - n_A^2)}{n_A^2}$	$\alpha_7 \left( \Delta n_B - \frac{n_B \Delta n_A}{n_A} \right)$
8	$h_7 + \frac{d_C \alpha_7 n_B}{2n_A}$	$S_7 - \frac{d_C}{2n_A h_7 h_8}$	$\frac{(n_A - n_B \alpha_7)^2 (n_A^2 - n_B \alpha_7)}{(n_A - 1)^2 n_A^2}$	$\frac{(n_A - n_B \alpha_7) (n_A^2 - n_B \alpha_7)}{(n_A - 1) n_A^2}$	$\frac{(n_A - n_B \alpha_7) \Delta n_A}{(n_A - 1) n_A}$



Однако из-за равенства внешних радиусов мениска и близких показателей преломления составляющих стекол его оптическая сила будет очень незначительной, что приводит к небольшой величине хроматизма положения. Таким образом, появляется возможность при сохранении условия масштаба, определяющего толщину мениска, варьированием двух параметров воздействовать не только на сферическую aberrацию, но и на кому. С другой стороны, оказалось, что этими же двумя параметрами можно воспользоваться, чтобы осуществить апланатическую коррекцию, а подбором стекол добиться минимизации хроматизма положения.

Расчет в области aberrаций третьего порядка после учета соотношений (2) и параметров, приведенных в табл. 1, дает для условий

$$P_1 + h_4 \sum_{i=4}^6 P_i + h_2 P_2 + h_3 P_3 + h_7 P_7 + h_8 P_8 = 0,$$

$$\sum_{i=1}^8 W_i - h_4 S_4 \sum_{i=4}^6 P_i - h_2 P_2 S_2 - h_3 P_3 S_3 -$$

$$- h_7 P_7 S_7 - h_8 P_8 S_8 = 0, \quad (3)$$

$$h_4 (C_4 + C_6) + h_2 C_2 + h_3 C_3 + h_7 C_7 + h_8 C_8 = 0$$

систему трех уравнений – условие исправления хроматизма положения – кубического относительно  $\alpha_6$  (угла после отражения на вторичном зеркале), а условия исправления сферической aberrации и комы – двух уравнений пятой степени относительно  $\alpha_3$  (угла при первом входе луча в корректор). Решение этих уравнений в аналитическом виде из-за сложного вида их коэффициентов не представляется возможным, однако численный анализ показал, что существует область практически интересных решений для  $\alpha_3 \approx -0,5 \dots -0,6$  и  $\alpha_6 \approx 0,7-0,9$ , примерно соответствующая конфигурации корректора, изображенной на рис. 1. Так, для  $\alpha_p = -3,905$ ,  $d = -0,178$ , корректора из стекол К1 ( $n = 1,498268$ ,  $\nu = 65,091$ ) и ЛК5 ( $n = 1,478165$ ,  $\nu = 65,625$ ) условие коррекции сферической aberrации и первого хроматизма имеет решение при  $\alpha_3 = -0,50665$ ,  $\alpha_6 = 0,87354$ , при этом вторая сумма невелика и составляет  $S_{II} = -1,2459$ .

“Мертвая зона” на рис. 2 соответствует тем значениям  $\alpha_3$ , при которых вспомогательная переменная  $B$  из условия (2) для толщины корректора становится отрицательной. Это означает, что если  $\alpha_6$  задано, то в этом интервале значений  $\alpha_3$  невозможно выполнить условие масштаба  $\alpha_9 = 1$  при соблюдении условий (2).

На рис. 2 показаны зависимости коэффициентов сферической aberrации, комы и первого хроматизма от  $\alpha_3$  при  $\alpha_6 = 0,87354$ . Как можно видеть из графика, при  $\alpha_3 = -7,5$  существует еще одна область решений, в которой, однако, коэффициент комы при-

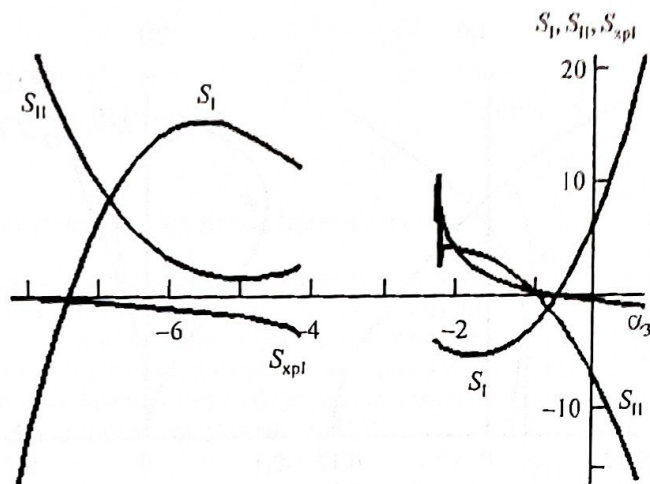


Рис. 2. Ход коэффициентов сферической aberrации, комы и первого хроматизма от угла  $\alpha_3$ .

нимает большое положительное значение. Получение окончательного решения требует проведения оптимизации.

Множество вариантов системы были рассчитаны для определения наилучшей по остаточным aberrациям комбинации пар стекол. Были найдены десятки удачных комбинаций, анализ которых показал, что наилучшая коррекция по полю зрения, т. е. наименьшая остаточная кома, достигается для корректора, состоящего из стекол типа кронов или легких кронов, у которых разность показателей преломления составляет 0,02, а разность чисел Аббе – 0,4. Причем отрицательная линза мениска (первая по ходу лучей) должна быть из стекла с большим показателем преломления и меньшим числом Аббе. В табл. 2 приведены конструктивные параметры двух систем с корректорами из пар стекол, удовлетворяющих этому условию, К1/ЛК5 и ЛК4/ЛК5. Обе системы рассчитаны для диаметра входного зрачка

Таблица 2. Параметры систем с корректорами из пар стекол

Параметр	Корректор	
	К1/ЛК5	ЛК4/ЛК5
$n_1/n_2$	1,498268/1,478165	1,490372/1,478165
$\nu_1/\nu_2$	65,091/65,625	65,138/65,625
$D_{\text{вх. зр}}$	300	300
$r_1$	-1800	-1800
$r_2$	174,579	205,152
$r_3$	-868,117	-829,96
$d$	-615	-615,0
$0,5d_c$	-13,6732	-17,4355
$s'$	785,319	765,932
$f_0'$	2700	2700
$\eta_0$	0,5"	0,5"
$\eta_{\omega/2}$	1,1"	0,9"
$2\omega$	30'	30'



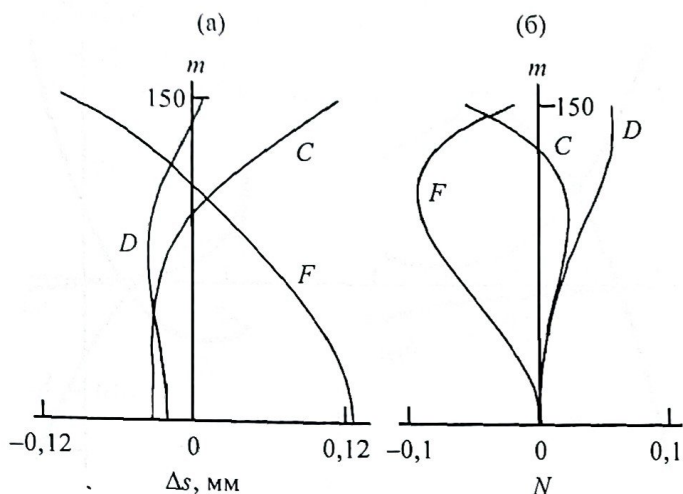


Рис. 3. Остаточные aberrации – продольные (а) и волновые (б) – для системы К1/ЛК5.

300 мм, относительного отверстия 1:9, относительного отверстия главного зеркала 1:3, при экранировании вторичным зеркалом 11%. В последних строчках таблицы приведены значения угловых aberrаций для осевой точки –  $\eta_0$  и  $\eta_\omega$  – для половины поля зрения  $2\omega = 30'$ .

Остаточные осевые aberrации системы со стеклами ЛК4/ЛК5 и волновые aberrации показаны на рис. 3. Хроматическая кривая показана на рис. 4. Волновые aberrации вычислены в плоскости наилучшей фокусировки в лучах D ( $\lambda = 0,5876$  мкм) и отнесены к соответствующей длине волны. Видно, что в видимом диапазоне C–F ( $\lambda = 0,6563$ – $0,4861$  мкм) волновая aberrация не выходит за пределы  $0,15\lambda$ . Таким образом, при указанных в табл. 1 значениях габаритных параметров и относительном отверстии 1:9 предельный диаметр системы без ущерба для качества изображения на оси в видимом диапазоне может достигать 450 мм.

Анализ остаточных aberrаций показал, что основными факторами, ограничивающими диаметр входного зрачка и светосилу в рассматриваемой системе, являются сферохроматизм и вторичный спектр. Ход кривых продольных aberrаций, показанный на рис. 3, примерно идентичен всем наиболее удачным комбинациям пар стекол для рассматриваемых систем. Значительная недоисправленная сферическая aberrация в синем диапазоне спектра

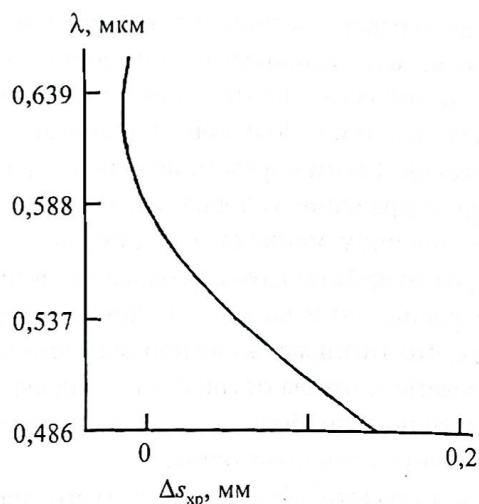


Рис. 4. Хроматическая кривая на зоне  $H = 0,86$  для системы К1/ЛК5.

ограничивает область применения системы объективами с диаметром до 450 мм и светосилой до 1:8. На рис. 4 показан ход волновых aberrаций.

К достоинствам схемы можно отнести отсутствие бликов, фокусирующихся вблизи фокальной плоскости, доступность производства стекол и простоту изготовления менискового корректора, что делает схему привлекательной в качестве объектива для недорогих любительских телескопов с диаметром объектива 150–200 мм. Также можно предполагать, что освобождение внешних радиусов мениска позволит развить относительное отверстие и диаметр системы и расширить диапазон используемых стекол, который пока ограничивается кронами и легкими кронами.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Аргунов П.П. Изохроматические системы телескопов со сферической оптикой // *Астрономический вестник*. 1972. Т. VI. № 1. С. 52–61.
2. Попов Г.М. Зеркально-линзовые изохроматические системы кассегреневского типа // *Изв. Крымск. астрофиз. обсерв.* 1967. Т. 37. С. 273–280.
3. Клевцов Ю.А. Новые апохроматические зеркально-линзовые системы с менисковыми корректорами // *Иссл. по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца*. 1988. В. 79. С. 178–184.