

## РАСЧЕТ ИСХОДНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ ОРТОСКОПИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ ОБЪЕКТИВОВ

© 2012 г. Ю. В. Горбатенко, студент; Г. И. Цуканова, канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

E-mail: juliagorbatenko@mail.ru, ZukanovaGI@aco.ifmo.ru

Получены формулы для расчета ортоскопических систем типа Ричи–Кретьена с компенсатором в области аберраций третьего порядка. Приведены результаты расчета нескольких оптических систем в области аберраций третьего порядка, которые являются исходными для дальнейшей оптимизации с помощью известных программ CAPO, OPAL, ZEMAX.

*Ключевые слова:* ортоскопические объективы, зеркально-линзовые системы типа Ричи–Кретьена, исправление дисторсии, аберрации.

Коды OCIS: 220.1000, 350.1260, 350.6090

*Поступила в редакцию 25.11.2011*

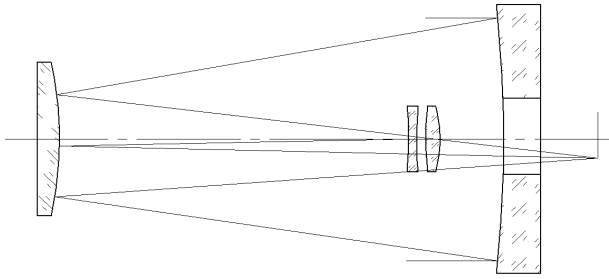
Для выполнения астрометрических и фотометрических исследований в широком спектральном диапазоне требуются оптические системы, в которых исправлены хроматизм положения, хроматизм увеличения, а также сферическая аберрация, кома, астигматизм, кривизна поля изображения и дисторсия. Особенно жесткие требования предъявляются к устранению дисторсии, комы и хроматизма увеличения.

Из зеркальных и зеркально-линзовых систем для астрометрических измерений хорошо подходят оптические системы Шмидта как классическая с линзовой коррекционной пластиной, так и ее зеркальный аналог [1]. Классическая зеркально-линзовая система Шмидта состоит из плоскопараллельной пластинки со сложной асферической поверхностью, расположенной в плоскости апертурной диафрагмы, и сферического зеркала. Центр апертурной диафрагмы совпадает с центром кривизны сферического зеркала и в результате этого в системе устраняются кома, дисторсия и астигматизм. Для устранения сферической аберрации используется пластина с поверхностью сложной формы, размещенная в плоскости апертурной диафрагмы. В результате у этой оптической системы существует единственная неисправленная аберрация – кривизна поля изображения. Осевая длина зеркально-линзо-

вой системы Шмидта равна двум фокусным расстояниям, что является существенным недостатком, особенно если речь идет о длиннофокусных объективах.

Зеркальная версия системы Шмидта отличается от классической заменой в ней коррекционной пластины зеркалом сложной формы. Коррекционное зеркало наклонено так, чтобы главное зеркало не заслоняло входной пучок. Но и зеркальный аналог оптической системы Шмидта будет иметь осевую длину, равную примерно двум фокусным расстояниям. Существуют несколько модификаций зеркальной системы Шмидта, в которых путем добавления плоского зеркала и изменения наклона зеркал добиваются примерного равенства длины системы фокусному расстоянию. Применение как линзового, так и зеркального вариантов системы Шмидта целесообразно, если относительные отверстия и угловые поля довольно большие. Если же относительное отверстие меньше 1:4–1:5, то тогда система будет иметь большую осевую длину и целесообразно использование другой схемы [2].

В предлагаемой работе рассмотрена возможность замены системы Шмидта, имеющей большую осевую длину, на зеркально-линзовую систему с исправленной дисторсией и уменьшенной осевой длиной. В настоя-



Система Ричи–Кретьена.

щее время при создании крупногабаритных оптических систем широкое применение получила система Ричи–Кретьена (рисунок) с компенсатором в сходящемся пучке лучей. В этой системе оба зеркала имеют форму гиперболоидов. Ее достоинством является небольшая осевая длина – не более половины фокусного расстояния. Дисторсия в получивших широкое распространение системах Ричи–Кретьена с компенсатором, как правило, не исправляется.

В данной работе выведены формулы для получения ортоскопических систем типа Ричи–Кретьена с компенсатором в сходящемся пучке лучей, рассчитанных в области аббераций третьего порядка, которые можно рассматривать как исходные для дальнейшей оптимизации. Для получения исходной системы с исправленной дисторсией был выбран алгебраический метод. Он предполагает использование теории аббераций третьего порядка и дает хорошие результаты для систем из бесконечно-тонких компонентов с небольшими относительными отверстиями и угловыми полями. Особенность бесконечно-тонких оптических систем заключается в том, что толщины компонентов не являются параметрами для коррекции аббераций, и при переходе к конечным значениям толщины абберации меняются незначительно.

В статье используются обозначения, принятые в работе [3].

Условие масштаба

$$f' = 1, \quad h_1 = 1, \quad \alpha_1 = 0, \quad \alpha_3 = \alpha_7 = 1.$$

Толщины линз и промежутки между ними принимаются равными нулю

$$d_3 = d_4 = d_5 = 0.$$

Значения показателей преломления материала линз

$$n_1 = n_3 = n_5 = n_7 = 1, \quad n_2 = -1, \quad n_4 = n_6 = n.$$

Составляем систему уравнений, в которую входят только внешние параметры. Это условия исправления хроматизма положения (1), хроматизма увеличения (2) и кривизны поля изображения (3).

$$L_0 = \sum_{s=1}^{s=6} h_s U_s = 0, \quad (1)$$

$$F_0 = \sum_{s=1}^{s=6} h_s S_s U_s = 0, \quad (2)$$

$$0,5 \sum_{s=1}^{s=6} (\nu_s \alpha_{s+1} - \nu_{s+1} \alpha_s) / h_s = 0, \quad (3)$$

где

$$U_s = [(\alpha_{s+1} - \alpha_s) / (\nu_{s+1} - \nu_s)] \times \\ \times [(1 - \nu_{s+1}) / \mu_{s+1} - (1 - \nu_s) / \mu_s],$$

$$S_s = \sum_{k=1}^{k=s-1} \nu_{k+1} d_k / h_k h_{k+1}.$$

Коэффициент дисперсии

$$\mu_s = (n_s - 1) / dn_s,$$

где  $h_s$  – высота нулевого луча на главной плоскости,  $\alpha_s$  – тангенс угла нулевого луча с оптической осью,  $\nu_s$  – величина, обратная показателю преломления.

В результате решения системы уравнений получаем:

- Условие исправления хроматизма положения –  $\alpha_3 = \alpha_7$ ; оптическая сила компенсатора равна нулю.

- Хроматизм увеличения тонкой системы исправляется при исправлении хроматизма положения. Однако опыт и расчет показывают, что введение в конце расчета малых толщин линз приводит к ощутимому нарушению коррекции хроматизма увеличения.

- Условие исправления кривизны поля изображения

$$d_1 = -(1 - h_2)^2 \quad \text{или} \quad r_1 = r_2.$$

Составляем систему уравнений из условий исправления сферической абберации, комы, астигматизма и дисторсии третьего порядка. Параметрами для исправления аббераций являются коэффициенты деформации зеркал  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  и углы в компенсаторе  $\alpha_4$ ,  $\alpha_6$ .

$$\left. \begin{aligned}
B_0 &= 0,5 \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s = 0 \\
K_0 &= -0,5 \sum_{s=1}^{s=m} W_s + 0,5 \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s S_s = 0 \\
C_0 &= 0,5 \sum_{s=1}^{s=m} (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s) / h_s - \sum_{s=1}^{s=m} W_s S_s + 0,5 \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s^2 Q_s = 0 \\
E_0 &= -0,5 \sum_{s=1}^{s=m} (v_s^2 - v_{s+1}^2) / h_s^2 + 0,5 \sum_{s=1}^{s=m} S_s (v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s) / h_s + \\
&+ 1,5 \sum_{s=1}^{s=m} (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s) / h_s - 1,5 \sum_{s=1}^{s=m} W_s S_s^2 + 0,5 \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s^2 Q_s + \\
&+ 0,5 \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s^3 Q_s = 0
\end{aligned} \right\}, \tag{4}$$

где

$$\begin{aligned}
Q_s &= T_s \sigma_s + P_s, \\
T_s &= (v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s)^3 / v_s v_{s+1} (v_{s+1} - v_s)^2, \\
P_s &= [(\alpha_{s+1} - \alpha_s) / (v_{s+1} - v_s)]^2 (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s).
\end{aligned}$$

$$W_s = [(\alpha_{s+1} - \alpha_s) / (v_{s+1} - v_s)] (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s),$$

После преобразования системы уравнений (4) получаем

$$\left. \begin{aligned}
Q_1 + h_2 Q_2 - h_3 p &= 0 \\
-0,5 + w + h_2 Q_2 S_2 - h_3 S_3 p &= 0 \\
0,5 [(1 + \alpha_2) / h_2 - \alpha_2] - W_2 S_2 + S_3 w + 0,5 h_2 S_2^2 Q_2 - 0,5 h_3 S_3^2 p &= 0, \\
0,5 S_2 (-\alpha_2 - 1) / h_2 + 1,5 S_2 (1 + \alpha_2) / h_2 - 1,5 W_2 S_2^2 + 1,5 S_3^2 w + \\
+ 0,5 h_2 S_2^3 Q_2 - 0,5 h_3 S_3^3 p &= 0
\end{aligned} \right\},$$

где

$$\begin{aligned}
w &= [k - 0,5 S_2 S_3 + W_2 S_2 (2 S_3 - S_2)] / S_3 (S_2 - S_3), \\
p &= \frac{2(S_2 - 2S_3)[k + 3S_2 W_2 (S_3 - S_2) - S_2 (S_3 - 2W_2 S_2)(2S_2 - 3S_3)]}{2S_3^2 (S_2 - S_3)^2 h_3},
\end{aligned}$$

$$S_2 = -d_1 / h_2, \quad S_3 = -d_1 / h_2 + d_2 / h_2 h_3, \quad k = 2S_2 (1 + \alpha_2) / h_2, \quad W_2 = (1 - \alpha_2^2) / 2, \quad h_3 = h_2 - d_2.$$

После преобразования и решения системы уравнений получаем формулы для определения  $\sigma_1, \sigma_2$  и  $\alpha_4, \alpha_6$ .

Определение коэффициента деформации первого зеркала  $\sigma_1$  ( $\sigma_1 = -\varepsilon^2$ , где  $\varepsilon$  – эксцентри-

ситет кривой второго порядка)

$$\sigma_1 = (Q_1 - P_1) / T_1,$$

где

$$P_1 = -\alpha_2^3 / 4, \quad T_1 = -\alpha_2^3 / 4, \quad Q_1 = b - a,$$

$$\begin{aligned}
a &= (3W_2 S_2^2 - 4S_2 S_3 W_2 + 0,5 S_3^2 - k) / (S_2 S_3 - S_2^2)(S_3 - S_2), \\
b &= \frac{2(S_2 - 2S_3)[k + 3S_2 W_2 (S_3 - S_2) - S_2 (S_3 - 2W_2 S_2)(2S_2 - 3S_3)]}{2S_3^2 (S_2 - S_3)^2}.
\end{aligned}$$

Определение  $\sigma_2$

$$\alpha_6 = (d + e)/2.$$

$$\sigma_2 = (Q_2 - P_2)/T_2,$$

где

$$Q_2 = a/h_2, \quad P_2 = (1 - \alpha_2^2)(1 - \alpha_2)/4, \\ T_2 = (1 + \alpha_2)^3/4.$$

Определение  $\alpha_4$

$$\alpha_4 = (d - e)/2,$$

где

$$e = w(1 - \nu)/(1 - \alpha_5)(\nu + 1),$$

$$d = p(\nu + 1)(1 - \nu)/w - (1 + \alpha_5)(\nu + 2)/(2\nu + 1).$$

Определение  $\alpha_6$

На основании полученных формул была составлена программа в Excel для определения конструктивных данных зеркально-линзовой оптической системы с исправленными хроматизмом положения и хроматизмом увеличения первого порядка, кривизной поля изображения, а также сферической aberrацией, комой, астигматизмом и дисторсией третьего порядка. Задаются: коэффициент экранирования, который приблизительно равен высоте нулевого луча на втором зеркале, расстояние от второго зеркала до компенсатора, показатель преломления материала линз, тангенс угла нулевого луча между линзами. Полученные результаты приведены в таблице.

Исходные ортоскопические зеркально-линзовые объективы

Исходные данные				Рассчитываемые данные								
$n$	$h_2$	$d_2$	$\alpha_5$	$d_1$	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$r_4$	$r_5$	$r_6$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
1,4698	0,4	0,3	0,5	-0,360	-1,20	-1,20	-0,10858	0,698	0,19544	-0,18096	-1,97959	-58,0
1,4698	0,4	0,3	1,5	-0,360	-1,20	-1,20	0,08174	0,62821	-0,47797	0,11695	-1,97959	-58,0
1,4698	0,4	0,3	2	-0,360	-1,20	-1,20	0,04952	-0,9161	-0,34088	0,05449	-1,97959	-58,0
1,4698	0,45	0,3	0,5	-0,30250	-1,10	-1,10	-0,13026	-1,71907	0,28929	-0,27484	-2,29761	-48,32720
1,4698	0,45	0,3	1,5	-0,30250	-1,10	-1,10	0,12192	0,90345	-0,34111	0,24018	-2,29761	-48,32720
1,4698	0,45	0,3	2	-0,3025	-1,10	-1,10	0,07626	-0,72791	-0,3229	0,09014	-2,29761	-48,32720
1,4698	0,4	0,35	0,5	-0,360	-1,20	-1,20	-0,07176	0,13604	0,09702	-0,09109	-1,70038	-44,04080
1,4698	0,4	0,35	1,5	-0,360	-1,20	-1,20	0,04074	0,30694	3,32381	0,04533	-1,70038	-44,04080
1,4698	0,4	0,35	2	-0,360	-1,20	-1,20	0,02405	-0,99386	-0,40246	0,02495	-1,70038	-44,04080
1,4698	0,45	0,35	0,5	-0,3025	-1,10	-1,10	-0,11354	0,54491	0,19725	-0,17943	-1,96362	-36,91840
1,4698	0,45	0,35	1,5	-0,3025	-1,10	-1,10	0,08205	0,64725	-0,59183	0,11169	-1,96362	-36,91840
1,4698	0,45	0,35	2	-0,3025	-1,10	-1,10	0,04396	-0,97453	-0,37829	0,05364	-1,96362	-36,91840
1,5187	0,4	0,3	0,5	-0,360	-1,20	-1,20	-0,11436	1,11714	0,21508	-0,19953	-1,97959	-58,0
1,5187	0,4	0,35	0,5	-0,360	-1,20	-1,20	-0,07715	0,15829	0,10737	-0,10035	-1,70038	-44,04080
1,5187	0,45	0,3	0,5	-0,3025	-1,10	-1,10	-0,13548	-1,04745	0,31876	-0,30402	-2,29761	-48,32720
1,5187	0,4	0,3	1,5	-0,360	-1,20	-1,20	0,08485	0,4659	-0,6304	0,12417	-1,97959	-58,0

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Терещук В.Ю. Современные оптические телескопы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2005. 80 с.
2. Бахолдин А.В., Цуканова Г.И. Ортоскопические телескопы для астрономических исследований в широком спектральном диапазоне // Сб. IX Междунар. конф. "Прикладная оптика", 2010. Т. 1. № 1. С. 66-69.
3. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и aberrаций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.