

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 535.317; 681.7

Н. К. АРТЮХИНА

ТРЕХЗЕРКАЛЬНАЯ КОНЦЕНТРИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Белорусский национальный технический университет

(Поступила в редакцию 10. 01.2013)

Введение. Одно из направлений вычислительной оптики – поиск новых композиций с улучшенными характеристиками, что определяется интенсивным развитием оптической отрасли, новых технологий и исследований. Для решения широкого круга задач требуются зеркальные объективы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с линзовыми объективами. Большинство проблем в области проектирования и расчета зеркальных объективов можно решить используя концентрическое расположение зеркал. Интерес к концентрической оптике объясняется возможностью расчета и изготовления систем с уникальными свойствами – высокая степень коррекции аберраций, простота и технологичность конструкции [1]. Концентрические оптические системы обладают весьма совершенным исправлением аберраций даже при очень высокой светосиле. Они находят все большее применение как в астрофизике, так и в других областях науки и техники – в спектроскопии, в рентгеновской технике (к примеру, фотографирование изображения, возникающего на флуоресцирующем экране), а также для проекции изображения [2].

Варианты схем, известные из литературы, не дают полного представления о возможностях зеркальных анастигматов, составленных из изопланатических элементов, в области которых представляется возможным находить новые решения. Этому способствуют намечающиеся в последние годы успехи в контроле и юстировке зеркальных объективов [3, 4]. Наиболее известен и широко применяется анастигмат – зеркальная концентрическая система Боуэна [1, 5], имеющая недостатки: неисправленная кривизна изображения, а также большие габариты (осевая длина в два раза превышает фокусное расстояние, а диаметр вогнутого зеркала более чем в четыре раза превосходит диаметр входного зрачка).

Цель работы – дальнейшее исследование зеркальных композиций с изопланатическими оптическими элементами [6,7] и развитие расчетно-методической базы для разработки таких моделей.

Аберрационная модель зеркального концентрического объектива. Современные математические модели зеркальных систем описывают как алгебраическими аберрационными полиномами, так и композиционными решениями, основанными на синтезе базовых и коррекционных компонентов. Отметим, что основным является выбор базового модуля, который проводится на основе эвристического опыта с учетом параксиальных оптических характеристик, конструктивных условий, назначения и коррекционных возможностей, а также, что к изопланатическим поверхностям, вносящим примерно одинаковые аберрации по всему полю, кроме апланатических поверхностей, образующих идеальное изображение (тип А), относят концентрические (типы КЗ и КП – к входному зрачку и к осевой точке предмета соответственно).

Рассмотрим базовую систему, состоящую из *апланатической пары* зеркал (тип КЗ).

Имеем формулы габаритного расчета:

$$r_1 = 2\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right)f'; \quad s' = (2\kappa - 1)f'; \quad r_2 = 2(\kappa - 1)f';$$

$$T = \frac{f'}{s'} = \frac{1}{2\kappa - 1}; \quad d = r_1 - r_2 = -\frac{2(\kappa - 1)^2}{\kappa} f'; \quad \varepsilon = \frac{\kappa}{3\kappa - 2}, \quad (1)$$

где r_1 и r_2 – радиусы сферических зеркал; d – осевое расстояние; ε – коэффициент центрального экранирования; $\kappa = r_2 / r_1$. f' – заднее фокусное расстояние.

В концентрических системах при расположении входного зрачка в центре кривизны отражающих поверхностей aberrации кома, астигматизм и дисторсия равны нулю. Подлежит исправлению только сферическая aberrация, полином которой в переменных Ланге описывается формулой, преобразованной для условий нормировки ($\alpha_1 = 0$, $h_1 = f' = 1$, $\alpha' = 1$):

$$\overline{S}_1 = \sum_1^2 h \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\chi} \right)^2 \Delta\alpha\chi = \frac{1}{2} [\alpha_2^2 + (1 - d\alpha_2)(1 - \alpha_2)^2(1 + \alpha_2)], \quad (2)$$

где обратная величина показателя преломления – параметр $\chi = 1/n$.

Подставляя $\alpha_2 = \frac{2}{r_1} = \frac{\kappa}{\kappa - 1}$ и $d = \frac{2}{\alpha_2}(1 - \kappa)$ в (2), получаем

$$\overline{S}_1 = \frac{\kappa^3}{4(\kappa - 1)^3} \left[\frac{(2\kappa - 1)^2}{\kappa^3} - 1 \right], \quad (3)$$

откуда найдем условие коррекции сферической aberrации: $\overline{S}_1 = 0$ при $\kappa = 2,618$.

Кривизна поверхности изображения (четвертая сумма Зейделя $S_{IV} = \sum_1^2 \frac{1}{h} \frac{\Delta\alpha n}{nn'}$) не корректируется. Используя формулы (1), имеем для заданных условий нормировки $S_{IV} = 1$. Таким образом, поверхность изображения представляет собой правильную сферу, радиус кривизны которой равен эквивалентному фокусному расстоянию (в приведенных величинах).

Математическое моделирование с помощью формул (1) приводит к схеме зеркального телеобъектива с коэффициентом телеукорочения T .

Гомоцентричность пучков не будет нарушаться при введении меридиональных профилей зеркал: парабола и эллипс (фокус параболы совмещен с первым фокусом эллипса, совпадающим с фокусом всего объектива).

Используя свойства кривых 2-го порядка и формулы, приведенные в [8, с. 79], находим модифицированные параметры базового модуля:

$$\begin{aligned} r_n &= 2f' \left(\frac{1-e}{1+e} \right); \quad r_s = S'(1-e); \\ d &= \left(\frac{1-e}{1+e} \right) (f' - S'); \quad \varepsilon = \frac{(1+e)T}{2e + T(1-e')}, \end{aligned} \quad (4)$$

где r_n и r_s – радиусы при вершине зеркал; для параболы $e^2 = 1$, для эллипса $0 < e < 1$.

Используя формулы Зейделя [8, с. 131–133] и «добавки» за счет асферичности:

$$W_A = \frac{\Delta\alpha}{\Delta\chi} \Delta\alpha\chi; \quad P_A = \left(\frac{\Delta\alpha}{\Delta\chi} \right)^2 \Delta\alpha\chi + \Delta P_A; \quad \pi = \frac{\Delta\alpha n}{nn'}; \quad \Delta P_A = \frac{(\alpha' n' - \alpha n)^3}{(n' - n)^2} e^2,$$

получаем aberrационные полиномы для базового двухзеркального объектива:

$$\begin{cases} \overline{S}_1 = h_1 P_{1A} + h_2 P_{2A}; \\ \overline{S}_2 = H_1 P_{1A} + H_2 P_{2A} - J(W_{1A} + W_{2A}); \\ \overline{S}_3 = \frac{H_1^2}{h_1} P_{1A} + \frac{H_2^2}{h_2} P_{2A} - 2J \left(\frac{H_1}{h_1} W_{1A} + \frac{H_2}{h_2} W_{2A} \right) + J^2 (\Phi_1 + \Phi_2); \\ \overline{S}_4 = -\sum_1^2 \frac{\Delta\chi}{R}; \\ \overline{S}_5 = \frac{H_1^3}{h_1^2} P_{1A} + \frac{H_2^3}{h_2^2} P_{2A} - 3J \left(\frac{H_1^2}{h_1^2} W_{1A} + \frac{H_2^2}{h_2^2} W_{2A} \right) + J^2 \left(\frac{H_1}{h_1} \Phi_1 (3 + \pi) + \Phi_2 (3 + \pi) \right). \end{cases} \quad (5)$$

Принимая во внимание свойства кривых 2-го порядка, раскрывая систему уравнений (5), имеем коэффициенты Зейделя

$$S_I = 0, S_{II} = 1/2, S_{III} = f(e^2), S_V = f(e^2).$$

Коэффициенты S_I и S_{II} , определяющие апланатическую коррекцию, не зависят от квадрата эксцентриситета зеркал, а зависимость коэффициентов aberrаций S_{III} и S_V линейная.

Нетрудно получить упрощенные математические выражения преобразованных aberrационных коэффициентов B и K , определяющих сферическую aberrацию и кому [8, с. 77], используемые для проектного моделирования зеркальных объективов:

$$B = 2 - \kappa - \frac{2}{\kappa} \text{ и } K = \frac{1}{\kappa - 1} + \frac{1}{(\kappa - 1)^2} - 1, \quad (6)$$

и далее условие апланатической коррекции: $\kappa = 0,382$ и $\kappa = 2,62$.

Трехзеркальная композиция концентрического объектива. Базовый модуль предлагаемой конструкции объектива из трех концентрических зеркал представлена на рис. 1, а. На первом этапе схема рассчитывается в тонких компонентах с действительным промежуточным изображением между ними (концепция двухступенчатой оптики [9]): первый компонент (зеркало 1) работает при $S_1 = -\infty$, а второй компонент (зеркала 2, 3) – с линейным увеличением β . На втором этапе составляются уравнения внешних элементов (оптическая сила, продольные и поперечные габариты, положения зрачков) для всей схемы и для каждого компонента в отдельности, далее по общим соотношениям производятся их вычисления.

Альтернативная схема с плоским зеркалом (рис. 1, б) обладает рядом преимуществ по сравнению с базовой схемой: меняя соотношения между радиусами зеркал r_2 и r_3 , т. е. увеличение второго компонента β , корригируется сферическая aberrация (по ходу действительного луча). Объектив имеет промежуточный действительный фокус, дает прямое изображение вне системы, при этом $\Phi_I = \Phi\beta$. Недостатком нового трехзеркального анастигмата является большая длина,

быстрорастущая при уменьшении параметра β в соответствии с соотношением $L = \left(\frac{1,5}{|\beta|} + 1 \right) f'$,

где f' – фокусное расстояние объектива; L – расстояние от плоского зеркала до заднего фокуса объектива. При введении в схему дополнительного плоского зеркала происходит изменение положения зрачков, определяющих линейное увеличение в зрачках β_p . Основные формулы параметрического алгоритма при $\beta_p = 1$:

передний отрезок, с которым работает второй компонент $S_2 = \frac{1}{\Phi_{II}}$; $S'_2 = S_2\beta = S'_F$;

формулы $z + f_2 = S_2$, $\beta = -\frac{f_2}{z}$ (Z – оптический интервал) определяют Φ_{II} ;

радиусы кривизны: $r_1 = \frac{2}{\Phi_{II}}$; $r_2 = \frac{2}{-\Phi_{II} + \frac{2}{r_3}}$; $r_3 = \frac{2}{-\Phi_{II} + \frac{2}{r_2}}$.

Формула для эквивалентной оптической силы запишется в виде

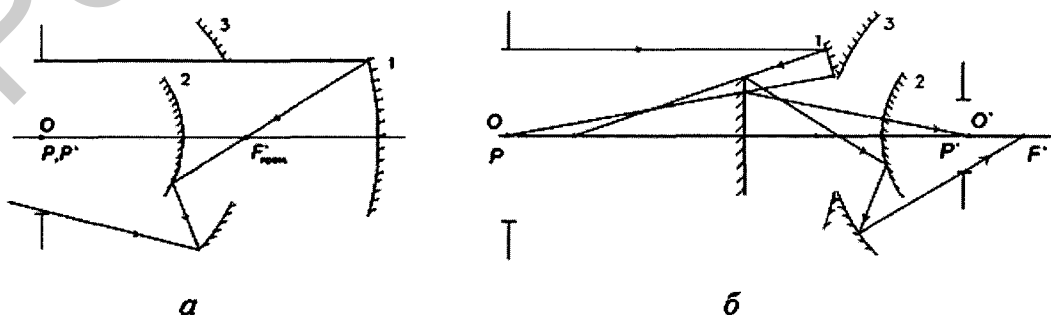


Рис. 1. Зеркальный концентрический объектив: а – базовая схема; б – схема с плоским зеркалом

$$\Phi = \frac{f'_1 + f_2}{f'_1 f_2} - (f'_1 + z - f_2) \frac{1}{f'_1 f_2} = -\frac{z}{f'_1 f_2} = \frac{\Phi_1}{\beta}.$$

При габаритном расчете второй компонент заменяется тонкой линзой, расположенной в центре кривизны, с соответствующей оптической силой. Важная особенность схемного решения: расстояние между промежуточным изображением и центром кривизны поверхностей второго компонента равно фокусному расстоянию f'_1 зеркала l независимо от положения дополнительно введенного плоского зеркала, что накладывает ограничения на значения радиусов второго компонента. Выражение для оптической силы второго компонента

$$\Phi_{II} = \frac{2}{r_3} - \frac{2}{r_2} + (r_3 - r_2) \frac{4}{r_2 r_3} = \frac{2}{r_2} - \frac{2}{r_3}.$$

В приведенных выше формулах дана нумерация радиусов зеркал без учета плоского зеркала. Полученную оптическую силу можно определить, варьируя сочетанием радиусов r_2 и r_3 зеркал второго компонента и исправляя сферическую aberrацию.

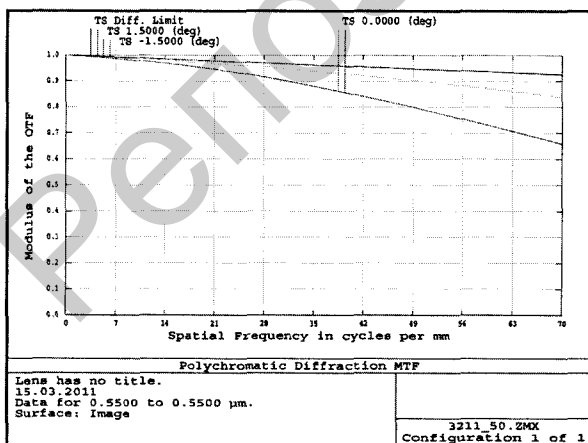
На этапе aberrационного расчета используется предложенная методика варьирования соотношений между радиусами кривизны r_2 и r_3 поверхностей зеркал второго компонента (второй ступени). Получены формулы для действительных лучей, проходящих через первый и второй компоненты, поэтому коррекция сферической aberrации проведена в области высших порядков для разработанного объектива из трех concentрических зеркал с плоским зеркалом [10], имеющего следующие оптические характеристики: относительное отверстие $D/f' = 1/1,5$, угловое поле зрения $2\omega = 3^\circ$.

Конструктивные параметры объектива получены в результате параметрического моделирования базовой схемы. Данные приведены для заднего фокусного расстояния $f' = 50$ мм:

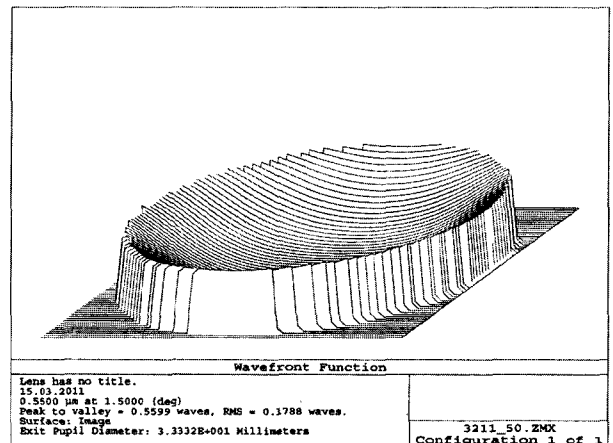
$$r_1 = -500 \text{ мм}; d_1 = -125 \text{ мм}; r_2 = \infty; d_2 = 312 \text{ мм}; r_3 = 62, 18 \text{ мм}; d_3 = -182 \text{ мм}; r_4 = 245 \text{ мм}.$$

На рис. 2 представлена aberrационная оценка качества изображения этого объектива (графическая интерпретация результатов компьютерного расчета в программной среде Zemax), которая соответствует дифракционному качеству изображения.

Зеркальные concentрические системы для УФ-микроскопии. Используя методику расчета и вводя параметр β , а также S_1 и S'_2 – передний и задний отрезки, получаем формулы параметрического расчета двухзеркальной системы из условия коррекции сферической aberrации, которые определяют все необходимые конструктивные данные:



a



b

Рис. 2. Графическая оценка качества изображения: *a* – графики частотно-контрастной характеристики; *b* – диаграмма изменения волнового фронта

$$r_1 = 2\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right)f; \quad r_2 = 2(\kappa - 1)f'; \quad d = 2(\kappa - 1)^2 f'; \quad L = \frac{(\beta - 1)^2}{\beta} f'; \quad \varepsilon = \frac{\kappa - \beta(2 - \kappa)}{3\kappa - 2};$$

$$S_1 = \left[\frac{1 - \beta}{\beta} + 2\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) \right] f'; \quad S_2' = [1 - \beta + 2(\kappa - 1)] f';$$

$$t_2 = \left[\frac{1 - \beta}{\beta} + 2(\kappa - 1) \right] f'; \quad t_1' = \left(3 - \beta - \frac{2}{\kappa} \right) f'.$$

Меняя условия нормировки: $\alpha_1 = \beta$, $\alpha' = 1$, $n_1 = -n_2 = n_3 = 1$, $h_1 = S_1\beta$, используя формулы (1), получаем значение коррекционного параметра

$$\alpha_2 = \beta + \frac{s\beta\kappa}{(\kappa - 1)f_1}.$$

Используя приведенные значения параметров, получаем уравнение абберационной коррекции

$$\begin{aligned} \overline{S}_1 = \frac{\kappa^3}{4(\kappa - 1)^3} & \left\{ S_1\beta^3 \left[2\beta\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) + S_1\beta \right] + \left[S_1\beta + \frac{2(\kappa - 1)^2}{\kappa}\beta f' + 2(\kappa - 1)S_1\beta f' \right] \times \right. \\ & \left. \times \left[1 - \frac{1}{\kappa} - \beta\left(1 - \frac{1}{\kappa}\right) - S_1\beta \right]^2 \left[1 - \frac{1}{\kappa} + S_1\beta \right] \right\}. \end{aligned}$$

В результате анализа уравнения (7) и проведения численных расчетов с использованием компьютерной среды Oral найдена графическая зависимость $k = \frac{1}{\kappa} = f(\beta)$ при $S_1 = 0$, представленная на рис. 3.

Таким образом, параметрический расчет концентрического зеркального объектива при заданном значении β на основе формул конструктивных данных и схемы выбора (рис. 3) позволяет определить коэффициент $k = \frac{1}{\kappa} = r_1/r_2$, при котором сферическая абберация 3-го порядка отсутствует ($S_1 = 0$). При необходимости коррекции сферической абберации высшего порядка следует незначительно изменить отношение r_1/r_2 , оставляя прежнюю коррекцию: $S_{II} = S_{III} = S_V = 0$. Для объектива с оптическими характеристиками $\beta = 0,1^{\times}$; $A = 0,4$; $2y = 1$ мм расчетные параметры сведены в таблицу.

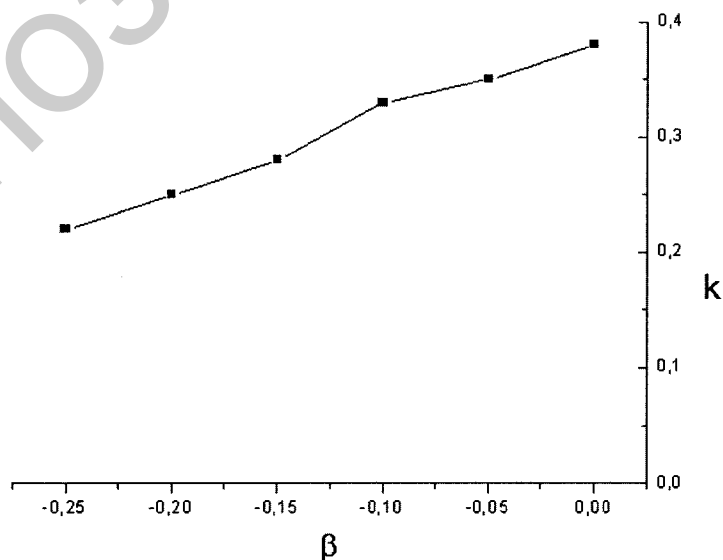


Рис. 3. Схема выбора конструктивных параметров

**Конструктивные параметры зеркального концентрического объектива
с фокусным расстоянием $f' = 10$ мм**

№ поверхности	Радиус кривизны, мм	Осевое расстояние, мм	Показатель преломления
1	-22,33	-8,0	-1
2	-14,33	8,0	1
3	-22,33	-8,0	-1
4	-14,33		1

Заключение. В системе из концентрично расположенных сферических зеркал возможно устранить кому, астигматизм и дисторсию, а подбором конструктивных параметров добиваются исправления сферической аберрации.

Разработан новый трехзеркальный анастигмат, составленный из концентрических элементов, позволяющий вынести плоскость изображения за пределы оптической системы, что дает возможность размещения перед плоскостью изображения сканирующих элементов, фильтров, различных приемников излучения и т. д. На рассмотренную зеркальную концентрическую композицию получен патент [11].

Даны параметры базового модуля, отмечена невозможность получения плоского изображения, как и в любой концентрической системе. Остаточная сферическая аберрация объектива представляет собой чистую аберрацию 5-го порядка, которая может быть компенсирована путем введения аберрации 3-го порядка противоположного знака. Требуемое изменение коэффициента Зейделя S_1 устанавливает параметр α_2 , который определяет различные модели зеркального анастигмата.

Литература

1. Попов Г. М. Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении. М., 1969.
2. Smith W. J. Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems. New York: McGraw-Hill, 2000.
3. Шредер Г. Техническая оптика. М., 2006.
4. www.gts.iac.es.
5. Пейсахсон И. В. // Оптический журнал. 2002. Т. 69, № 1. С. 21–35.
6. Артюхина Н. К. // Оптический журнал. 2005. Т. 72, № 10. С. 57–59.
7. Артюхина Н. К., Володько Н. А. // Материалы 7-й МНТК «Приборостроение – состояние и перспективы». Киев, 2008. С. 63–64.
8. Артюхина Н. К. Теория, методы проектирования и расчет оптики зеркальных систем. Мн., 2009.
9. Meinel A. B., Meinel M. P. // Optical Engineering. 1992. Vol. 31, N 11. P. 2271–2279.
10. Четырехзеркальный объектив. Пат. 16709 РБ, МКИ G02B 17/02, 17/06 / Н. К. Артюхина; заявитель – БНТУ. №а 2011 0351 // Оф. бюл. 2013. № 1.
11. Зеркальный объектив. Пат. 7427 РБ, МКИ G02B 17/02, 17/06 / Н. К. Артюхина, Н. А. Гусакова; заявитель – БНТУ. №и 2010 1061 // Оф. бюл. 2011. № 4.

N. K. ARTIOUKHINA

A THREE-MIRROR CONCENTRIC SYSTEM

Summary

A new three-mirror concentric system forming intermediate image is considered. It is formed by three concave mirrors. Different design combinations are found. The parametric algorithm of the calculation and formulas of aberration coefficients are given. Results of calculations can be used for development of new optical devices using mirror optics.