

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

УДК 535.317; 681.7

Н. К. АРТЮХИНА¹, Н. Н. ТУЛЬЕВА²

ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫЙ ДЛИННОФОКУСНЫЙ ОБЪЕКТИВ-АНАСТИГМАТ

¹Белорусский национальный технический университет,

²Государственный университет кино и телевидения. Санкт-Петербург, Россия

(Поступила в редакцию 12.11.2009)

Введение. Современные зеркальные системы находят широкое применение в различных оптических приборах, работающих в широкой области спектра. Двухзеркальные системы имеют простую и компактную конструкцию, но невысокие оптические характеристики; они наиболее исследованы и классифицированы [1]. Классические системы и их модификации используются, к примеру, в рентгеновской технике (система Шварцшильда [2]), в космической технике (широко известный предфокальный апланат Ричи–Кретьена [3], где для слежения за объектами используют поворот второго зеркала). Новые двухзеркальные системы имеют необычную асферическую форму зеркал или используют planoидные элементы («зеркальный Шмидт» [4]), которые применяют для компенсации aberrаций сферического зеркала или используют как дифракционную решетку в спектрографах.

Системы из трех зеркал обладают более широкими aberrационными возможностями и имеют коррекцию сферической aberrации, комы и астигматизма; в некоторых вариантах устранена кривизна изображения. Они отличаются хорошими габаритными соотношениями, но неудобным расположением приемника изображения [5].

Среди довольно большого класса трехзеркальных систем следует отметить два направления развития: компактные конструкции с моноблоком из нечетных зеркал и системы с промежуточным изображением.

Цель настоящей работы – представление результатов исследования и разработки трехзеркального объектива, схема которого удовлетворяет вышеназванным направлениям.

Анализ схемных решений. В компактных схемах зеркала 1, 3 имеют приблизительно равные радиусы кривизны поверхностей, причем профили этих поверхностей в месте контакта выполняются идентичными для уменьшения виньетирования наклонных пучков. Объективы, рассчитанные по этой схеме, обладают высокой степенью коррекции aberrаций, но имеют ряд недостатков. Нечетные поверхности могут сильно отличаться по форме, тогда общая подложка конструктивно невыполнима, или же имеют асферический профиль высокого порядка [6].

Промежуточное изображение дает ряд преимуществ: упрощение системы бленд; наличие эффективной и удобной точки в схеме, куда можно помещать световые фильтры, фокальные корректоры, сканирующие элементы, поляризаторы, преобразователи изображения и т. д. Зеркальная схема (рис. 1, а) [7] технологически не осуществима из-за

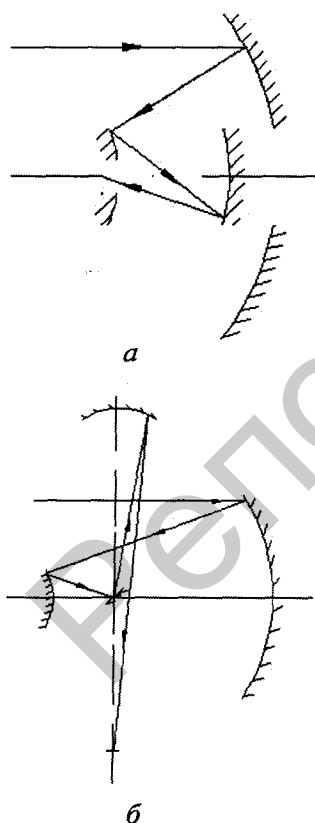


Рис. 1 Схемы трехзеркальных объективов: а – схема В. Н. Чуриловского В. Н., Н. Н. Тульевой; б – схема D. Korsch

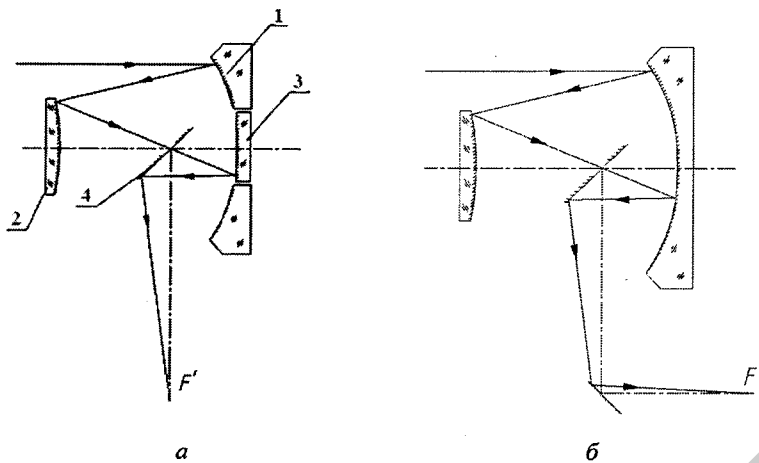


Рис. 2. Компактный зеркальный объектив: *a* – схема из зеркал 1, 2, 3, 4, имеющая $S_f' = -1050$ мм; *б* – схема из пяти зеркал, имеющая $S_f' = -450$ мм, $d_4 = 600$ мм

чрезмерно высоких относительных отверстий зеркал (порядка 1:0,3). При введении дополнительного плоского зеркала можно создать двухосевую схему с улучшенными оптическими характеристиками (рис. 1, б) [8]. Она получила дальнейшее развитие и используется в астрономической технике [9].

Возможно построение план-анастигматических двухосевых зеркальных систем с изображением на бесконечности [10], их рационально рассчитывать для видимых увеличений $\Gamma = -(6-10)^X$, поля зрения $2\omega = 1-2^\circ$ при экранировании по диаметру $\varepsilon = 0,2-0,35$. Афокальные системы малых увеличений целесообразно конструировать с зеркалом 3, оптическая ось которого перпендикулярна оптической оси объектива, в них угловой размер максимальной фигуры рассеяния не превышает $\Delta\sigma' = 10''$ по полю изображения.

Зеркальная афокальная система подобного типа при введении некоторой расфокусировки в ход лучей была использована как базовая при создании нового длиннофокусного объектива [11], рассматриваемого в настоящей работе. Схемы зеркального объектива, представленные на рис. 2 *a*, *б*, соответствуют рассмотренным выше перспективным направлениям в зеркальной оптике: имеют промежуточное изображение, в них используется принцип совмещения вершин четных и нечетных зеркал.

Система, представленная на рис. 2, *a*, состоит из трех асферических зеркал 1, 2, 3. В плоскости промежуточного изображения установлено зеркало 4, служащее для излома оптической оси на 90° , что позволяет уменьшить виньетирование и защитить плоскость изображения от лучей посторонней засветки. Зеркало 4 является плоским, и его aberrации при параметрическом расчете не учитываются.

Задачи расчета и параметрический синтез. Приведем некоторые результаты исследования и aberrационного расчета компактных систем, использующих такие схемные решения. В области Зейделя теоретически можно исправить основные монохроматические aberrации в любой из рассмотренных систем, но практически большинство решений оказываются конструктивно неосуществимыми, дающими или мнимое изображение, или вообще не пропускающими свет на плоскость изображения, или имеющими большое экранирование.

Воспользуемся методикой расчета афокальных систем [10]. Для рассматриваемых схем изменяются условия нормировки, так как угол нулевого луча в пространстве изображений $\alpha_4 \neq 0$, при сохранении остальных параметров нулевого луча $\alpha_2 < 0$, $\alpha_3 > 0$, $h_2 > 0$, $h_3 < 0$ и осевых расстояний $d_1 < 0$, $d_2 > 0$. На рис. 3 показан ход первого параксиального луча в одной из модификаций (без дополнительного плоского зеркала) с начальными данными: $\alpha_1 = 0$, $h_1 = 1$, $\alpha_4 = 1$, $f' = h_1 / \alpha_4 = 1$. Схемное решение соответствует концепции двухступенчатой оптики [12]: первая ступень – двухзеркальный объектив с фокусным расстоянием $f'_{1,2}$, а вторая ступень – третий компонент (зеркало 3), работающий с увеличением $\beta_3 = h_1 / f'_{1,2} \alpha_4$.

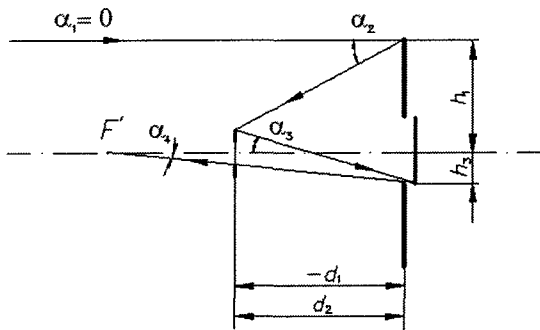


Рис. 3. Ход первого параксиального луча в модификации из зеркал 1, 2, 3 без дополнительного плоского зеркала

При расчете план-анастигмата необходимо, чтобы преобразованные коэффициенты B_0 , K_0 , C_0 , D_0 [13], описывающие сферическую aberrацию, кому, астигматизм и кривизну изображения третьего порядка, были близки к нулю, поэтому предварительный проектный расчет будет состоять из следующих этапов:

расчет параметрических характеристик (радиусов кривизны r_1 и r_3 зеркал 1, 3 и высоты луча h_2 на зеркале 2) с использованием уравнений нулевого луча

$$\alpha_2 = \frac{h_1(\chi_1 - \chi_2)}{r_1\chi_1} + \frac{\chi_2\alpha_1}{\chi_1}; \quad h_2 = \frac{\chi_2\alpha_3 - \chi_3\alpha_2}{\chi_2 - \chi_3}r_2;$$

$$h_3 = \frac{\chi_3\alpha_4 - \chi_4\alpha_3}{\chi_3 - \chi_4}r_3;$$

поиск такого их сочетания, при котором вершины нечетных зеркал будут совмещены, т. е. осевые расстояния между вершинами зеркал $d_1 \approx -d_2$. При этом положительный угол α_3 определит выполнение условия план-анастигматической коррекции третьего порядка

$$\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} \frac{\chi_s \alpha_{s+1} - \chi_{s+1} \alpha_s}{h_s} = \alpha_2 - (\alpha_3 + \alpha_2)/h_2 + (1 + \alpha_3)/h_3 = 0;$$

расчет параметров σ_s для зеркал 2, 3, определяющих их асферизацию (деформации зеркал равны квадрату эксцентриситета меридиональных кривых второго порядка $\sigma_s = -e^2$), из условия исправления комы и астигматизма

$$\begin{cases} K_0(\sigma_2, \sigma_3) = 0, \\ C_0(\sigma_2, \sigma_3) = 0, \end{cases}$$

решение уравнения $B_0 = 0$ относительно деформации σ_1 зеркала 1.

Аберрационные параметрические уравнения. Для определения величин конструктивных параметров (радиусов кривизны, толщин, коэффициентов уравнений несферических поверхностей) по заданным значениям допустимых остаточных aberrаций при выбранном схемном решении необходимо знать аналитическую зависимость между ними, которая в общем виде может быть записана лишь в области aberrаций третьего порядка. Составим aberrационные параметрические уравнения для системы с тремя зеркальными несферическими поверхностями с обозначениями из работ [13, 14]. Окончательную подстановку в связи с громоздкостью полученных формул осуществляем в среде Mathcad, используя вспомогательные aberrационные величины P , T , W , Q , определяемые формулами

$$P_s = \frac{(-1)^{s+2}}{4} (\Delta\alpha_s)^2 \sum \alpha_s, \quad T_s = \frac{(-1)^{s+2}}{4} (\sum \alpha_s)^3, \quad W_s = \frac{1}{2} \Delta\alpha_s \sum \alpha_s, \quad Q_s = T_s \sigma_s + P_s.$$

Выражение для коэффициента сферической aberrации $B_0 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=3} h_s Q_s = 0$ приводится к виду

$$\alpha_2^3(\sigma_1 + 1) - h_2(\alpha_3 + \alpha_2)((\alpha_3 - \alpha_2)^2 + \sigma_2(\alpha_3 + \alpha_2)^2) + h_3(1 + \alpha_3)[(1 - \alpha_3)^2 + \sigma_3(1 + \alpha_3)^2] = 0. \quad (1)$$

Для коэффициента комы, когда $2K_0 = \sum_{s=1}^{s=3} h_s S_s Q_s - \frac{1}{2}(1 - \alpha_1^2) = 0$, имеем уравнение

$$\alpha_3(1 - h_2)(\alpha_3 + \alpha_2)(\alpha_3 + \alpha_2(1 - h_2))((\alpha_3 - \alpha_2)^2 + \sigma_2(\alpha_3 + \alpha_2)^2) - (1 + \alpha_3)(\alpha_2 - (\alpha_2^2 - \alpha_3^2 - \alpha_3)(1 - h_2))((1 - \alpha_3)^2 + \sigma_3(1 + \alpha_3)^2) = 0. \quad (2)$$

Условие коррекции астигматизма $2C_0 = \sum_{s=1}^{s=3} h_s S_s^2 Q_s - \sum_{s=1}^{s=3} S_s \Delta(\alpha_s)^2 - \frac{\chi_4}{2R_p} = 0$, где R_p – радиус кривизны Петцваля, дает уравнение

$$\begin{aligned} & \alpha_3^2(1-h_2)^2(1+\alpha_3)(\alpha_3+\alpha_2)(\alpha_3+\alpha_2(1-h_2))((\alpha_3-\alpha_2)^2+\sigma_2(\alpha_3+\alpha_2)^2)- \\ & -(\alpha_3-1)(\alpha_2-(\alpha_2^2-\alpha_3^2-\alpha_3)(1-h_2))^2((\alpha_3+1)^2+\sigma_3(\alpha_3-1)^2)+ \\ & +4\alpha_2\alpha_3^2(1-h_2)(1+\alpha_3)(\alpha_3+\alpha_2(1-h_2))(\alpha_3^2-\alpha_2^2)+ \\ & +4\alpha_2\alpha_3(1-\alpha_3^2)(\alpha_2-(\alpha_2^2-\alpha_3^2-\alpha_3)(1-h_2))=0. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, исправления сферической aberrации, комы и астигматизма можно достичь изменением формы профиля зеркальных поверхностей, используя систему алгебраических уравнений (1)–(3), связывающих коррекционные параметры σ_s с конструктивными параметрами объектива. Используя программу Mathcad, получаем параметры для различных вариантов и среди возможных схемных решений отбираем те, которые конструктивно осуществимы и имеют допустимое экранирование. Отметим, что кроме экранирования зеркалом 2 входящего пучка лучей создается дополнительное экранирование плоским зеркалом (сначала в пучке лучей, отраженных от зеркала 1, а затем от зеркала 3).

Для окончательной aberrационной коррекции применяем три параметра нулевого луча α_2 и α_3 и h_3 , определяющие его координаты на зеркальных поверхностях. Параметр α_2 определяет относительное отверстие зеркала 1, характеризующее трудоемкость его изготовления, поэтому для технологически адаптированных систем перед началом расчета целесообразно задавать его значение. Высота нулевого луча h_2 на зеркале 2 дает предварительную величину экранирования, коэффициент которого обычно $\varepsilon = 0,3-0,5$, поэтому в некоторых вариантах предварительно задают один из трех параметров: h_3 , h_2 или α_3 . Варьируя параметрами α_3 и h_3 , можно получить систему с допустимым экранированием, а также исправить кривизну изображения и дисторсию.

Анализ результатов расчета. При использовании полученных формул рассчитан ряд базовых вариантов с исправленными основными монохроматическими aberrациями третьего порядка. Исследование показало, что угловое поле при одинаковом экранировании получается больше в системах с высокими относительными отверстиями зеркал. Данные и характеристики некоторых вариантов трехзеркальных систем с промежуточным изображением, находящимся перед главным зеркалом, приведены в табл. 1. В таблице указаны значения диафрагменного числа главного зеркала (k_1), осевой длины системы (d), заднего отрезка системы (S'). Системы чрезвычайно компактны, осевая длина, определяющая продольные габариты, не превышает величины $0,1f'$, поэтому целесообразно рассчитывать длиннофокусные системы, для которых требования к основным характеристикам по диаметру входного зрачка $D > 500$ мм, фокусному расстоянию $f' > 5000$ мм, относительному отверстию $D/f' \sim 1:10$, угловому полю в пространстве предметов $2\omega > 45^\circ$.

Т а б л и ц а 1. Варианты трехзеркальных систем с промежуточным изображением, находящимся перед главным зеркалом

k_1	β_3^*	d	S'
1,6	-2	0,0685	-0,06
1,4	-2,5	0,060	-0,075
1,27	-3	0,054	-0,09
1,16	-3,5	0,048	-0,105
1	-4	0,044	-0,12

Приведем конструктивное описание одного из вариантов рассчитанного анастигмата с техническими характеристиками $f' = 10000$ мм; $D/f' = 1:10$; $2\omega = 1^\circ$.

Для базового модуля результатом первого этапа расчета стал массив значений радиусов и осевых расстояний (в относительных единицах): $d_1 = -0,06636$; $h_3 = -0,13664$; $d_2 = 0,068061$; $r_2 = -0,38555$. На втором и третьем этапах получены значения деформаций зеркал: $\sigma_1 = -0,993186$, $\sigma_2 = -4,079547$, $\sigma_3 = -0,510960$, которые варьировались в процессе оптимизации для получения

окончательного варианта, его конструктивные данные представлены в табл. 2. Зеркало 1 в объективе является близким к параболоиду эллипсоидом, зеркало 2 гиперболическое, а зеркало 3 имеет эллиптическую форму.

Т а б л и ц а 2. Конструктивные параметры трехзеркального объектива

Номер поверхности	r	d	e^2
1	-1580	-663,6	0,984550
2	-385,55	680,62	3,914220
3	-510	-316,5	0,622810

Расчеты aberrаций базовых и оптимизированных вариантов показали, что в системе откорректирована также дисторсия, в области Зейделя ее величина – порядка 0,035 мм в пределах поля $2\omega = 1-1,5^\circ$, величина сферической aberrации – порядка 0,014 мм, неизопланатизм, определяющий кому, 0,00002 %.

Защита изображения и виньетирование. Достоинством схем с промежуточным изображением после зеркала 2 является то, что выходной зрачок находится в ходе лучей рядом с дополнительным плоским зеркалом, что значительно облегчает защиту плоскости приемника изображения от посторонних засветок без увеличения экранирования. В этом случае не требуется введение длинной бленды у зеркала 1. При установке бленд в конструкции рассматривались паразитные лучи, прошедшие через отверстие в плоском зеркале (или отраженные от него в другой модификации) и отраженные от зеркала 3. При этом учитывалось, что большинство посторонних лучей будут иметь большие углы падения, кроме того, вторичные лучи посторонней засветки срезаются зеркалом 2 как экраном. На рис. 4, а показана необходимая конструктивная бленда, размеры которой учитывались при расчете коэффициента виньетирования, на рис. 4, б – диаграмма виньетирования.

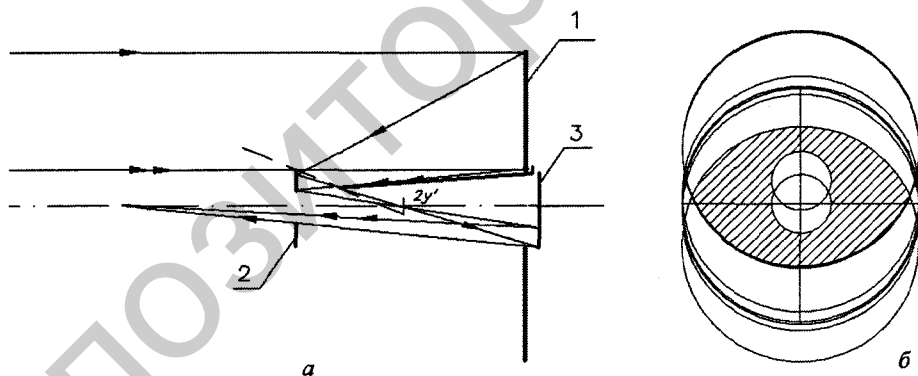
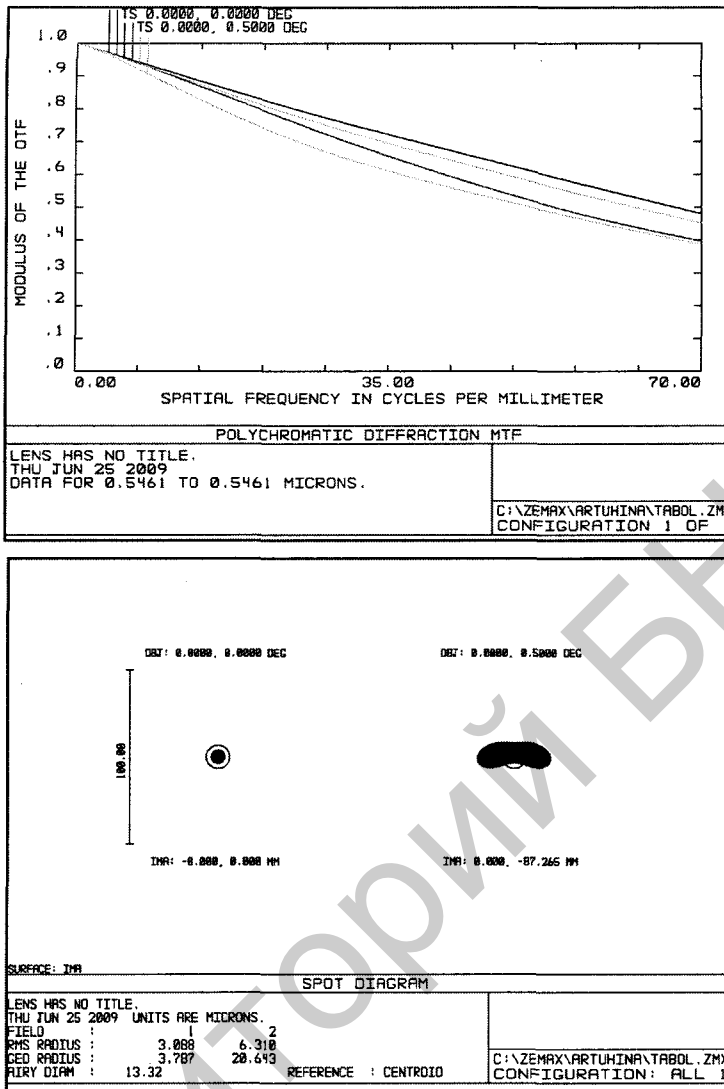


Рис. 4. Устранение постороннего света: а – схематический чертеж установки бленд в схеме из зеркал 1, 2, 3; б – диаграмма виньетирования

Заключение. Рассмотренный объектив образован за счет положительной эквивалентной оптической силы системы из первых двух зеркал $\Phi_1 + \Phi_2$; подбором Φ_3 устранена кривизна изображения при выполнении условия $\Phi_1 + \Phi_3 = \Phi_2$. Рассчитанный объектив представляет практический интерес и может быть использован в системах регистрации, работающих с приемниками – ПЗС-матрицами (приборами с зарядовой связью). Центральное экранирование по площади в полученной системе составляет 6,25%, коэффициент виньетирования k_0 – порядка 0,43.

Аберрационные характеристики, полученные при использовании программного пакета Zemax, представлены в табл. 3. Объектив обеспечивает отличное качество изображения для заданных оптических характеристик: диаметр кружка рассеяния для осевого пучка 0,002 мм, разрешающая способность 130 мм^{-1} , число Штреля 0,66. Кроме того, в объективе получена ортоскопическая коррекция (дисторсия не превышает 0,0063%).

Таблица 3. Характеристики качества изображения (компьютерные расчеты Zemax)



Литература

1. Хиеп Н., Якушенко в Т. И. // Изв. вузов. Приборостроение. 2009. Т. 52, № 3. С. 60–66.
2. Артюков И. А., Асадчиков В. Е., Виноградов А. В. и др. // Квантовая электроника. 1995. Т. 22, № 9. С. 951–954.
3. Попов Г. М. Современная астрономическая оптика. Л., 1988.
4. Пейсахсон И. В. // Оптический журнал. 2002. Т. 69, № 1. С. 21–35.
5. Mikhe'ison, N. N. // Optica Acta. 1982. Vol. 29, N. 7. P. 979–983.
6. Зеркальный объектив телескопа: пат. 2010272 РФ: МКИ G 02 В 23/12 G 02В 17/06 / Л. Т. Кочетова, Л. Л. Крупнова, Г. И. Лебедева, Э. А. Лустберг, С. В. Любарский. № 5036014/10; заявл. 01.04.92; опубл. 30.03.04 // Бюл. изобрет. 1994. № 6.
7. Зеркальный объектив: а. с. 425155 СССР / В. Н. Чуриловский, Н. Н. Тульева // Бюл. изобрет. 1974. № 15.
8. Korsch D. // Appl. Opt. 1977. Vol. 16, N. 8. P. 2074–2077.
9. Чубей М. С., Цуканова Г. И., Бахолдин А. В. // Оптический журнал. 2007. № 7. С. 37–41.
10. Артюхина Н. К. // Весці НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2006. № 4. С. 57–59.
11. Зеркальный объектив: пат. 11762 РБ: МКИ G 02В 17/02, 17/06 / Н. К. Артюхина; заявитель БНТУ. № а 20070834; заявл. 05.07.03; опубл. 28.02.09 // Оф. бюл. 2009. № 1.
12. Meinel A., Meinel M. // Opt. Eng. 1992. Vol. 31, N. 11. P. 2271–2279.
13. Артюхина Н. К. // Докл. НАН Беларусі. 2007. Т. 51, № 4. С. 81–85.
14. Артюхина Н. К. // Метрология и приборостроение. 2009. № 2. С. 21–24.

N. K. ARTIUKHINA, N. N. TULYEVA

THREE-MIRROR LONG FOCAL LENGTH ANASTIGMATIC LENS

Summary

Three-mirror anastigmatic lens is considered. It is formed by a convex mirror and two combined concave mirrors. Different design forms are found. The formulas of aberration coefficients are given. The plane-field anastigmats are discussed. Results of calculations can be used for development new optical devices using mirror optics.