

3. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Излучатель переменной яркости на основе сопряженных интегрирующих сфер.// Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006. - №6(66). – с. 61-64.
4. Сахновский М. Ю., Гуминецкий С. Г., Кравцов В. Е. и др. Об особенностях измерения потока излучения светодиодов с помощью фотометрического шара.// Оптика и спектроскопия.— 1979.- т.46, вып.3.— с. 515- 523.
5. Михеенко Л. А., Боровицкий В. Н. Осветительный канал цифрового микроскопа на базе диффузного излучателя.// Технология и конструирование в электронной аппаратуре.— 2006. – с. 20- 27.

Міхеєнко Л.А., Боровицький В.М., Гордієнко Ю.О. Експериментальне дослідження дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери. У роботі представлені методика та апаратура для вимірювання розподілу яскравості у площині вихідної апертури дифузного випромінювача на основі інтегруючої сфери. Виконаний аналіз експериментальних даних про розподіл яскравості та сформульовані рекомендації щодо вибору оптимальних параметрів дифузного випромінювача.	Mikheenko L., Borovytsky V., Gordienko Y. Experimental studying of diffusive light source based on integration sphere. The paper represents the technique and instrumentation for measurement of brightness distribution throughout an output aperture of the diffusive light source based on an integration sphere. The analysis of experimental data of brightness distribution is done and recommendations for optimal parameters selection are formulated for the diffusive light source are formulated.
--	---

*Надійшла до редакції
10 червня 2006 року*

УДК 535.317.6

АНАСТИГМАТЫ С ДВОЙНЫМ ЗЕРКАЛОМ, ИМЕЮЩИЕ ДЕЙСТВИТЕЛЬНОЕ ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ИЗОБРАЖЕНИЕ

*Артюхина Н.К., Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Рассмотрены четырехзеркальные анастигматы с плоским полем, в которых два зеркала объединены в моноблок. Приведен расчет конструктивных параметров, исследован вопрос защиты плоскости изображения от постороннего света. Объективы могут использоваться в космической оптике и оптических приборах, работающих в УФ и ИК областях спектра

Введение. Схемные решения

Зеркальные оптические системы находят самое широкое применение в различных областях народного хозяйства. Достаточным числом коррекционных параметров обладают четырехзеркальные схемы, которые позволяют не только исправить четыре основных аберрации: сферическую, кому, астигматизм, кривизну изображения, но и получить удобное положение плоскости приемника изображения в отличие от двух- и трехзеркальных. При

проектировании зеркальных систем, работающих в широкой области спектра, в последнее время повысился интерес к схемным решениям, имеющим промежуточное изображение. Концепция построения двухступенчатой зеркальной оптики привлекает внимание ученых в странах СНГ и за рубежом [1–2]. В таких системах зеркала с несферическими поверхностями обычно более технологичны, а также проще решается задача защиты плоскости изображения от постороннего света.

В работе проводится исследование зеркальных анастигматов с плоским полем, имеющих промежуточное изображение после системы из двух зеркал. Объективы состоят из трех компонентов с четырьмя отражениями. Их схемные решения описаны ранее [3], и отличительной особенностью является наличие двойного зеркала, что делает конструкцию компактной. По предложенной классификации рассматриваемые анастигматы относятся к I классу, в котором первое зеркало всегда выпуклое, второе вогнутое, а третье и четвертое зеркала могут иметь поверхности любой формы.

В работах [4–5] описаны рассчитанные практически реализуемые варианты I и II типа из этого класса систем (с учетом экранирования, виньетирования и защиты плоскости изображения от постороннего света). В объективах с промежуточным изображением (III и IV тип) третье зеркало расположено на оптической оси после эквивалентного фокуса системы из первых двух зеркал, т.е. для них выполняется условие $h_3 < 0$. Угол α_3 в этих объективах всегда положителен, а α_4 либо отрицателен (объектив 43-2Б-IV), либо равен нулю (объектив 43-2Б-III).

Аберрационный расчет

Используем коэффициенты аберраций третьего порядка B_0, K_0, C_0, D_0, E_0 для составления системы уравнений относительно величин Q_s , определяющих деформации σ_s зеркальных асферических поверхностей:

$$\sigma_s = \frac{Q_s - P_s}{T_s}, \quad (1)$$

$$\text{при } s=1,2,3,4, \text{ где } T_s = \frac{(v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s)^3}{v_s v_{s+1} (v_{s+1} - v_s)^2}; \quad P_s = \left(\frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{v_{s+1} - v_s} \right)^2 (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s); \quad v_s = \frac{1}{n_s};$$

$$h_{s+1} = h_s - \alpha_{s+1} d_s \text{ (все обозначения даны в работе [6]).}$$

Коррекционные параметры $\sigma_s = -e^2$ определяют квадрат эксцентриситета меридиональных кривых второго порядка, а остальные конструктивные параметры нельзя считать полноценными, так как их использование может привести к конструктивно неосуществимой системе, дающей или мнимое изображение, или вообще не пропускающей свет на плоскость изображения. Для исправления четырех основных монохроматических аберраций: сферической, комы, астигматизма и кривизны изображения необходимо решить

систему уравнений, связывающих эти коэффициенты с конструктивными параметрами.

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} h_s Q_s = 0 \\ K_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} h_s Q_s S_s = 0 \\ C_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} \frac{v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s}{h_s} - \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} W_s S_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} h_s Q_s S_s^2 = 0 \\ D_0 &= \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=4} \frac{v_s \alpha_{s+1} - v_{s+1} \alpha_s}{h_s} + C_0 = 0. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В формулах (2) $W_s = \left(\frac{\alpha_{s+1} - \alpha_s}{v_{s+1} - v_s} \right) (v_{s+1} \alpha_{s+1} - v_s \alpha_s)$; $S_s = \sum_{k=1}^{k=s-1} \frac{v_{k+1} d_k}{h_k h_{k+1}}$; $S_1 = 0$.

Объектив 43-2Б-III

На рис.1 представлена схема оптики зеркального объектива: промежуточное изображение после второго зеркала формируется в фокальной плоскости третьего, сопряженной с приемником изображения, который может быть вынесен за габариты. В данной схеме $h_1 = -h_3 = -h_4$, $\alpha_4 = 0$, поэтому третье и четвертое зеркала будут вогнутыми.

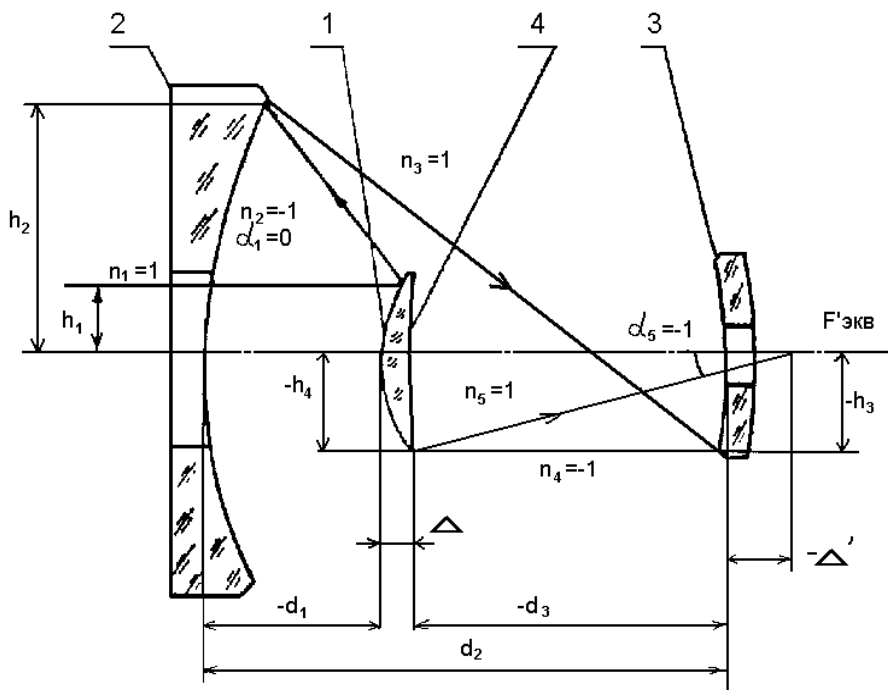


Рис.1. Принципиальная схема оптики объектива 43-2Б-III

Определим условия нормировки для первого параксиального луча, идущего из осевой точки предмета на край входного зрачка:

$$\alpha_1 = 0; \quad \alpha_5 = -1; \quad h_1 = 1; \quad f' = -1. \quad (3)$$

В результате расчета углов α_s и высот h_s получим сводки формул для расчета радиусов зеркальных поверхностей r_s :

$$r_1 = \frac{2}{\alpha_2}; \quad r_2 = \frac{2h_2}{\alpha_2 + \alpha_3}; \quad r_3 = \frac{2h_3}{\alpha_3 + \alpha_4}; \quad r_4 = \frac{2h_4}{\alpha_4 + 1}; \quad (4)$$

а также осевых расстояний d_s объектива:

$$d_1 = \frac{1 - h_2}{\alpha_2}; \quad d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\alpha_3}; \quad d_3 = \frac{h_3 - h_4}{\alpha_4}. \quad (5)$$

Учитывая расстояние Δ между первым и четвертым зеркалом, которое выбирают из конструкторских соображений, и величину выноса фокальной плоскости относительно вершины третьего зеркала Δ' , имеем:

$$d_2 = -(d_1 + d_3) + \Delta; \quad d_3 = -(1 + \Delta'). \quad (6)$$

Для зеркального анастигмата с планкоррекцией ($D_0 = 0$) приходим к условию Петцваля, которое в нашем случае имеет вид:

$$\alpha_2 - \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} - (\alpha_4 + \alpha_3) - 1 + \alpha_4 = 0.$$

Учитывая (1), а также формулы (4-6), получим уравнения для определения углов α_2 и α_3 при заданной высоте h_2 :

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2 &= \frac{h_2 + \alpha_3(1 + h_2)}{h_2 - 1} \\ \frac{1 - h_2}{\alpha_2} &= \Delta + \Delta' + 1 - \frac{1 + h_2}{\alpha_3} \end{aligned} \right\} \frac{1}{2} \quad (7)$$

Решение системы уравнений (7) представлено графически на рис. 2 для различных значений Δ' и h_2 при конструктивной толщине моноблока $\Delta = 0,05$ (в относительных единицах). Уменьшение α_2 приводит к увеличению радиусов двух зеркал, а увеличение α_3 к уменьшению коэффициента центрального экранирования η , поэтому целесообразнее рассчитывать объективы с большими поперечными габаритами ($h_2 = 4 \div 5$).

Схемное решение при $\alpha_3 = 3,3761$ дает следующие численные относительные значения параметров: $r_1 = 0,2874$, $r_2 = 0,7740$, $r_3 = -0,5924$, $r_4 = 2,00$, $d_1 = -0,4810$, $d_2 = 1,4810$, $d_3 = -1$, $h_1 = 1$, $h_2 = 4,0$, $h_3 = -1$, $h_4 = -1$.

Объектив типа 43-2Б-IV

Отличительной особенностью схемы является то, что формируются два промежуточных изображения: после второго и после третьего зеркал (рис. 3).

Для определения конструктивных величин α_2 и α_3 преобразуем систему

уравнений (7) с учетом, что $f' = 1,0$, $\alpha_5 = 1,0$, $h_1 = h_4 = -h_3$.

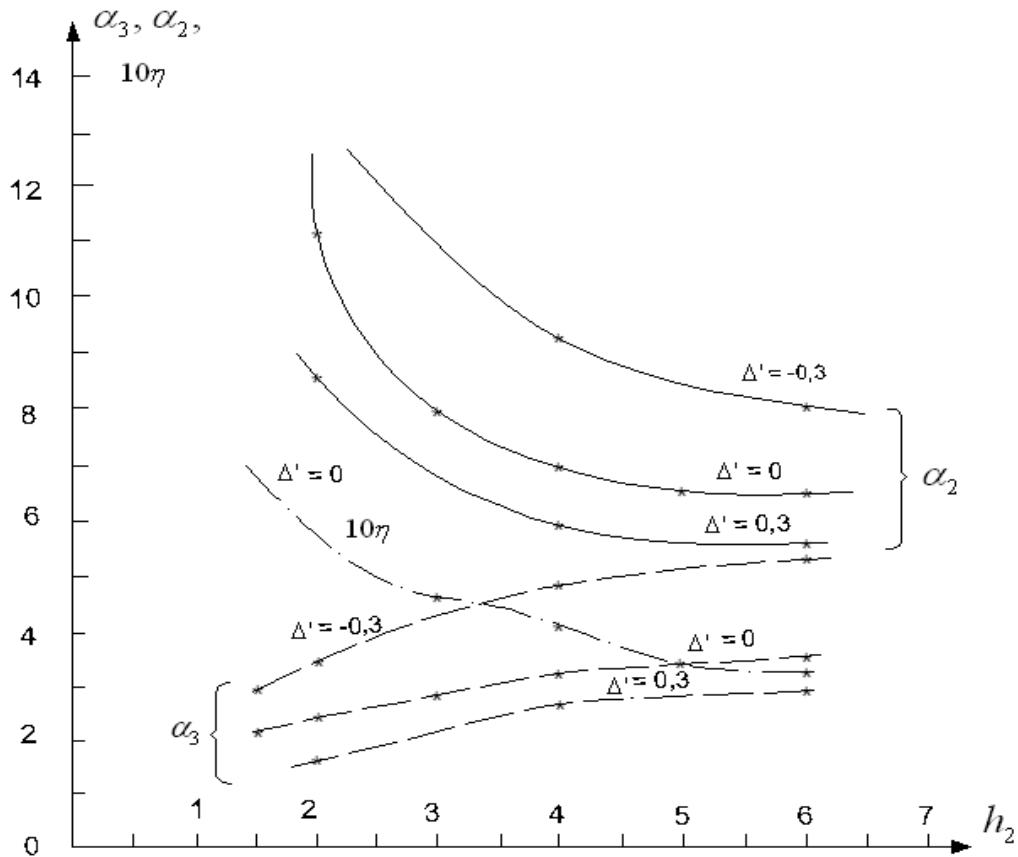


Рис. 2. Графики изменения угловых параметров α_2 , α_3 и коэффициента центрального экранирования η

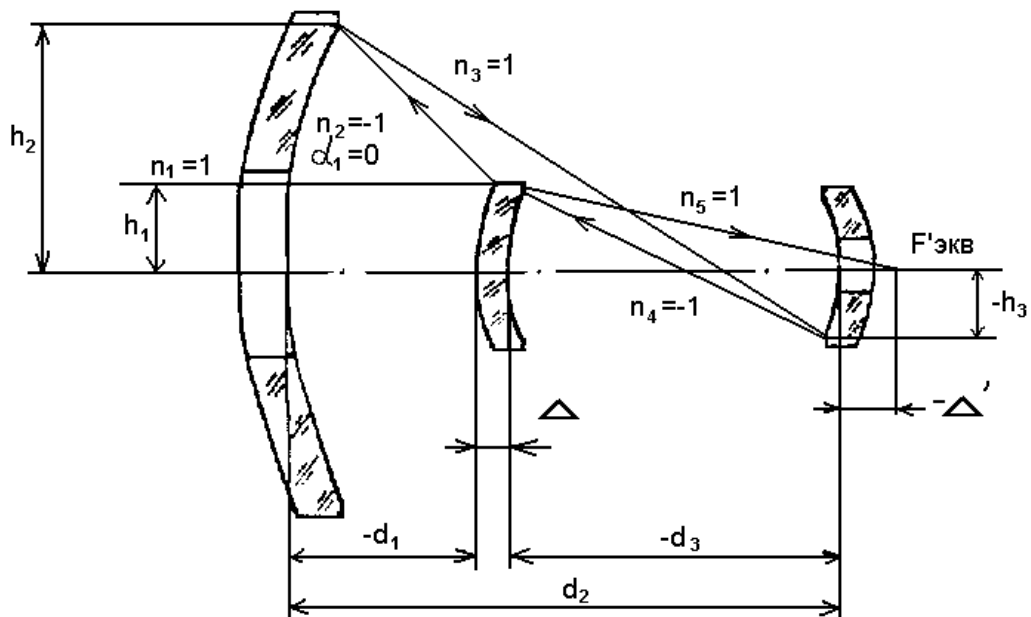


Рис.3. Объектив с двумя промежуточными изображениями 43-2Б-IV

Тогда

$$\left. \begin{aligned} \alpha_2(h_2 - 1) &= \alpha_3(1 + h_2) + h_2 \left(1 + \frac{4}{1 + \Delta'} \right) \\ \frac{1 + h_2}{\alpha_3} + \frac{1 - h_2}{\alpha_2} &= \Delta + \Delta' + 1 \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Графическое решение системы уравнений (8) аналогично (7), величина h_2 выбирается из соображений получения максимальной светосилы в системе.

Схемное решение объектива с $\alpha_3 = 3,9142$ дает следующие численные относительные значения параметров: $r_1 = 0,1516$, $r_2 = 0,4677$, $r_3 = -0,3382$, $r_4 = 0,6667$, $d_1 = -0,2274$, $d_2 = 1,2774$, $d_3 = -1$, $h_1 = 1$, $h_2 = 4,0$, $h_3 = -1$, $h_4 = 1$.

Анализ конструктивных параметров. Оценка виньетирования

Результаты расчета деформаций зеркал σ_s с использованием формул (1) и (2) приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Расчетные значения деформаций σ_s зеркальных поверхностей

	43-2Б-III				43-2Б-IV			
Деформации	I	II	III	IV	I	II	III	IV
σ_1	0	0,8632	-0,366	-1,1537	0	2,2693	-0,9925	-1,2235
σ_2	0,1411	0	-0,0781	-0,1273	-0,2046	0	-0,2947	-0,3280
σ_3	-13,4832	-0,2358	0	-1,5579	2,4889	8,1473	0	-0,9213
σ_4	-337,948	-30,4168	-11,7562	0	-1,3147	-3,4963	0,1329	0

Из приведенных значений следует, что в объективах двух типов наиболее целесообразным с точки зрения технологии является IV вариант расчета с четвертым зеркалом.

В табл. 2 приведены конструктивные данные двух расчетных вариантов зеркальных анастигматов. Объектив III типа рассчитан для относительного отверстия $D/f' = 1:3$, углового поля $2\omega = 7^\circ$, а для IV типа – $D/f' = 1:5$, $2\omega = 4^\circ$.

Коэффициент центрального экранирования определяется по формуле:

$$\eta = \frac{h_1}{h_3 - \alpha_3 d_3} \quad (9)$$

и равен $\eta = 0,42$ для рассчитанного варианта 43-2Б-III.

Зависимость коэффициента экранирования от величины h_2 представлена на рис. 2; с увеличением h_2 коэффициент η несколько уменьшается. В объективе IV типа коэффициент η несколько меньше и равен $\eta = 0,3431$. В рассчитанных

об'єктивах рассмотрены меры по защите плоскости изображения от постороннего света введением специальных защитных бленд в конструкцию оптики. Первая защитная бленда M устанавливается в центральной отверстии второго зеркала, а вторая бленда N крепится на оправе третьего зеркала.

Таблица 2 - Конструктивные параметры двух типов объективов ($f'=200\text{мм}$)

НОМЕР ПОВЕРХНОСТ И	ТИП ОБЪЕКТИВА	R , мм	D , мм	ФОРМА ПОВЕРХНОСТЕЙ ЗЕРКАЛ
1	43-2Б-III	57,48	-86,20	ГИПЕРБОЛОИД
	43-2Б-IV	30,32	-45,49	
2	43-2Б-III	154,8	294,2	ЭЛЛИПСОИД
	43-2Б-IV	93,55	255,49	
3	43-2Б-III	-118,48	-200	ГИПЕРБОЛОИД
	43-2Б-IV	-67,64	-200	ЭЛЛИПСОИД
4	43-2Б-III	400,0	-	СФЕРА
	43-2Б-IV	133,33	-	

Размеры бленд (мм) в рассчитанных вариантах следующие:

- 43-2Б-III ($h_M = 34,0$, $l_M = 48,0$, $h_N = 35,7$, $l_N = 135,0$);
- 43-2Б-IV ($h_M = 20,0$, $l_M = 17,32$, $h_N = 21,18$, $l_N = 101,18$).

Максимальное виньетирование не превышает 40 % по всему полю изображения.

Выводы

1. Окончательные варианты объективов, которые могут быть в дальнейшем адаптированы к промышленному применению, получены в результате коррекции аберраций высших порядков при учете срезания наклонных пучков оправами и отверстиями в зеркалах, а также блендами.

2. В объективе 43-2Б-III кружок рассеяния для осевой точки изображения составляет величину порядка 0,02 мм, максимальный размер фигуры рассеяния на краю поля около 0,04 мм. Система обладает малыми остаточными аберрациями астигматизма и кривизны изображения $Z'_M = Z'_S = -0,0002$ мм для края поля изображения. Максимальная величина волновой аберрации составляет величину $N = -0,16\lambda$.

3. Для объектива IV типа максимальный размер фигуры рассеяния по полю изображения с учетом срезания крайних лучей наклонных пучков составляет величину порядка 0,045 мм. Волновые аберрации в объективе имеют значения порядка $0,05\lambda$ для осевой точки изображения.

4. Малые остаточные аберрации и наличие высокой разрешающей способности открывают широкие возможности по применению объективов.

Они могут использоваться в оптических приборах, работающих в широкой области спектра: в системах спутникового сканирования (фотографирования) земной поверхности и в системах теплового сканирования. Спектральный диапазон применения ограничивается областью спектральной чувствительности фотоприемника и областью работы отражающих покрытий.

Литература

1. Meinel A., Meinel M. Two-stage optics.//Optical Engineering – 1992. -Vol.31.N.11. – P.2271–2279.
2. Подоба В.И., Лебедева Г.И., Еськов Д.Н. Особенности приемного оптического телескопа для лидара космического базирования. // Известия вузов. Приборостроение. – 2002. – Т. 45, №2. – С.28-23.
3. Артюхина Н.К., Шкадаревич А.П. Классификация четырехзеркальных анастигматов с двойным зеркалом.//Доклады НАН РБ. 2005, т.49, №1, С.43-46.
4. Артюхина Н.К., Василенок К.К., Крумач В.И. Зеркальный объектив с планастигматической коррекцией // Известия Белорусской инженерной академии. - 2005. - №1(19). - С. 30-34.
5. Артюхина Н.К., Шкадаревич А.П. Зеркальная регистрирующая система с увеличенным полем зрения // Инженерно-физический журнал. - 2005. - Т.78, № 6. - С.178-183.
6. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. – Л.: Наука, 1968.- 310 с.

Артюхина Н.К. Анастигмати з подвійним дзеркалом, які мають дійсне проміжне зображення. Розглянуті чотиридзеркальні анастигмати з плоским полем, в котрих два дзеркала поєднані у моноблок. Надан розрахунок конструктивних параметрів, досліджене питання захисту площини зображення від стороннього світла. Об'єктиви можуть використовуватись у космічній оптиці та оптичних приладах, які працюють в УФ та ІЧ діапазонах спектру	Artioukhina N. The anastigmats with catoptric lens forming intermediate image. The four mirrors plane - anastigmats consisting the first and fourth surfaces be combined are considered. The calculation of design factors has been done, the problem of image plane protection was investigated. The objectives are useful for space optics and optical devices using UV and IR spectral range research.
---	--

*Надійшла до редакції
25 липня 2007 року*