

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 535.317

ДВУХЗЕРКАЛЬНИЙ СВЕТОСИЛЬНИЙ ЗАФОКАЛЬНИЙ ОБ'ЄКТИВ

¹⁾Артюхина Н. К., ¹⁾Марчик В. А., ^{1,2)}Самбрано Л. Ф.

¹⁾Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь,

²⁾Universidad de Los Andes, ULA, Mérida, Venezuela

E-mail: art49@mail.ru

Представлены схема и расчет зафокального объектива из двух зеркал. Установлены параметры апланатической коррекции. Дана сводка основных параметров новой композиции апланата с плоским полем изображения. Разработанная базовая модель развивает расчетно-методическую базу оплотехники.

Ключевые слова: оплотехника, зеркальные системы, коррекция аберраций, оптимизация, расчет оптических схем, сводка основных параметров системы, качество изображения.

Введение

Двухзеркальные системы имеют несложную и компактную конструкцию, широко используются как в наземных, так и в космических оптических приборах. В формировании изображения участвуют два зеркала: главное M_1 и вторичное M_2 [1]. Зеркало M_1 создает изображение в своем действительном или мнимом фокусе F_1' , зеркало M_2 является системой переноса изображения в эквивалентный фокус системы $F_{\text{ЭКВ}}$.

Недостатками двухзеркальных систем являются сравнительно большие полевые аберрации, возникающие из-за малого числа коррекционных параметров. Двухзеркальные системы классифицируют по:

- степени коррекции аберраций (классические, апланаты, анастигматы);
- положению зеркала M_2 относительно F_1' : предфокальные, зафокальные.

Установим классификационные параметры ε и N [1].

Параметр N – характеристика изменения сходимости пучка после зеркала M_2 – коэффициент масштабирования при пересчете объективов, определяемый равенством $|N| = A_{\text{ЭКВ}} / A_1 = |f_1' / f'_{\text{ЭКВ}}|$, где $A_{\text{ЭКВ}}$ и A_1 – относительные отверстия всей зеркальной системы и зеркала M_1 . Зеркало M_2 уменьшает сходимость пучка, когда $|N| < 1$, удлиняя фокусное расстояние $f'_{\text{ЭКВ}}$ (удлиняющие схемы); при $|N| > 1$ сходимость увеличивается, уменьшая $f'_{\text{ЭКВ}}$ (укорачивающие схемы).

Параметр ε – линейный коэффициент центрального экранирования (зеркала M_1 с диаметром D_1 зеркалом M_2 с диаметром D_2), рассчитываемый по формуле $|\varepsilon| = D_2 / D_1$. Зафокальные системы определим областью $-1 < \varepsilon < 0$, когда зеркало M_2 находится за фокусом F_1' главного M_1 .

Общую систематизацию двухзеркальных схем выполнил Э. Линфут (E. Linfoot) [2]. Практическую применимость зафокальных схем открыл Максудов Д. Д. [3] (некоторые варианты таких систем нашли применение в спектрографах, работающих в УФ и ИК областях спектра, при относительном отверстии порядка 1:3,2 [4]). Созданы новые композиции двухзеркальных систем [5-7] с расширенными возможностями.

Цель работы

Цель настоящей работы – дальнейшее исследование зафокальных схем с апланатической коррекцией и развитие расчетно-методической базы для моделирования зафокальных композиций из двух зеркал.

Описание схемы и расчет параметров

Зафокальные объективы состоят из двух вогнутых зеркал; промежуточное изображение формируется в фокальной плоскости первого зеркала. Рассмотрим схему с малым главным и большим вторичным зеркалами.

Определим условия нормировки для первого парааксиального луча, идущего из осевой точки предмета на край входного зрачка, совпадающим с главным зеркалом:

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 < 0, \alpha_3 = -1, h_1 = 1.0, h_2 < -1. \quad (1)$$

В результате расчета углов α_s и высот h_s получим сводку формул для расчета радиусов зеркальных поверхностей r_s и осевого расстояния d :

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= \frac{2}{\alpha_2}, \quad d = \frac{1-h_2}{\alpha_2}, \\ r_2 &= -\frac{2h_2}{1-\alpha_2} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

В качестве свободного коррекционного параметра целесообразно использовать величину α_2 , которая влияет на конструктивное решение системы. В результате проведенного исследования возможных значений угла α_2 получено пять вариантов схемных решений зафокальных объективов с малым главным и большим вторичным зеркалами:

$$\alpha_2 > -1; \quad \alpha_2 = -1; \quad -1,618034 < \alpha_2 < -1;$$

$$\alpha_2 = -1,618034; \quad \alpha_2 < -1,618034.$$

Некоторые из этих композиций показаны на рис. 1. Очевидно, что наиболее конструктивным является последний вариант, обеспечивающий вынос плоскости изображения за пределы объектива.

Рассмотрим вариант, когда зеркала имеют равные по абсолютной величине радиусы, т.е. $|r_1| = |r_2|$.

Учитывая, что $r_1 = -r_2$, получим формулы для параметрического расчета:

$$h_2 = \frac{1-\alpha_2}{\alpha_2}, \quad \text{тогда } d = \frac{2\alpha_2 - 1}{\alpha_2^2}.$$

Конструктивные параметры трех композиций в относительных величинах при заданных условиях нормировки (1) приведены в табл. 1.

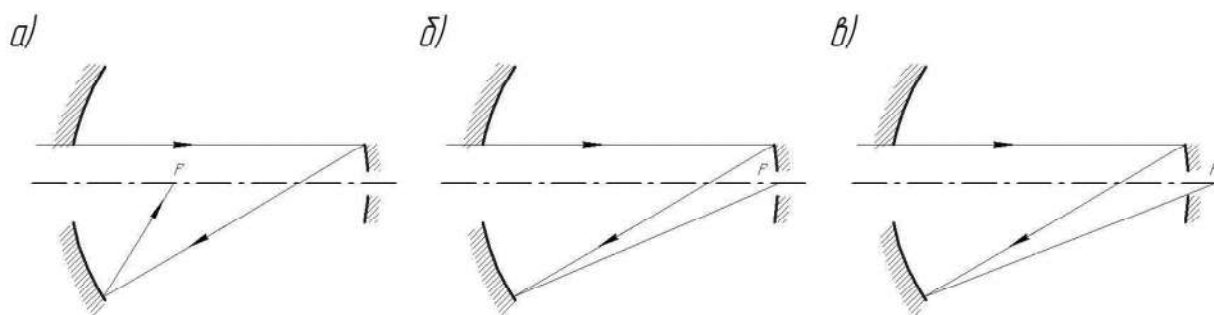


Рис. 1. Схемные решения зафокальных объективов с малым главным и большим вторичным зеркалами:

а). $\alpha_2 > -1$; б). $\alpha_2 = -1,618034$; в). $\alpha_2 < -1,618034$.

Таблица 1. Конструктивные параметры зафокальных объективов с малым главным и большим вторичным зеркалами (в относительных величинах)

№ п/п	α_2	$r_1 = -r_2$	h_2	d	σ_1	σ_2
1	-1,000	-2,0000	-2,0000	-3,0000	0,33300	-0,08333
2	-1,200	-1,6670	-1,8330	-2,3611	-0,10131	-0,08782
3	-1,700	-1,1765	-1,5882	-1,5225	-0,57534	-0,13395

Исследование аберраций

Для исправления двух основных монохроматических аберраций: сферической и комы необходимо решить систему уравнений, связывающих аберрационные коэффициенты с конструктивными параметрами.

$$B_0 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=2} h_s Q_s = 0$$

$$K_0 = -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=2} W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=2} h_s Q_s S_s = 0$$

Для вспомогательных аберрационных величин системы из двух зеркал получим формулы:

$$W_1 = \frac{\alpha_2^2}{2}, \quad W_2 = \frac{1-\alpha_2^2}{2}, \quad S_2 = -\frac{d}{h_2},$$

$$Q_1 = -\frac{\alpha_2^3}{4}(\sigma_1 + 1), \quad Q_2 = -\frac{(1-\alpha_2)^3}{4} \left(\sigma_2 + \frac{(1+\alpha_2)^2}{(1-\alpha_2)^2} \right).$$

Коррекционные параметры $\sigma_s = -e^2$ определяют квадрат эксцентриситета меридиональных кривых поверхностей зеркал второго порядка.

Таким образом, для выполнения апланатической коррекции необходимы условия:

$$\left. \begin{aligned} B_o &= \frac{1}{2}(Q_1 + h_2 Q_2) = 0, \\ K_o &= -\frac{1}{2}(W_1 + W_2) + \frac{1}{2}h_2 S_2 Q_2 = 0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Решениями системы уравнений (3) являются выражения для расчета деформаций σ_1 и σ_2 :

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 &= -\frac{2h_2}{d\alpha_2^3} - 1; \\ \sigma_2 &= \frac{2}{d(1-\alpha_2)^3} - \frac{(1+\alpha_2)^2}{(1-\alpha_2)^2}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Анализ результатов расчета

Проведены компьютерные расчеты зафокальных объективов, когда два зеркала имеют равные по абсолютной величине радиусы, с использованием формул (2), (3), (4).

В качестве базового модуля принят вариант 3 (табл. 1) – светосильный двухзеркальный объектив с оптическими характеристиками:

$$f' = 50 \text{ мм}; D/f' = 1 : 1,5; 2\omega = 4^\circ; \varepsilon = 0,5.$$

Зафокальный объектив состоит из главного малого и второго большого вогнутых зеркал с равными по абсолютной величине радиусами кривизны. Вторичное зеркало имеет центральное отверстие для прохождения светового пучка лучей. Конструктивные параметры объектива: радиусы $r_1^* = -58,825 \text{ мм}$; $r_2^{**} = 58,825 \text{ мм}$; осевое расстояние $d_1 = -152,25 \text{ мм}$. Зеркала асферические – эллипсоиды.

Проведены компьютерные расчеты в программных средах Zemax и Opal. Результаты расчета даны в таблице 2 и на рис. 2.

Для осевой точки изображения в табл. 2 даны: $\Delta S'$, $\Delta Y'$, мм – продольная и поперечная сферическая аберрация, η – неизопланатизм; для внеосевой точки $Z'_m, Z'_s, \text{мм}$ – составляющие астигматизма, $\Delta Y', \%$ – дисторсия.

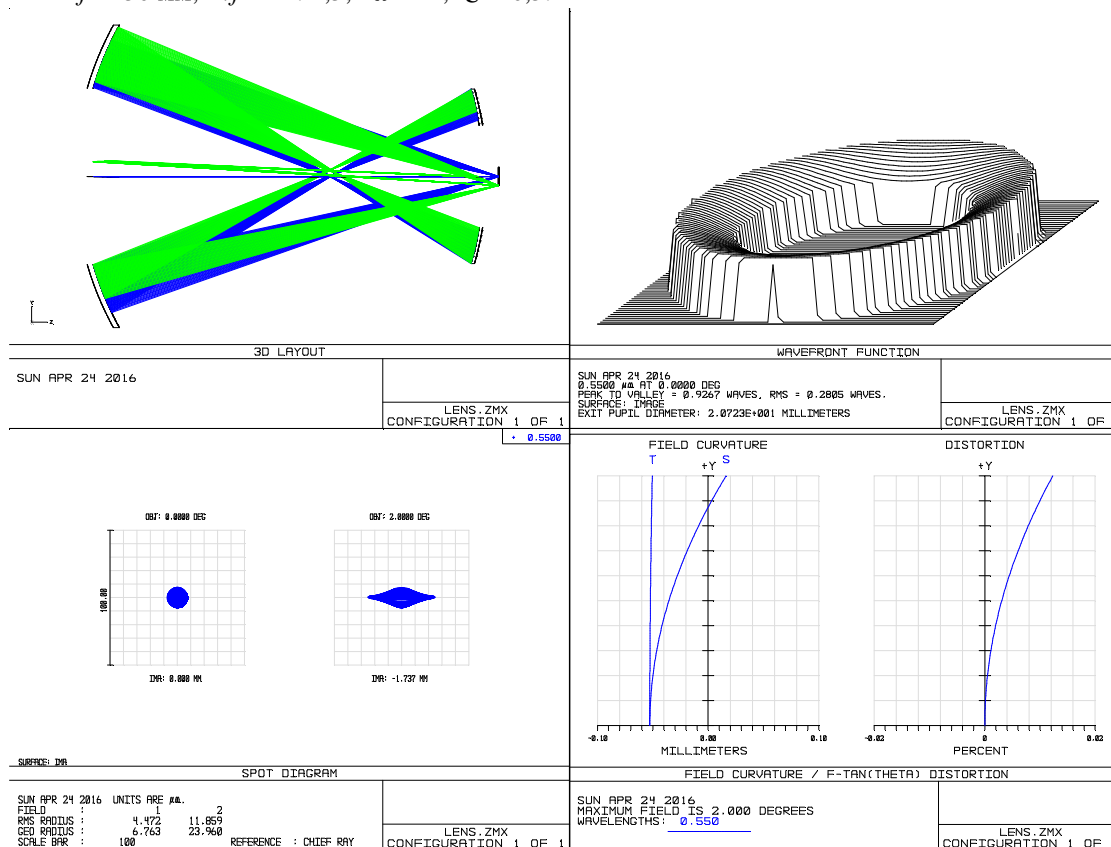


Рис. 2. Характеристики качества изображения (компьютерные расчеты Zemax)

Таблица 2. Аберрационные характеристики зафокального объектива (расчеты Opal)

m	Точка на оси			2ω	Точка вне оси		
	ΔS', мм	ΔY', мм	η, %		Z'_m, мм	Z'_s, мм	ΔY', %
0,707	0,0021	-0,0005	0,0809	2°	-0,0006	0,017	0,003
1,0	0,0087	-0,0019	0,038	4°	0,0022	0,063	0,0122

С учетом того, что оценка производственной адаптации базовой модели к промышленному использованию выполняется с учетом определения пределов допусков на конструктивные и технологические параметры, а также возможности

защиты поверхности приемника изображения от постороннего света и различных бликов были проведены расчеты асферичности зеркальных поверхностей (табл. 3).

Таблица 3. Технологические параметры асферических поверхностей

Меридиональное уравнение асферических поверхностей	Асферичность, мм	Высота Y, мм	Световой диаметр, мм
*: $y^2 = -117,65x - 0,42466x^2$	-0,006579	11,55	33
** : $y^2 = 117,65x - 0,86605x^2$	-0,014498	20,35	56

Выводы

1. Зафокальные системы с малым главным и большим вторичным зеркалами и равными по абсолютной величине радиусами являются светосильными и способны развивать значительные поля зрения. Они обеспечивают удовлетворительное качество изображения при относительных отверстиях до 1:1,2 и полях зрения до 4°.
2. Возможны варианты модулей, обеспечивающих удобное положение плоскости изображения. В некоторых вариантах, кроме апланатической коррекции практически исправлены астигматизм и кривизна изображения.
3. В зафокальных двухзеркальных системах данного типа экранирование определяется размером приемника излучения и блендой-экраном, необходимым для защиты приемника излучения от прямой засветки.
4. Рассчитанная система технологически адаптирована. В зафокальном объективе зеркала имеют эллипсоидную форму, но асферичность зеркальных поверхностей не превышает 0,01мм, что соответствует технологическим стандартам.
5. Результаты расчетов и полученные формулы могут быть использованы при

проектировании новых зеркальных систем с повышенными оптическими характеристиками.

Литература

1. Артюхина Н. К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н. К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.
2. Linfoot, E.N. Recent Advances in Optics / E.N. Linfoot. – Oxford: Clarendon press, 1955. – 287 p.
3. Максудов Д. Д. Изготовление и исследование астрономической оптики / Д. Д. Максудов. – М.: Наука, 1984. – 276 с.
4. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов на рубеже столетий / И. В. Пейсахсон // Оптический журнал. – 2002. – Т. 69, № 1. – С. 21–35.
5. Хиеп Н. К. Расчет и исследование двухзеркальных композиций оптических систем / Н. К. Хиеп, Т. И. Якушенко // Изв. вузов. Приборостроение. – 2009. – Т. 52, №3. – С.60–66.
6. Артюхина Н. К. Зафокальные и предфокальные зеркальные системы / Н. К. Артюхина, Э. П. Мицкевич // Вестник БНТУ. – 2008. – № 5. – С. 47 – 50.
7. Артюхина Н. К. Двухзеркальный анастигмат с плоским полем изображения / Н. К. Артюхина, А. В. Богатко // Вестник БНТУ. – 2006. – № 4. – С. 38 – 40.

УДК 535.317

¹⁾Н. К. Артюхина, ¹⁾В. А. Марчик, ^{1,2)}Л. Ф. Самбрано

¹⁾Білоруський національний технічний університет, м. Мінськ, Республіка Білорусь;

²⁾Universidad de Los Andes, ULA, Mérida, Venezuela

ДВОХДЗЕРКАЛЬНИЙ СВІТЛОСИЛЬНИЙ ЗАФОКАЛЬНИЙ ОБ'ЄКТИВ

Представлені схема і розрахунок зафокального об'єктиву з двох дзеркал. Встановлено параметри апланатичної корекції. Подано відомості про основні параметри нової композиції апланату з пласким полем зображення. Розроблена базова модель розвиває розрахунково-методичну базу оптотехніки.

Ключові слова: оптотехніка, дзеркальні системи, корекція аберацій, оптимізація, розрахунок оптичних схем, об'єktiv, відомості про основні параметри системи, якість зображення.

¹⁾N. K. Artioukhina, ¹⁾V. A. Marchik, ^{1,2)}Rivas Luz Fabiola Zambrano

¹⁾Belarussian National Technical University, Minsk, Republic Belarus;

²⁾University of the Andes (ULA), Mérida, Venezuela

TWO-MIRROR HIGH-APERTURE EXTRA-FOCAL LENS

A layout and the calculation of the two mirrors extra-focal lens is presented. It has installed pas parameters of aplanatic correction and given the system summary graphics of the new composition flat-field image aplanat. The developed model develops settlement and methodical base of an calculation optics.

Keywords: calculation optics, mirror systems, aberration correction, an optimization, optical design, refresh extension list, the objective, system summary graphic, image quality.

Надійшла до редакції
20 травня 2016 року

Рецензовано
03 червня 2016 року

© Артюхина Н. К., Марчик В. А., Самбрано Л. Ф., 2016

УДК 537.7

ГЕНЕРУВАННЯ ПОПЕРЕЧНИХ МОД КОГЕРЕНТНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ПАСИВНИМ РЕЗОНАТОРОМ

Тимчик Г. С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені
Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна
E-mail: deanpb@kpi.ua

У роботі отримано і досліджено апаратну функцію (АФ) інтерферометра Фабрі-Перо зі сферичними дзеркалами, що використано в якості пасивного оптичного резонатора для селекції поперечних мод вищих порядків у вихідному пучку випромінювання лазера.

Основну увагу приділено дослідженню поперечного розподілу амплітуди світлової хвилі, що пройшла через цей інтерферометр (резонатор). Внаслідок використання сферичних дзеркал операційні властивості оптичних систем когерентних спектроаналізаторів можуть бути значно розширені освітленням вхідного сигналу випромінюванням, що містить вищі моди Гаусса-Ерміта, або Гаусса-Лаггера.

Ключові слова: моди, світлова хвиля, резонатор, когерентні спектроаналізатори, інтерферометр.

Вступ

Когерентні оптичні системи (КОС) для спектрального аналізу просторових сигналів давно відомі в класичній оптиці, а широке їх застосування в радіолокації, метрології, мікробіології тощо стало можливим у зв'язку з бурхливим розвитком лазерної техніки [1, 2]. Теоретичні основи роботи спектроаналізаторів базуються на рівнянні дифракції Френеля, яке наближено описує розповсюдження світла в параксіальній області [3]. Відомо низку монографій і статей, присвячених фізичним основам роботи когерентних спектроаналізаторів [4–7]. В той же час практично відсутні дослідження і наукові публікації з розширення функціональних можливостей КОС внаслідок модулювання параметрів освітлюючого випромінювання, на що вказали автори [8]. В свою чергу, це дозволить суттєво розширити практичне застосування таких систем в сучасних надшвидкісних засобах обробки зображень.

Постановка задачі

Імпульсний відгук оптичної системи КОС

значною мірою залежить від просторового розподілу амплітуд світлової хвилі в освітлюючому пучку, а також від ширини спектра випромінювання цього пучка. При зміні просторового розподілу амплітуди світлової хвилі і ширини спектра випромінювання в освітлюючому пучку спостерігаються зміни форми імпульсного відгуку, які можуть бути використані для розширення функціональних можливостей КОС у цілому.

В загальному виді розподіл світлового поля в спектральній площині КОС подамо залежністю [1]:

$$U(x_3, y_3) = F\{U(x_1, y_1)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A(x_1, y_1) \cdot e^{i\varphi(x_1, y_1)} \cdot t_c(x_1, y_1) \cdot e^{-j2\pi(x_1 x_3 + y_1 y_3)} dx_1 dy_1, \quad (1)$$

де $A(x_1, y_1)$ – розподіл амплітуд, та $\varphi(x_1, y_1)$ – розподіл фаз світлової хвилі у вхідній площині КОС.

Для деяких практичних окремих випадків розглянемо вираз (1). Зокрема, при:

$A(x_1, y_1) = \text{const}$, $\varphi(x_1, y_1) = \text{const}$ – рівномірне освітлення плоскою хвилею;