

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 535.317

КЛАССИФИКАЦИЯ И АБЕРРАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ ЗЕРКАЛЬНЫХ АНАСТИГМАТОВ С МОНОЛИТОМ ИЗ ДВУХ ЗЕРКАЛ

Артюхина Н. К.

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Представлены композиции четырехзеркальных схем с двойным зеркалом, описаны их абберрации. Исследованы различные варианты конструктивного решения и выполнена классификация; даны параметрические характеристики модулей. Разработана систематизация поиска новых зеркальных систем, моделирование которых развивает расчетно-методическую базу оплотехники. Определена структура и содержание элементов, позволяющих повысить функциональные возможности и оптические характеристики новых оптико-электронных приборов, работающих в УФ и ИК областях спектра.

***Ключевые слова:** оплотехника, зеркальные системы, коррекция абберраций, оптимизация, обновление компьютерных программ, расчет оптических схем, анастигматический объектив, сводка основных параметров системы, качество изображения.*

Введение

Зеркальные системы исследуются и используются в астрономической оптике, оптико-электронной аппаратуре дистанционного зондирования Земли из космоса и ряде других приложений. Область применения непрерывно расширяется; им предъявляются все более высокие требования [1].

Окончательный выбор базовой схемы предполагает более детальное сравнение возможных решений по светосиле, размеру полезного поля изображения (исправленного от абберраций и защищенного от засветки), контрасту, массогабаритным характеристикам, точностным требованиям к поверхностям и их взаимному расположению. Различные концепции, связанные с проектированием зеркальных систем, освещены в работах российских и зарубежных ученых, таких как, Чуриловский В. Н., Максудов Д. Д., Русинов М. М., Михельсон Н. Н., Грамматин А. П., Зверев В. А., Пименов Ю. Д., Пуряев Д. Т., Цуканова Г. И., Korsh D. G., Meinel A. B., Siegler R. D., Sasian J. M. и др. Целый ряд проблем, касающихся габаритного и абберрационного расчета зеркальных схем требуют дальнейшего исследования; канонические схемы имеют исправленную сферическую абберрацию и кому, поле зрения которых ограничено астигматизмом [2, 3]. Увеличение числа зеркал приводит к увеличению числа коррекционных элементов для устранения абберраций с целью получения нужного качества изображения. Правильный выбор схемы с заданной областью оптических характеристик имеет определяющее значение для успешной реализации поставленной задачи.

Четырехзеркальные анастигматы светосильны и широкоугольны, могут обеспечивать коррекцию кривизны изображения, позволяют получать удачные конструкции [5, 6]. В план-анастигматах, имеющих промежуточное изображение, более технологичная форма асферических зеркал, проще решается задача защиты плоскости изображения от постороннего света. В конфигурациях многозеркальных систем, использующих концепцию двухступенчатой оптики интересны исследования с выносом зеркального полевого корректора из двух последних зеркал за пределы базовой системы, при этом схема получается компактной, что дает возможность увеличивать их диаметры и развивать поле зрения. Первое и четвертое зеркала можно выполнить в виде монолита [7, 8], что дает компактную схему, обеспечивая конструктивность системы.

Цель работы

Улучшение оптических характеристик (увеличение угловых полей, эффективных площадей входного зрачка, повышение качества изображения, расширение спектрального диапазона) требует дальнейшего развития расчетно-методологической базы моделирования зеркальных анастигматов различной степени сложности (в первую очередь, схем с количеством зеркал более трех); включая классификацию и систематизацию схем.

Цель настоящей работы – представить абберационный анализ схемотехники четырехзеркальных анастигматов с двойным зеркалом, а также их классификацию с определением параметрических характеристик.

Классификация зеркальных систем

Классификация – один из этапов проектирования оптики. Систематизация различных типов и модификаций позволяет проводить достаточно полный и глубокий анализ большого количества на первый взгляд довольно разнообразных схем и моделировать новые.

Впервые систематизацию результатов по зеркальным системам, состоящих из двух компонентов, выполнил Максудов Д. Д. [9]. В его исследованиях анализ классифицированных систем позволил открыть практическую применимость не только предфокальных, но и зафокальных апланатических систем. Классификация трехзеркальных систем представлена в работе [10]. Трехзеркальные системы обладают хорошими габаритными соотношениями и обеспечивают апланатическую коррекцию аббераций, но их недостатком является неудобное положение приемника изображения. В анастигматах из трех зеркал попытки увеличить оптические характеристики приводят к необходимости использования асферических профилей высокого порядка на всех зеркалах.

Системы с четырьмя отражениями по коррекции аббераций классифицируют как анастигматы; план-анастигматы; системы с исправленной дисторсией – ортоскопические. По схемным решениям классификацию можно осуществлять по трем направлениям:

- классические базовые системы с двухзеркальными компенсаторами;

- системи, побудовані по концепції двохступенчатої оптики;
- системи з моноблоком з двох дзеркал (двійним дзеркалом).

По розположенню дзеркал системи цілесобразно розділяти на три групи:

- системи з рознесеними вершинами дзеркал;
- трьохдзеркальні схеми з двійним відображенням від головного дзеркала або від блоку з першого і третього дзеркал з близькими по величині радіусами кривизни поверхностей;
- двохдзеркальні системи з двійним відображенням від дзеркал (вершини поверхностей четних і нечетних дзеркал зовмещені).

Аберраційний аналіз

Приведемо рівняння зв'язи коефіцієнтів монохроматических аберрацій третього порядку з конструктивними параметрами. Використовуючи нову формулу формул допоміжних величин [11]:

$$\left. \begin{aligned} P_s &= \frac{(-1)^{s+2}}{4} (\Delta \alpha_s)^2 \sum \alpha_s; \\ T_s &= \frac{(-1)^{s+2}}{4} (\sum \alpha_s)^3; \\ W_s &= \frac{1}{2} \Delta \alpha_s \sum \alpha_s = \frac{1}{2} \Delta (\alpha_s)^2 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

получим преобразованні вираження коефіцієнтів монохроматических аберрацій 3-го порядку в змінних Ланге для чисто дзеркальних систем з несферическими поверхностями:

$$\left. \begin{aligned} 2B_0 &= \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s; \\ 2K_0 &= \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s Q_s - \frac{1}{2} (1 - \alpha_1^2); \\ 2C_0 &= \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s^2 Q_s - \sum_{s=1}^{s=m} S_s \Delta (\alpha_s)^2 - \frac{\chi_{m+1}}{2R_p}; \\ D_0 - C_0 &= \frac{\chi_{m+1}}{2R_p}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

де допоміжні величини S_s і Q_s виражені рівностями $S_s = \sum_{k=1}^{k=s-1} \frac{\chi_{k+1} d_k}{h_k h_{k+1}}$;

$Q_s = T_s \sigma_s + P_s$ (все позначення см. в [11]). Величина $\chi_s = \frac{1}{n_s} = (-1)^{s+1}$.

Аналіз рівнянь (2) дозволяє зробити деякі висновки.

В двохдзеркальних системах при порівняльно несложній і компактній конструкції за рахунок введення деформацій можна откоррегировати дві аберра-

ции (сферическую и меридиональную кому). Анастигматическая коррекция может быть осуществлена, когда в абберационном расчете дополнительно к деформациям σ_1 и σ_2 используют два коррекционных параметра: соотношение оптических сил зеркал или расстояние между ними.

В многозеркальных объективах число свободных параметров значительно увеличивается, что дает возможность варьирования решениями. В трехзеркальной системе за счет введения деформаций на все зеркала обычно коррегируют три основных абберации. Если одно из зеркал сферическое, то коррекция трех аббераций становится возможной при выполнении определенной связи между парааксиальными величинами, которая может приводить к неудовлетворительному конструктивному решению. Когда габариты схемы являются важной технической характеристикой, то необходимо вводить четвертое зеркало для получения большего числа коррекционных параметров.

Нетрудно видеть, что в любых схемах, состоящих не менее чем из четырех зеркальных поверхностей, не совпадающих друг с другом, а также не являющихся изображением друг друга, представляется возможным исправить четыре абберации третьего порядка – сферическую абберацию, кому, астигматизм и дисторсию за счет придания поверхностям асферичности. Четвертой суммой D_0 , определяющей кривизну поля, можно управлять, изменяя конструктивные параметры: радиусы поверхностей и расстояния между элементами системы.

Зеркальные анастигматы с моноблоком из двух зеркал

Классификация таких систем дана в табл. 1.

Таблица 1. Возможные типы двух классов зеркальных систем с моноблоком

«4R-2b» – I класс			«4R-1b» – II класс				
Тип	Характеристики		Тип	Разновидность	Модификация	Характеристики	
I	$M > 0$	$N < 0$	I	1	A	$M > 0$	$N > 0$
					Б	$M < 0$	$N < 0$
II	$M > 0$	$N > 0$		2	A	$M > 0$	$N < 0$
					Б	$M < 0$	$N > 0$
III	$M < 0$	$N > 0$	II	1	A	$M < 0$	$N < 0$
					Б	$M > 0$	$N > 0$
IV	$M < 0$	$N < 0$		2	A	$M < 0$	$N > 0$
					Б	$M > 0$	$N < 0$

Системы I класса построены на основе обратной (inverse) системы Кассег-

рена iC , в которых диаметр второго зеркала принципиально больше диаметра входного зрачка $D_1 < D_2$; $h_2 > 1,0$ (шифр «4R-2b» определяет четыре отражения и увеличенный размер D_2). В системах II класса наибольшим диаметром обладает первое зеркало $D_1 \geq D_2$; $h_2 < 1,0$ (шифр «4R-1b»). Параметры M и N рассчитывают по формулам:

$$M = \frac{f'_{1,2}}{S_3}, \quad N = \frac{S'_3}{S_4}, \quad (3)$$

где $f'_{1,2}$ – эквивалентное фокусное расстояние iC системы; S_4 и S'_3 – отрезки, определяющие промежуточное изображение относительно третьего и четвертого зеркал (см. рис. 1, где дан схематический ход луча в системе с плоским третьим зеркалом [7]).

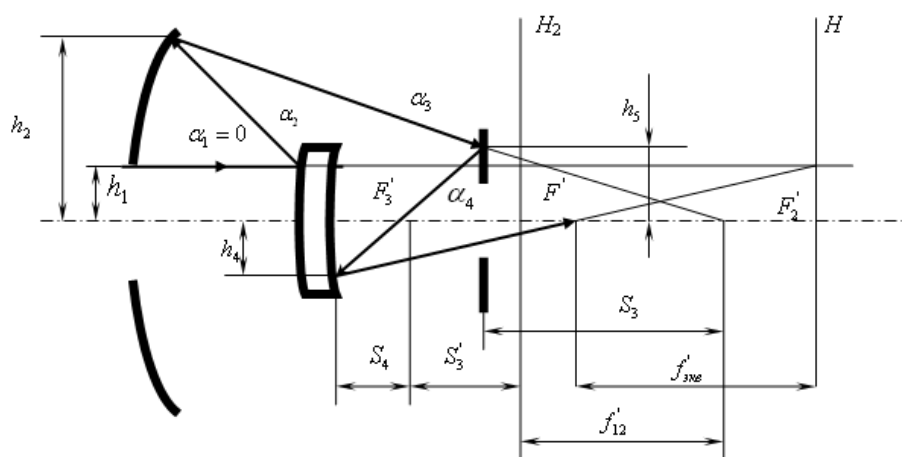


Рис. 1. Параметрическая схема объектива с моноблоком из двух зеркал

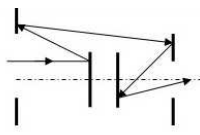
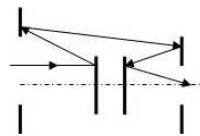
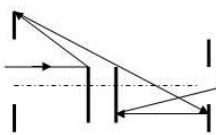
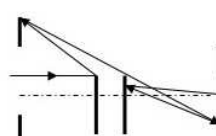
Параметр M определяет положение третьего зеркала относительно фокуса F'_2 системы, состоящей из первого и второго зеркал, обратная ему величина равна световой высоте на третьем зеркале h_3 ($M > 0$ – предфокальное положение третьего зеркала относительно F'_2 , $M < 0$ – зафокальное). Параметр N характеризует изменение сходимости лучей после третьего зеркала, т.е. определяет отношение световых высот на третьем и четвертом зеркалах.

В iC системах первое зеркало всегда выпуклое, второе – вогнутое, а третье и четвертое зеркала могут иметь поверхности любой формы, проходя planoидную. Возможны четыре типа зеркальных анастигматов в зависимости от коэффициента N , а также две модификации с афокальной iC , когда $\alpha_3 = 0$, $h_2 = h_3$. Угол α_3 всегда положителен, а α_4 либо отрицателен (IV тип), либо положителен (I тип); два раза α_4 становится равным нулю: $h_2 = h_4 > 0$ (II тип); $h_3 = h_4 < 0$ (III тип). Анализ классифицированных систем I класса позволил определить, что все расчетные модели практически реализуемы с полем зрения от $2\omega = 4^\circ$ до $2\omega = 15^\circ$ (с учетом экранирования, виньетирования и защиты плоскости изо-

браження от постороннего света). Расчеты таких объективов с третьим плоским зеркалом приводят к следующей форме зеркал: первое – гиперболическое, второе – эллиптическое, четвертое – параболическое [7].

В табл. 2 даны схемы и характеристики систем I класса.

Таблица 2. Четырехзеркальные системы с моноблоком I класса 4R-2b

Тип	Шифр	Принципиальная схема	Характеристики
I	4R-2b-I		$h_4 < 0, h_3 > 0$ $f' = \alpha_5 = -1,0$ $M > 0, N < 0$
II	4R-2b-II		$h_4 > 0, h_3 > 0$ $f' = \alpha_5 = 1,0$ $M > 0, N > 0$
III	4R-2b-III		$h_4 < 0, h_3 < 0$ $f' = \alpha_5 = -1,0$ $M < 0, N > 0$
IV	4R-2b-IV		$h_4 > 0, h_3 < 0$ $f' = \alpha_5 = 1,0$ $M < 0, N < 0$

При увеличении светового диаметра третьего зеркала выигрываем по угловому полю зрения и проигрываем в светосиле. Модификация $h_2 \neq h_3$ типа 4R-2b-I определена характеристиками $2\omega = 6^\circ$; $1 : 2-1 : 3$. При увеличении светового диаметра третьего зеркала выигрываем по угловому полю зрения и проигрываем в светосиле. Модификация $h_2 = h_3$ дает хорошее качество изображения при допустимых энергетических характеристиках для углового поля зрения $2\omega = 10^\circ$ [8], но уменьшается светосила (относительное отверстие 1:6). Ее можно развить (до значения 1:1) в модификациях без промежуточного изображения после третьего зеркала (2b-II). К примеру, система с третьим и четвертым сферическими зеркалами обеспечивает угловое поле зрения $2\omega = 15^\circ$, при этом второе зеркало – эллиптическое с небольшой деформацией от сферы, первое – сплюснутый эллипсоид третьего порядка.

Зеркальные анастигматы 2b-III и 2b-IV) менее интересны для практической реализации.

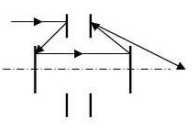
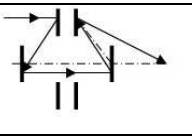
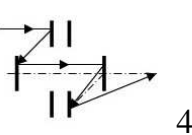
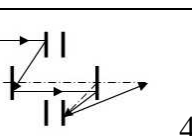
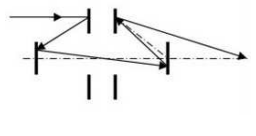
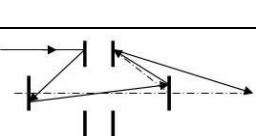
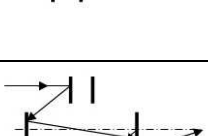
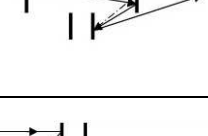
Системы II класса (табл. 3) разделены на два типа:

1) 4R-1b-I – системи с параллельным ходом лучей между вторым и третьим зеркалами: $\alpha_3 = 0, h_2 = h_3$;

2) 4R-1b-II – системы, создающие промежуточное изображение между вторым и третьим зеркалами, $\alpha_3 \neq 0$.

В зависимости от знака α_5 возможны две разновидности систем в каждом типе, а в каждой разновидности две модификации. Форма зеркал: первое и четвертое зеркала всегда вогнутые, а второе и третье зеркала меняют форму своей поверхности от вогнутой до выпуклой, проходя planoидную (плоскую).

Таблица 3. Разновидности зеркальных систем II класса 4R-1b с моноблоком

Тип	Шифр	Принципиальная схема	Характеристики	
I	4R-1b-I	 4R-1b-I/11	$h_2 > 0$ $M > 0$ $N > 0$	$\alpha_3 = 0$ $\alpha_5 = 1,0$ $f' = 1,0$ $h_4 > 0$
		 4R-1b-I/12	$h_2 < 0$ $M < 0$ $N < 0$	
		 4R-1b-I/21	$h_2 > 0$ $M > 0$ $N < 0$	$\alpha_3 = 0$ $\alpha_5 = -1,0$ $f' = -1,0$ $h_4 < 0$
		 4R-1b-I/22-	$h_2 < 0$ $M < 0$ $N > 0$	
II	4R-1b-II	 4R-1b-II/11	$h_2 > 0$ $\alpha_3 > 0$ $M < 0$ $N < 0$	$\alpha_5 = 1,0$ $f' = 1,0$ $h_4 > 0$
		 4R-1b-II/12	$h_2 < 0$ $\alpha_3 < 0$ $M > 0$ $N > 0$	
		 4R-1b-II/21	$h_2 > 0$ $\alpha_3 > 0$ $M < 0$ $N > 0$	$\alpha_5 = -1,0$ $f' = -1,0$ $h_4 < 0$
		 4R-1b-II/22	$h_2 < 0$ $\alpha_3 < 0$ $M > 0$ $N < 0$	

В зеркальных анастигматах типа 4R-1b-I абберационные возможности хорошие, но защита от постороннего света сопряжена с большими трудностями, поэтому виньетирование велико (порядка 60–70%). Среди схем типа 4R-1b-II широкое распространение получила схема (тип 4R-1b-II/21) с план-коррекцией и высоких оптических характеристиках ($2\omega = 6^\circ$ и 1 : 1). Практический интерес представляет модель с двумя сферическими зеркалами с первым эллиптическим, третьим – гиперболическим [12].

Выводы

1. Представлен анализ и классификация композиций четырехзеркальных анастигматов. Проведен поиск схем, обладающих увеличенным углом поля зрения и высокой светосилой, которые требуются при регистрации излучения слабых и достаточно протяженных объектов. В них исправлены четыре абберации III порядка и обеспечено удобное размещение плоскости изображения, которая может быть защищена от постороннего света специальными блендами.

2. Установлено, что применение четырех зеркал значительно расширяет абберационные возможности систем. В связи с ускорением их моделирования при использовании различных компьютерных программ можно разработать целый ряд усложненных схемных решений для выполнения одной и той же задачи, поэтому конструктивные условия в современных разработках выдвигаются на передний план. Компактные системы являются более технологичными, чем схемы с разнесенными вершинами (дополнительное крепление малых зеркал приводит к увеличению центрального экранирования).

3. Обосновано, что в план-анастигматах из четырех зеркал с исправленной кривизной изображения, имеющих промежуточное изображение, более технологичная форма асферических зеркал, проще решается задача защиты плоскости изображения от постороннего света.

4. Определено, что наиболее перспективны системы с моноблоком из двух зеркал, включающие трехзеркальные схемы с двойным отражением от первого зеркала, системы с совмещенными вершинами поверхностей четных и нечетных зеркал, а также схемы с монолитом из первого и четвертого зеркала.

5. Моделирование зеркальных анастигматов с монолитом из двух зеркал дает возможность разрабатывать оптико-электронные приборы с повышенными оптическими характеристиками.

Литература

1. Современные оптико-электронные комплексы как результат внедрения достижений в области оптики / М. М. Мирошников [и др.] // Оптика XXI век: материалы 6-го Межд. оптического конгресса, Санкт-Петербург, 18-21 окт. 2010: в 3 т. / ОО им. Д. С. Рождественского; редкол.: В. М. Арпишкин [и др.]. – СПб., 2010. – Ч. 1. – С. 2 – 6.
2. Smith, W. J. Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems – 3rd ed. – New York: McGraw-Hill, 2000. – 617 p.
3. Попов Г. М. Современная астрономическая оптика / Г. М. Попов. – Л.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 192 с.
4. Артюхина Н. К. Системный анализ принципов проектирования децентрированных трех

- зеркальних систем / Н. К. Артюхина, В. А. Марчик // Журнал «Вестник НТУУ «КПІ»». Серія «Приборостроение». – Киев, 2012. – Вып. 43. – С. 23 – 29.
5. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.lomo-tech.ru/photos/lomo_kosm_otkr.pdf.
 6. Лебедева Г. И. Перспективные аэрокосмические зеркальные объективы / Г. И. Лебедева, А. А. Гарбуль // Опт. журнал. – 1994. – № 8. – С. 57 – 62.
 7. Патент РБ № 7514 на полезную модель «Зеркальный объектив» / Артюхина Н. К. // Оф. бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы. – 2011. – № 4. - Заявка № и 2010 1063 - от 24.12.2010.
 8. Патент РБ № 16709 на изобретение. «Зеркальный объектив» / Артюхина Н. К. 2013 // Оф. бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы.– 2013. – № 1. Заявка № А 2011 - 0351 от 22.03.2011.
 9. Максутов Д. Д. Астрономическая оптика. – Гостехиздат, 1946.
 10. Mikhelson N. N. Three-mirror telescopes anastigmats. Optica Acta. –1982. – Vol. 29, №7. – P. 979 – 983.
 11. Артюхина Н. К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н. К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.
 12. Патент РБ № 9279 на полезную модель «Зеркальный объектив» / Артюхина Н. К., Богданович Д. Д. // Оф.бюл. Изобретения. Патентные модели. Промышленные образцы. – 2013. – № 4. - Заявка № и 2012 1135 - от 20.12.2012.

*Надійшла до редакції
12 березня 2014 року*

© Артюхина Н. К., 2014

УДК 621.384.6: 539.1.07: 539.1.047

ДОСЛІДЖЕННЯ ОБЕРНЕНОГО РОЗСІЮВАННЯ ФОТОНІВ В ЛІНІЙНОМУ ПРИСКОРЮВАЧІ SIEMENS ONCOR

¹⁾Овсієнко О. В., ²⁾Будник М. М.

¹⁾Київський національний університет ім. Тараса Шевченка, м. Київ, Україна;

²⁾Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАНУ м. Київ, Україна

В даній роботі описано методика визначення фактору оберненого розсіювання для лінійного прискорювача Siemens Oncor Impression Plus Фотони і електрони відбиті від верхньої та нижньої щелеп вторинного коліматора приводять до значного збільшення заряду іонів, що вимірюється моніторною камерою. Вихід вимірюється у водному фантомі в ізоцентрі. Фактор оберненого розсіювання вносить поправку в кінцеву дозу, тому обов'язково має визначатися при введенні прискорювача в експлуатацію. Дана методика може також бути використана для прискорювачів інших виробників.

Ключові слова: фактор оберненого розсіювання, мультипелюстковий коліматор (МПК), лінійний прискорювач електронів (ЛПЕ), моніторна камера.

Вступ та постановка завдання

Поява мультипелюсткового коліматору (МПК) у лінійному прискорювачі електронів (ЛПЕ) зробила його незамінним у променевої терапії. Проте застосування МПК потребує вимірювання великої кількості дозиметричних величин, які впливають на «первинну» дозу та збільшують час клінічної дозиметрії.