МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 535.317

МОДЕЛЬ АБЕРРАЦИОННОГО ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА РАСЧЕТА АНАСТИГМАТА С ДВОЙНЫМ ЗЕРКАЛОМ

Артюхина Н. К..
Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь
E-mail: art4913@rambler.ru

Представлена модель аберрационного параметрического алгоритма расчета анастигмата с двойным зеркалом. Установлены параметры анастигматической и план-коррекции. Даны результаты расчета конструктивных параметров новой композиции анастигмата с плоским полем изображения. Разработанная модель развивает расчетно-методическую базу оптотехники зеркальных систем.

***Ключевые слова*:** *оптотехника, зеркальные системы, коррекция аберраций, оптимизация, расчет оптических схем, анастигматический объектив, сводка основных параметров системы, качество изображения.*

Введение

Одно из направлений в оптотехнике – постоянный поиск новых схем с улучшенными характеристиками, что определено развитием новых технологий и исследований в оптической отрасли. Для решения широкого круга задач требуются зеркальные объективы, обладающие рядом преимуществ по сравнению с линзовыми. 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 [1, 2].

Интересна концепция построения конфигураций многозеркальных объективов с корректором полевых аберраций (ПК) в концепции двухступенчатой оптики (ДО) [3], которая дает много преимуществ: упрощает систему бленд; дает эффективную и удобную точку в схеме, куда можно помещать световые фильтры, фокальные корректоры, сканирующие элементы, поляризаторы, преобразователи изображения и т.д. При этом несферические поверхности зеркал обычно более технологичны, упрощается система бленд для защиты плоскости изображения от постороннего света. Вынос ПК из двух последних зеркал за пределы базовой системы дают возможность увеличивать диаметры зеркал, развивая поле зрения при допустимом виньетировании [4].

Перспективным направлением является создание композиций из трех компонентов с четырьмя отражениями. Отличительная их особенность – наличие монолита из первого и четвертого зеркал, что делает конструкцию компактной. К оптическим модулям с двойным зеркалом можно отнести апланатическую схему Чанга–Ли со сферическими зеркалами [5], рассчитанную для фокусного расстояния f'= 100 мм и относительного отверстия $D/f' = 1:2$, поле зрения которой ограничено астигматизмом (2ω=2°). Широкое распространение получил объектив «Рефлектар» ($D/f' = 1:1{,}5$) [6] с увеличенным полем $2\omega = 6°$, полученным за счет асферического профиля поверхностей высшего порядка всех зеркал. Описанные в литературе схемы не дают полного представления о возможностях систем с двойным зеркалом, использование которых позволяет создавать новые композиции [7].

Цель настоящей работы – дальнейшее исследование четырехзеркальных схем с двойным зеркалом и развитие расчетно-методической базы для моделирования новых композиций зеркальных план-анастигматов.

Описание композиции и параметрический алгоритм. Задачей параметрического расчета является создание оптического модуля в тонких компонентах. На рис. 1 представлена принципиальная схема зеркального анастигмата с четырьмя отражениями от зеркал; поверхности

зеркал обозначены главными плоскостями и указаны параметры нулевого луча (углы α_S и высоты h_S).

Конструктивные особенности композиции:

- 1-е вогнутое и 2-е выпуклое зеркала образуют базовый объектив типа Кассегрена; $f'_{\text{фок.об.}}$ – фокусное расстояние объектива (1-й ступени);

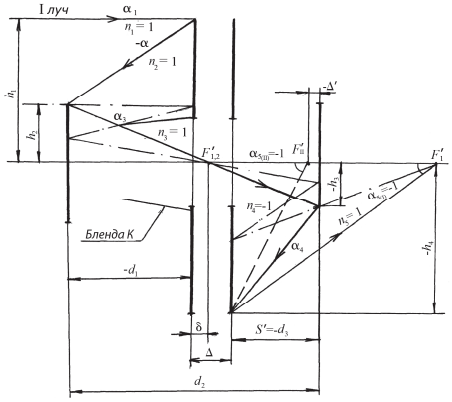

Рис.1. Параметрическая схема объектива с двойным зеркалом

- эквивалентное фокусное расстояние модуля равно $f'_{\text{сист}} = \beta f'_{\text{фок.об.}}$, где β – линейное увеличение ПК (2-й ступени);

- 1-е и 4-е вогнутые зеркала объединены в моноблок и имеют центральные отверстия для прохождения пучка лучей;

- имеется действительное промежуточное изображение по ходу луча после 2-го зеркала ($h_2 > 0$, $h_3 < 0$);

- апертурной диафрагмой является оправа двойного зеркала.

Возможны две модификации таких объективов: 1) $\alpha_4 < \alpha_5$; 2) $\alpha_4 > \alpha_5$.

Методика расчета анастигмата опирается на основные формулы алгоритма проектного расчета композиции, состоящего из последовательности этапов.

На I этапе:

- введены условия нормировки (координаты 1-го и 2-го нулевых лучей): $\alpha_1 = 0$; $h_1 = 1$; $\beta_1 = 1$; $\alpha_5 = 1$ для относительного эквивалентного фокусного расстояния $f' = 1$;

- предложены формулы расчета параметрических характеристик (относительных значений радиусов r_s и толщин d_s); составлен базовый параметрический модуль, данные которого приведены в табл. 1.

На II этапе в алгоритм параметрического расчета вводим:

1. Толщину моноблока из 1-го и 4-го зеркал в зависимости от относительного отверстия *D/f'* объектива: $\Delta = \left(\frac{1}{8} - \frac{1}{10}\right)\frac{h_1}{D} f'$;

2. Габаритные ограничения для осевых расстояний между вершинами зеркал: $d_2 = -(d_1 + d_3) + \Delta$; $d_3 = -(1 + \Delta')$, где Δ' – величина, определяющая вынос плоскости изображения во второй модификации (на рис.1 ее положение на оси обозначено F_{II}');

Таблица 1. Конструктивные параметры r_s и d_s зеркальной композиции

Номер поверхности	r_s	d_s
1	$\frac{2}{\alpha_2}$	$\frac{1-h_2}{\alpha_2}$
2	$\frac{2\left(1-\alpha_2 d_1\right)}{\alpha_2+\alpha_3}$	$\frac{h_2-h_3}{\alpha_3}$
3	$\frac{2\left(1-\alpha_2 d_1-\alpha_3 d_2\right)}{\alpha_3+\alpha_4}$	$\frac{h_3-h_4}{\alpha_4}$
4	$\frac{2\left(1-\alpha_2 d_1-\alpha_3 d_2-\alpha_4 d_2\right)}{\alpha_4+\alpha_5}$	–

3. Учет коэффициента центрального экранирования ε, который определяется лучом, проходящим по краю 2-го зеркала на высоте h_2 ($\varepsilon = h_2$).

Основные формулы для габаритного моделирования первой модификации:

$$\alpha_3 = \frac{h_2}{\delta - d_1},\quad h_3 = -h_2\alpha_3\frac{\Delta - \delta + 1}{\alpha_3 + h_2},$$

$$\alpha_4 = \alpha_3\frac{1+h_3}{h_3 + (\Delta - \delta)\alpha_3},\quad h_2 = -\frac{h_3}{1+\alpha_3}. \qquad (1)$$

Параметр α_2, определяющий оптическую силу первого зеркала, целесообразно задавать из технологических соображений перед началом расчета.

Параметр δ определяет положение плоскости промежуточного изображения. К примеру, если она совпадает с вершиной четвертой поверхности, имеем:

$$\alpha_3 = \frac{h_2\alpha_2}{\Delta\alpha_2 - (1-h_2)};\ h_3 = -h_2\alpha_2/(\Delta+1)\alpha_2 - (1-h_2);$$

$$\alpha_4 = -\frac{\Delta\alpha_2 - (1-h_2)}{\Delta\alpha_2 - (1-h_2)(1-\alpha_2)}.$$

Во второй модификации 3-е зеркало может менять свою форму, включая плоскую (планоидную). Формулы габаритного расчета получены оптимизацией параметров α_2, α_4 и h_3, выраженных через значения α_3 и h_2 при $\delta = 0$:

$$\alpha_2 = -\frac{1-h_2}{h_2}\alpha_3;\ \alpha_4 = \frac{(1+\Delta+\Delta')\alpha_3 - 1}{1+\Delta'};$$

$$h_3 = -(1+\Delta+\Delta')\alpha_3\ . \qquad (2)$$

На III этапе, учитывая условия нормировки и формулы табл.1, составлена система 4-х параметрических уравнений для аберрационных полиномов 3-го порядка (коррекция сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны изображения). Хроматические аберрации в зеркальной системе равны нулю.

Одной из задач аберрационного параметрического расчета является уменьшение числа асферических поверхностей, что улучшает технологическую адаптацию. При введенных условиях нормировки и h_4 = -1,0 система уравнений [2, с. 77]. (2.5) для план-анастигмата с двумя асферическими поверхностями описывается формулами:

$$\begin{cases} P_1 + \sum_{S=2}^{4} h_S P_S + h_2 T_2 \sigma_2 + h_3 T_3 \sigma_3 = 0, \\ -\frac{1}{2} + \sum_{S=2}^{4} h_S P_S S_S + \sum_{S=2}^{3} h_S S_S T_S \sigma_S = 0, \\ -\alpha_2 + \frac{\alpha_3 + \alpha_2}{h_2} - \frac{\alpha_4 + \alpha_3}{h_3} - \alpha_4 + 1 = 0, \\ 2\sum_{S=2}^{4} S_S W_S = \sum_{S=2}^{4} h_S S_S Q_S. \end{cases}$$

Использована новая форма формул вспомогательных величин:

$$P_S = \frac{(-1)^{s+2}}{4}(\Delta\alpha_s)^2 \sum \alpha_s \; ; \; T_s = \frac{(-1)^{s+2}}{4}\left(\sum \alpha_s\right)^3 ;$$

;

$$W_s = \frac{1}{2}\Delta\alpha_s \sum \alpha_s = \frac{1}{2}\Delta(\alpha_s)^2 \; ; S_s = \sum_{k=1}^{k=s-1} \frac{\chi_{k+1} d_k}{h_k h_{k+1}};$$

$Q_s = T_s \sigma_s + P_s$ (все обозначения см. в [2]).

Величина $\chi_S = \frac{1}{n_s} = (-1)^{s+1}$.

На IV этапе выполнен классификационный анализ, определяющий область конструктивных параметров, обеспечивающих плоское поле изображения. В области аберраций 3-го порядка кривизна изображения описывается аберрационным полиномом D_0, которым можно управлять, изменяя параметры r_s и d_s.

Предложена методика расчета, которая предполагает исследование зависимости коэффициента кривизны изображения 3-порядка для различных значений δ при выборе соответствующих величин α_2 и h_2. Практический интерес представляют системы, в которых значения α_2, δ, d_1 и d_2 приведены в табл. 2. Значения δ получены интерполяцией функции в заданном интервале.

Системы могут быть достаточно светосильными (значения углов α_s невелики), для варианта №2: $\alpha_2 = \alpha_5 = -1{,}0$; $\alpha_3 = 0{,}756315$; $\alpha_4 = -1{,}650028$.

Для второй модификации условие Петцваля (получение плоского поля изображения) выполнено при заданном значении экранирования для парамет-ров α_3 и h_3, удовлетворяющих решению квадратного уравнения

$$A\alpha_3^2 + B\alpha_3 + h_2^2 = 0,$$

где $A = (1+\Delta+\Delta')[\Delta h_2^2 + (1+\Delta')(1-3h_2+2h_2^2)]$;

$B = [(1+\Delta')(4+\Delta+\Delta') - 2\Delta]$.

Таблица 2. Варианты зеркальных план-объективов

№ вариантов	α_2	δ	d_1	d_2
1	-0,8	0,0544	-0,625	1,1020
2	-1,0	0,1611	-0,5	1,0348
3	-1,2	0,2182	-0,417	0,9775

Для объектива, имеющего плоское зеркало ($r_3 = \infty$), вид квадратного уравнения $h_2^2 + 3\alpha_3 h_2 - \alpha_3 = 0$. В алгоритме использованы формулы (2) для расчета

$$\alpha_3 = \frac{1}{2(1+\Delta')+\Delta} \; ; \; h_3 = -\frac{1+\Delta+\Delta'}{2(1+\Delta')+\Delta}.$$

Анализ результатов расчета. Используя предложенную модель аберрационного параметрического алгоритма, рассчитаны варианты анастигматов, содержащие поверхности различного асферического профиля, определяемого деформациями $\sigma_S = -e^2$, имеющие длину l=(0,8-1,25) f'. Они обладают стабильной коррекцией аберраций по полю 2ω=6°...8° (кружок рассеяния 0,01 мм в центре и не превышает 0,05 мм с небольшим фоном на краю) для f'=200мм, D/f' =1:1-1,2 при экранировании по площади 25 %.

Для базового модуля был использован вариант со вторым сферическим зеркалом, когда деформации на 1-е и 3-е зеркала перераспределены так, что 4-е зеркало выполнено сферическим. Это особенно важно для целей технологической адаптации.

В системе 1-е зеркало эллиптическое, а 3-е гиперболическое, но асферичность зеркальных поверхностей 0,01–0,015мм, что соответствует технологическим стандартам. Для защиты плоскости изображения от лучей «паразитной» засветки вводится бленда K (рис. 1). Объектив план-анастигмат предназначен для широкопольной телескопической системы астероидно-кометного мониторинга.

Выводы

1. Предложен алгоритм расчета анастигмата с двойным зеркалом в тонких компонентах. Отдельным этапом данного алгоритма является оптимизация, при которой вводятся определенные функциональные зависимости между значениями

аберраций и изменениями конструктивных параметров. Коррекционные возможности для заданных оптических характеристик определяют при постановке задачи их исследования.

2. Установлены и структурно определены инженерные составляющие алгоритма при учете оптических характеристик, назначения, конструктивных условий построения схемы (габаритные ограничения, необходимость расположения действительной плоскости выходного зрачка перед поверхностью изображения; получение промежуточного изображения, вынос изображения Δ' и др.).

3. Оценка производственной адаптации 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.

4. Представлена универсальная модель аберрационного параметрического алгоритма для расчета анастигматов с двойным зеркалом (коррекция сферической аберрации, комы и астигматизма достигается изменением формы профиля зеркальных поверхностей, определяемыми деформациями σ_s). Проведен классификационный анализ схем с целью получения плоского поля изображения.

5. Разработана новая композиция, обладающая увеличенным углом поля зрения и высокой светосилой в условиях обеспечения удобного размещения плоскости изображения; получен патент [8]. Система технологически адаптирована, имеет две сферические поверхности. Результаты расчетов и полученные формулы могут быть использованы при проектировании новых зеркальных систем с повышенными оптическими характеристиками.

Литература

1. Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.lomo-tech.ru/photos/lomo_kosm_otkr.pdf.
2. Артюхина, Н. К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н. К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.
3. Meinel, A. B. Two-stage optics / A.B. Meinel, M.P. Meinel // Optical Engineering. – 1992. – Vol. 31, No 11. – P. 2271–2279.
4. Артюхина Н. К. Классификация и аберрационный анализ зеркальных анастигматов с монолитом из двух зеркал / Н. К. Артюхина // Журнал «Вестник НТУУ «КПИ»». Серия Приборостроение. – 2014. – Вып. № 47. – С. 44 – 52.
5. Chung H. B., Lee S.S. Aplanatic four mirror system / H.B. Chung, S.S. Lee // Optical Engineering.– 1985 – Vol. 24, No 2. – P. 317 – 321.
6. Лебедева Г. И. Перспективные аэрокосмические зеркальные объективы / Г. И. Лебедева, А. А. Гарбуль // Оптический журнал. – 1994. – №8. – С. 57 – 62.
7. Зеркальный объектив. Пат. 10109 РБ, МКИ G02B 17/02, 17/06 / Н. К. Артюхина, И. Н. Батура; заявитель БНТУ. №и 2013 0918 // Оф. бюл. 2015. № 2.
8. Зеркальный объектив. Пат. 9279 РБ на полезную модель, МКИ G02B 17/02, 17/06 / Н. К. Артюхина, Д. Д. Богданович; заявитель БНТУ. // Оф. бюл. 2014. № 3.

УДК 535.317

Н. К. Артюхина
Білоруський національний технічний університет, м. Мінськ, Республіка Білорусь

МОДЕЛЬ АБЕРАЦІЙНОГО ПАРАМЕТРИЧНОГО АЛГОРИТМУ РОЗРАХУНКУ АНАСТИГМАТУ З ПОДВІЙНИМ ДЗЕРКАЛОМ

Представлено модель аберраційного параметричного алгоритму розрахунку анастигмату з подвійним дзеркалом. Встановлено параметри анастигматичної та план-корекції. Наведено результати розрахунку конструктивних параметрів нової композиції анастигмату з пласким полем зображення. Розроблена модель щодо розвитку розрахунково-методичної бази оптотехніки.

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

N. K. Artioukhina
Belarussian National Technical University. Minsk, Republic Belarus.

MODEL OF ABERRATIONAL PARAMETRICAL ALGORITHM CALCULATION OF THE ANASTIGMAT WITH THE DOUBLE MIRROR

The model of aberrational parametrical algorithm of calculation of the anastigmat with a double mirror is presented. Aberration factors of astigmatism and the plan correction are determined. The calculation results of new composition of the plane – field anastigmat design factors have been done. The developed model develops settlement and methodical base of an calculation optics.

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

Надійшла до редакції
14 січня 2016 року

Рецензовано
26 січня 2016 року

© Артюхина Н. К., 2016

УДК 621.384.3

ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ФАЗИ ТА МІНІМАЛЬНОЇ СПРИЙМАЮЧОЇ РІЗНИЦІ ТЕМПЕРАТУР

Колобродов В. Г., Луцюк М. М., Балінський Є. Г.
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна
E-mail: thermo@ukr.net

Мінімальна сприймаюча різниця температур (Minimum Temperature Difference Perceived - MTDP) новий фактор оцінки субдискретних тепловізорів, що заснований на концепції мінімальної роздільної різниці температур(Minimum Resolvable Temperature Difference – MRTD). Показано зв'язок між MRTD та MTDP. Основною величиною даної концепції є середня модуляція при оптимальній фазі (Average Modulation at Optimum Phase - AMOP). Для кожної просторової частоти існує своя оптимальна фаза. За допомогою цього критерію можна оцінити роботу тепловізора за межами частоти Найквіста. Розглянуто метод визначення оптимальної фази.

Ключові слова: *мінімальна сприймаюча різниця температур, мінімальна роздільна різниця температур, частота Найквіста, оптимальна фаза.*

Вступ

У наш час широко використовуються тепловізори з матричними приймачами випромінювання (МПВ). Загальною рисою даних тепловізорів є можливість вибірки сигналу у двох напрямках, горизонтальному та вертикальному. Такі тепловізори є субдискретними. Саме тому зараз дуже актуальним є питання про оцінку ефективності роботи таких тепловізорів.

Існує декілька підходів оцінки субдискретних тепловізорів. Наприклад, для моделі FLIR92 був обраний підхід, де основним оціночним фактором була мінімальна роздільна різниця температур (MRTD). Недоліком даного підходу, було те, що MRTD обмежується частотою Найквіста [1].

Також, нещодавно, був запропонований ще один підхід, а саме модуляційна передавальна функція (МПФ) стисненої моделі, яка використовує теоретичну систему МПФ. Такий підхід призводив до розмивання зображення, що здійснювалося за рахунок дискретизації.

У даній статті розглядається новий фактор оцінки ефективності субдискретних тепловізорів – мінімальна сприймаюча різниця температур (MTDP) [2]. Основна мета дослідження полягає в можливості оцінювання роботи субдискретних тепловізорів за межами частоти Найквіста. Даний підхід не повинен далеко відхилятися від концепції MRTD. Саме зв'язок між цими двома факторами і буде показаний у даній статті.

Оцінювання ефективності роботи тепловізора вимагає теоретичних передбачень та фактичних результатів. Тому накладається ще одна потреба – можливість проводити вимірювання MTDP в лабораторних умовах.

Постановка задачі

Метою даної статті є розробка моделі визначення оптимальної фази при вимірюванні мінімальної сприймаючої різниці температур.

Основна частина

Як було зазначено вище, мінімальна сприймаюча різниця температур – це новий фактор оцінки ефективності субдискретних тепловізорів, основна мета якого усунення недоліків концепції мінімальної роздільної різниці температур.

Одним з основних недоліків MRTD є неможливість оцінки роботи субдискретного