

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-621-624

АФОКАЛЬНЫЙ КОМПЕНСАТОР АБЕРРАЦИЙ

Л. Н. АНДРЕЕВ, Г. С. ДЕГТЯРЕВА

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: galchonok_deg@mail.ru

Рассмотрены принципиальная оптическая схема и коррекционные свойства афокального компенсатора aberrаций, состоящего из двух одинаковых телескопических линз. Приведен метод расчета афокального компенсатора на основе теории aberrаций третьего порядка. Отмечены преимущества компенсатора, заключающиеся в том, что он не сокращает задний фокальный отрезок оптической системы и не влияет на оптическую силу системы. Приводится численный пример расчета двухлинзового объектива с афокальным компенсатором.

Ключевые слова: компенсатор, aberrации, астигматизм, кривизна поверхности, сферическая aberrация, хроматизм положения.

При расчете оптических систем иногда возникает необходимость коррекции какой-либо одной aberrации, в то время как остальные aberrации удовлетворяют критериям качества изображения. Например, компенсаторы aberrаций используются при расчете зеркальных или зеркально-линзовых объективов, когда возникает необходимость коррекции сферической aberrации, при расчете объективов микроскопа с плоским полем, если возникают трудности с исправлением кривизны поверхности, или для выполнения ахроматизации оптических систем. Целью настоящей работы являлся расчет компенсатора, позволяющего исправлять одну или несколько aberrаций, не влияя на коррекцию других, уже исправленных.

Разработанный афокальный компенсатор aberrаций представляет собой оптическую систему, включающую две одинаковые телескопические линзы 1 и 3, симметрично расположенные относительно диафрагмы 2, установленной между ними (см. рисунок) [1].

Условия образования афокального компенсатора могут быть описаны следующим образом:

$$r_1 = -r_4; \quad r_2 = -r_3; \quad d_1 = d_3, \quad (1)$$

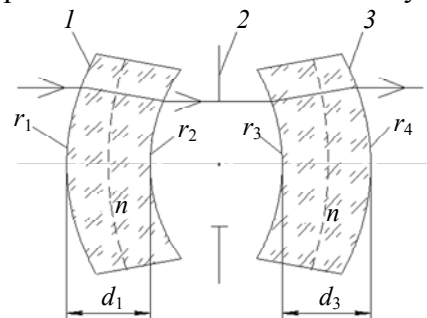
где r_1 — r_4 — радиусы кривизны поверхностей компенсатора, d_1 и d_3 — толщина первой и второй линзы.

Связь конструктивных элементов телескопической линзы описана в работах [2—4]:

$$r_1 = r_2 + \frac{n-1}{n}d, \quad (2)$$

n — показатель преломления оптического материала линзы, $d = d_1 = d_3$.

Выражение, описывающее сумму Зейделя S_4 , определяющую кривизну поверхности изображения телескопической линзы, приведено в работе [2]:



$$S_4 = -\sum_1^2 \frac{\Delta \frac{1}{n}}{r} = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3)$$

Поскольку компенсатор содержит две телескопические линзы, выражение, описывающее сумму Зейделя, представим следующим образом:

$$S_4 = 2 \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (4)$$

В предложенном компенсаторе коэффициент S_3 , определяющий астигматизм третьего порядка, имеет отрицательный знак, он линейно зависит от изменения воздушного промежутка d_2 .

Коэффициенты S_2 , S_5 , $S_{2\text{хр}}$, определяющие кому, дисторсию и хроматизм увеличения третьего порядка, равны нулю вследствие симметрии оптической схемы компенсатора.

Следует заметить, что коэффициенты S_1 и $S_{1\text{хр}}$, определяющие сферическую aberrацию и хроматизм положения в афокальном компенсаторе [1], не равны нулю. Поэтому для устранения сферической aberrации следует наружные выпуклые сферические поверхности в обеих телескопических линзах заменить на асферические второго порядка, описанные уравнением

$$y^2 = 2r_0z + (1 - e^2)z^2,$$

где r_0 — радиус в вершине асферической поверхности, e^2 — квадрат эксцентриситета асферической поверхности [5]. Путем интерполяции величины e^2 обеспечивается необходимая коррекция сферической aberrации.

Для коррекции хроматической aberrации положения одиночные телескопические линзы следует заменить на двусклеенные из „хроматической“ пары стекол, у которых показатели преломления для средней длины волны близки, а коэффициенты средней дисперсии различны. Путем интерполяции радиусов кривизны „хроматической“ поверхности $r_{\text{хр}}$ выполняется коррекция.

Особенностью оптической системы этого афокального компенсатора является то, что изменение конструктивных параметров e^2 , d_2 , $r_{\text{хр}}$ обеспечивает коррекцию только одной aberrации, например, e^2 — сферической, d_2 — астигматизма, $r_{\text{хр}}$ — хроматизма положения, и не влияет на уже исправленные остальные aberrации.

Приведем пример расчета афокального компенсатора, обеспечивающего коррекцию кривизны поверхности и астигматизма двухлинзового склеенного объектива [6].

Как известно [7—11] у двухлинзовых склеенных объективов исправлены сферическая aberrация, кома и хроматизм положения, значительные астигматизм и кривизна поверхности у этих объективов ограничивают их угловое поле. Объясняется это тем, что значения коэффициентов aberrаций 3-го порядка у них следующие $S_3 = 1$ и $S_4 \approx 0,65$. Поэтому для коррекции астигматизма и кривизны поверхности необходим афокальный компенсатор, у которого $S_3 \approx -1$ и $S_4 \approx -0,65$.

С использованием формул (1), (2), (4) рассчитывается афокальный компенсатор с указанными значениями сумм Зейделя. Результаты aberrационного расчета приведены в таб. 1—4 ($\Delta s'$ и $\Delta y'$ — продольная и поперечная сферическая aberrация, η — коэффициент неизопланитизма, $s'_{F'} - s'_{C'}$ — хроматизм положения, ω — угловое поле, h — высота луча на первой

поверхности, y' — величина изображения, $z'_s - z'_m$ — астигматические отрезки, $\Delta y' / y'$ — хроматизм увеличения). В табл. 1 и 2 представлены aberrации двухлинзового объектива $f'=100$ мм; $D/f'=1:2,5$; $2\omega=2^\circ 30'$ [4]. В табл. 3 и 4 приведены aberrации двухлинзового объектива с афокальным компенсатором $f'=100$ мм; $D/f'=1:2,8$; $2\omega=25^\circ$ [5].

Таблица 1

Аберрации точки на оси

h , мм	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$s'_{F'} - s'_{C'}$, мм
20	0,20	0,12	0,025	-0,14	0,197
14,1	0,14	-0,30	-0,043	-0,006	-0,069
0	0	0	0	0	-0,25

Таблица 2

Аберрации главного луча

ω , ...°	$\Delta y'$, мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y' / y'$, %
$-1^\circ 15'$	-2,18	-0,039	-0,082	0,043	-0,002
$-53'$	-1,54	-0,019	-0,041	0,022	-0,001
0	0	0	0	0	0

Таблица 3

Аберрации точки на оси

h , мм	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$s'_{F'} - s'_{C'}$, мм
20	0,20	-0,003	-0,0006	-0,11	0,15
14,1	0,14	-0,16	-0,023	-0,07	0,002
0	0	0	0	0	-0,11

Таблица 4

Аберрации главного луча

ω , ...°	$\Delta y'$, мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y' / y'$, %
$-12^\circ 30'$	21,71	0,104	0,098	0,006	-1,9
$-8^\circ 54'$	15,50	0,037	0,125	-0,088	-0,9
0	0	0	0	0	0

После присоединения к объективу компенсатора фокусное расстояние остается прежним — $f'_0 = 99,93$ мм, также почти не изменяется значение заднего отрезка объектива ($s'_0 = 93,19$ мм, а после присоединения компенсатора $s'_0 = 93,18$ мм).

Анализ таблиц показывает, что угловое поле у двухлинзового объектива с афокальным компенсатором увеличено примерно в десять раз по сравнению с объективом без компенсатора.

В заключение следует отметить, что рассмотренный афокальный компенсатор позволяет исправить следующие aberrации объективов: сферическую, хроматизм положения, астигматизм, кривизну поверхности, благодаря чему улучшаются оптические характеристики и качество изображения.

Кроме того, расположение афокального компенсатора перед рассчитываемым объективом не влияет на его оптическую силу и не сокращает задний фокальный отрезок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 148389 РФ. Афокальный компенсатор кривизны поверхности изображения / Л. Н. Андреев, Г. С. Дегтярева. 2014. Бюл. № 34.
2. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
3. Русинов М. М. Композиция оптических систем. СПб: Либроком, 2011. 382 с.
4. Турыгин И. А. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1980. 383 с.

5. Андреев Л. Н., Ежова В. В. Прикладная теория аберраций. Ч. 2. СПб: НИУ ИТМО, 2011. 52 с.
6. Пат. 147364 РФ. Объектив / Л. Н. Андреев, Г. С. Дегтярева. 2014. Бюл. № 31.
7. Андреев Л. Н. Прикладная теория аберраций. СПб: СПб ГИТМО, 2002. 98 с.
8. Заказнов Н. П. Прикладная оптика. СПб: Лань, 2009. 320 с.
9. Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. Н. Теория оптических систем. СПб: Лань, 2008. 446 с.
10. Русинов М. М. Техническая оптика. СПб: Либроком, 2011. 487 с.
11. Русинов М. М. и др. Вычислительная оптика. Справочник. СПб: Либроком, 2009. 424 с.

Сведения об авторах

- Лев Николаевич Андреев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики
- Галина Сергеевна Дегтярева** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: galchonok_deg@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
22.04.15 г.

Ссылка для цитирования: Андреев Л. Н., Дегтярева Г. С. Афокальный компенсатор аберраций // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 621—624.

AFOCAL COMPENSATOR OF ABERRATIONS

L. N. Andreev, G. S. Degtiareva

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

E-mail: galchonok_deg@mail.ru

Optical schematic of an afocal compensator of aberrations composed of two identical telescopic lenses is described. The corrective properties of the compensator are studied. A method for calculation of the schematic based on theory of the third-order aberration theory is presented. As an advantage of the schematic, it is noted that the compensator does not cut back focal length of the optical system and does not affect the system optical power. An example is presented of calculation of the afocal compensator for correction of field aberration in two-component lens.

Keywords: compensator, aberrations, astigmatism, surface curvature, spherical aberration, longitudinal chromatic aberration.

Data on authors

- Lev N. Andreev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics
- Galina S. Degtiareva** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: galchonok_deg@mail.ru

Reference for citation: Andreev L. N., Degtiareva G. S. Afocal compensator of aberrations // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 8. P. 621—624 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-621-624