

УДК 535.317

Компенсаторы кривизны поверхности изображения и астигматизма

© 2021 г. Л. Н. Андреев, доктор техн. наук; В. В. Ежова, канд. техн. наук;
Е. А. Цыганок, канд. техн. наук; А. Д. Кожина

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: evv_foist@mail.ru, eatcyganok@itmo.ru

Поступила в редакцию 11.01.2021

DOI:10.17586/1023-5086-2021-88-04-12-16

Рассмотрены оптические схемы апланатических и афокальных компенсаторов кривизны поверхности и астигматизма. Приведена методика их расчёта и даны рекомендации их применения. Для иллюстрации приведён пример расчёта двухлинзового объектива с увеличенным полем с одним из компенсаторов.

Ключевые слова: компенсатор, кривизна поверхности, астигматизм, объектив.

Коды OCIS: 080.3620, 220.1000, 220.3620.

При проектировании объективов различного назначения с целью увеличения поля и улучшения коррекции полевых aberrаций (кривизны поверхности и астигматизма) в их оптическую схему вводятся компенсаторы.

В области Зейделя отмеченные полевые aberrации определяются коэффициентами третьего порядка S_{III} (коэффициент, определяющий астигматизм) и S_{IV} (коэффициент, определяющий кривизну поверхности) [1].

Следует заметить, что в однокомпонентных тонких оптических системах, например, двухлинзовых склеенных объективах, при условии, что входной зрачок совпадает с объективом и сферическая aberrация и кома у него исправлены ($P = W = 0$), суммы Зейделя (коэффициенты aberrаций третьего порядка) S_{III} и S_{IV} практически постоянны и равняются соответственно $S_{III} = 1$ и $S_{IV} = 0,7$ [1–3], что приводит к большим значениям астигматизма и кривизны поверхности изображения. С целью их уменьшения применяют различные компенсаторы.

С целью устранения этих aberrаций в оптическую схему объективов в его фронтальной

части (или в конце системы, или внутри неё) вводятся компенсаторы.

Особый интерес представляют апланатические компенсаторы, которые не вносят в оптическую систему объектива сферическую aberrацию и кому.

На рис. 1 приведена оптическая схема однокомпонентного апланатического компенсатора кривизны поверхности в виде мениска, образованного апланатическими поверхностями третьего рода [2, 4].

Компенсатор располагается в сходящемся пучке лучей за объективом и имеет увеличение $\beta = 1^x$.

Конструктивные параметры мениска определяются по (1):

$$\begin{aligned} r_1 &= \frac{s_1}{n+1}, \\ r_2 &= \frac{\frac{s_1-d}{n}}{n+1}, \\ s_2' &= s_1 - nd, \\ \beta &= 1, \end{aligned} \quad (1)$$

где r_1 и r_2 — радиусы кривизны мениска, d — толщина мениска, n — показатель преломления оптического материала мениска, s_1 — положение точки предмета относительно первой поверхности мениска, s_2' — положение точки изображения относительно второй поверхности мениска.

Раскрывая выражения для S_{IV} и принимая во внимание (1), получают:

$$S_{IV} = -\sum_1^2 \frac{\Delta \frac{1}{n}}{r} = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_2'} \right) = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{s_1} - \frac{1}{s_1 - nd} \right). \quad (2)$$

Из (2) находят толщину мениска d

$$d = \frac{s_1}{n} + \frac{1}{n} \left[S_{IV} \left(\frac{n}{n-1} \right) - \frac{1}{s_1} \right]. \quad (3)$$

Таким образом, задавая необходимое числовое значение S_{IV} в (3), определяют значение d и далее по (1) вычисляют r_1 и r_2 .

Для устранения хроматических aberrаций, вносимых мениском, мениск можно выполнить из «хроматических» пар стёкол, например, ТК14-Ф1 или СТК9-ТФ4. Поверхность склейки на рис. 1 обозначена пунктиром.

Следует отметить, что рассматриваемый апланатический компенсатор корригирует только кривизну поверхности объектива, так как астигматизм у него исправлен, поэтому он может быть использован при расчёте объек-

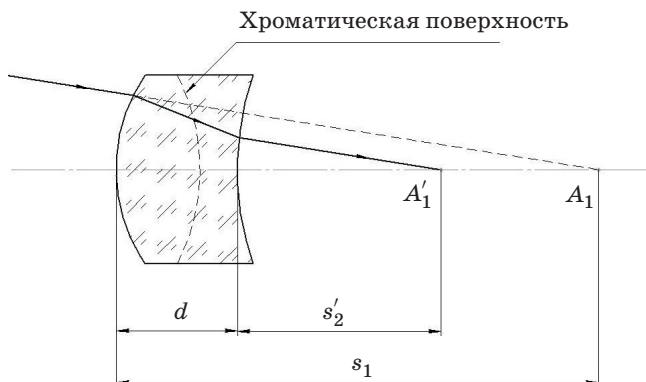


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема апланатического компенсатора кривизны поверхности в виде мениска.

тива микроскопа планохроматов и планапохроматов.

На рис. 2 приведена схема афокального компенсатора кривизны поверхности и астигматизма, включающего две одинаковые симметрично расположенные телескопические линзы 1 и 2.

В силу симметрии такой компенсатор не вносит комы, дисторсии, хроматизма увеличения [4].

Конструктивные элементы телескопической линзы связаны следующей зависимостью:

$$r_1 = r_2 + \frac{n-1}{n} d. \quad (4)$$

Величина суммы Зейделя S_{IV} равна

$$S_{IV} = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (5)$$

Для двух телескопических линз

$$S_{IV} = 2 \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = 2 \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_2 + \frac{n-1}{n} d} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (6)$$

Из (4) и (6) следует, что величина S_{IV} является функцией r , d и n . Варьируя этими величинами, добиваются необходимого результата.

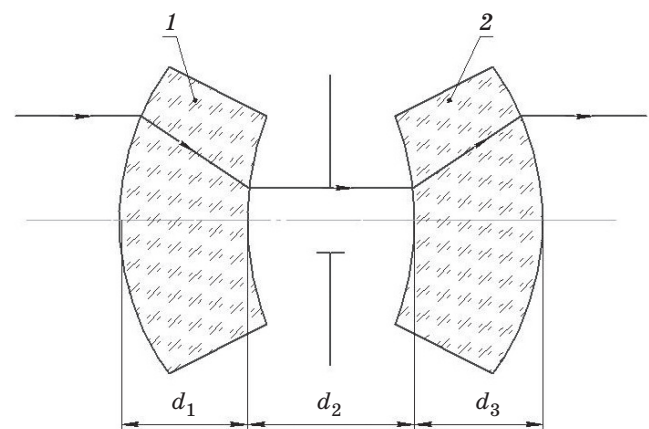


Рис. 2. Оптическая схема афокального компенсатора кривизны поверхности и астигматизма в виде двух одинаковых симметрично расположенных телескопических линз.

Следует отметить, что в таком афокальном компенсаторе присутствует сферическая аберрация, которую можно исправить либо в объективе, который будет применяться с компенсатором, либо выполнить одну из поверхностей компенсатора асферической второго порядка.

Этот компенсатор целесообразно использовать при проектировании объективов с увеличенным задним фокальным отрезком [5–7].

На рис. 3 приведена оптическая схема двухкомпонентного апланатического компенсатора кривизны поверхности и астигматизма в виде двух апланатических менисков, разделённых воздушным промежутком.

Первый апланатический мениск 1 с линейным увеличением $\beta_1 = (1/n)^x$. Его первая поверхность апланатическая третьего рода [2], для неё выполняются условия (7):

$$\begin{aligned} s &= r \left(1 + \frac{n'}{n} \right), \\ s' &= r \left(1 + \frac{n}{n'} \right), \end{aligned} \quad (7)$$

а вторая поверхность мениска второго рода, для которой $s = s' = r$.

У второго апланатического мениска 2 линейное увеличение $\beta_2 = n^x$. Первая его поверхность второго рода, а вторая — третьего рода.

Общее линейное увеличение компенсатора при условии, что мениски выполнены из одного материала, равно $\beta = 1^x$.

Конструктивные элементы компенсатора определяются по формулам (8):

$$r_1 = \frac{s_1}{n+1},$$

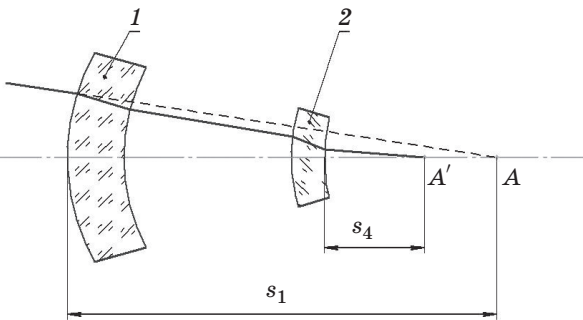


Рис. 3. Оптическая схема двухкомпонентного апланатического компенсатора кривизны поверхности и астигматизма в виде двух апланатических менисков, разделённых воздушным промежутком.

$$r_2 = s'_2 = \frac{s_1}{n} - d_1,$$

$$r_3 = s_3 = s'_2 - d_2 = \frac{s_1}{n} - d_1 - d_2,$$

$$s_4 = r_3 - d_3 = \frac{s_1}{n} - d_1 - d_2 - d_3, \quad (8)$$

$$s'_4 = s_4 n = \left(\frac{s_1}{n} - d_1 - d_2 - d_3 \right) n,$$

$$r_4 = \frac{s'_4}{n+1} = \frac{n}{n+1} \left(\frac{s_1}{n} - d_1 - d_2 - d_3 \right),$$

$$d_2 = r_2 - r_3,$$

где r_1, \dots, r_4 — радиусы поверхностей менисков, s_1 — расстояние от вершины первой поверхности до плоскости предмета, d_1 и d_3 — толщины менисков, d_2 — величина воздушного промежутка между менисками, n — показатель преломления оптического материала менисков.

Мениски расположены друг от друга на расстоянии $d = r_2 - r_3$, где r_2 — радиус кривизны второй поверхности первого мениска, а r_3 — радиус кривизны первой поверхности второго мениска.

Раскрыв выражение суммы Зейделя S_{IV} , определяющую кривизну поверхности изображения компенсатора, можно получить выражение (9):

$$\begin{aligned} S_{IV} &= - \sum \frac{\Delta}{r} = \\ &= \left[\frac{\left(\frac{1}{n} - 1 \right)}{r_1} + \frac{\left(1 - \frac{1}{n} \right)}{r_2} + \frac{\left(\frac{1}{n} - 1 \right)}{r_3} + \frac{\left(1 - \frac{1}{n} \right)}{r_4} \right] = \\ &= \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} + \frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

Варьируя величинами s_1, d_2 и материалом менисков n , добиваются необходимой величины S_{IV} .

Для иллюстрации приведены результаты расчёта светосильного объектива со следующими характеристиками: $f' = 100$ мм, $D/f' = 1/(2,5)$, $2\omega = 12^\circ$.

Оптическая схема объектива, представленная на рис. 4, состоит из двухлинзового

склеенного объектива 1 со следующими характеристиками: $f' = 100$ мм, $D/f' = 1/(2,5)$, $2\omega = 2^\circ 30'$ [2] и рассмотренного выше апланатического компенсатора кривизны поверхности и астигматизма 2 в виде двух апланатических менисков, разделённых воздушным промежуток. Первый апланатический мениск расположен вблизи объектива.

Так как первый компонент 1 на рис. 4 представляет собой квазиапланатический компонент (двухлинзовый склеенный) с исправленной сферической aberrацией и комой в области aberrаций третьего порядка, а второй компонент 2 — апланатический компенсатор кривизны поверхности и астигматизма в виде двух апланатических менисков, то в результате оптическая сила первого компонента равна по величине, но противоположна по

знаку оптической силе второго компонента. Поэтому выполняется условие $\Phi_1 = -\Phi_2$ и оба компонента апланатические, что и обеспечивает условие $S_{III} = S_{IV} = 0$ [1, 4].

Из расчёта хода первого параксиального луча через оптическую систему, состоящую

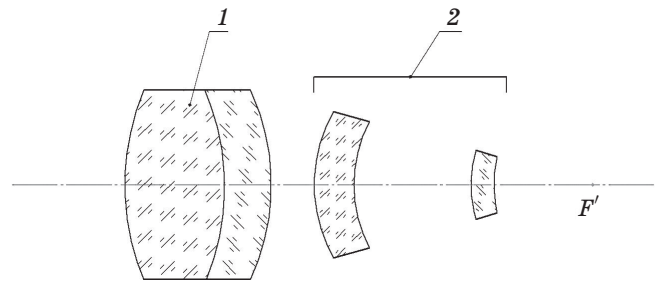


Рис. 4. Оптическая схема светосильного объектива $f' = 100$ мм, $D/f' = 1/(2,5)$, $2\omega = 12^\circ$.

Таблица 1. Абберации точки на оси двухлинзового объектива без апланатического компенсатора кривизны поверхности и астигматизма

h , мм	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %
20,00	0,061	0,012	-0,16
14,14	-0,327	-0,047	-0,02
0	0	0	0

Таблица 2. Абберации главного луча двухлинзового объектива без апланатического компенсатора кривизны поверхности и астигматизма

ω , гр. мн	y' , мм	z'_m , мм	z'_s , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y'$, %	$\Delta y'$, мм
$-2^\circ 30' 00''$	10,52	-1,86	-0,89	0,97	-0,06	-0,006
$-1^\circ 46' 05''$	7,44	-0,94	-0,45	0,49	-0,03	-0,002
$0^\circ 00' 00''$	0	0	0	0	0	0

Таблица 3. Абберации точки на оси объектива с компенсатором кривизны поверхности и астигматизма

h , мм	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %
20,00	0,062	0,013	-0,18
14,14	-0,326	-0,047	-0,03
0	0	0	0

Таблица 4. Абберации главного луча объектива с компенсатором кривизны поверхности и астигматизма

ω , гр. мн	y' , мм	z'_m , мм	z'_s , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y'$, %	$\Delta y'$, мм
$-6^\circ 00' 00''$	10,99	0,60	0,17	-0,43	4,59	0,48
$-4^\circ 15' 59''$	7,59	0,04	0,03	-0,01	2,07	0,15
$0^\circ 00' 00''$	0	0	0	0	0	0

из двух компонентов, при этих условиях вытекает

$$\begin{aligned} f'_1 = f'_2 = \frac{f'_0}{n}, \\ d = \frac{f'_0}{n^2}, \\ s'_2 = \frac{n-1}{n} f'_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где f'_0 — фокусное расстояние объектива, f'_1 и f'_2 — фокусные расстояния компонентов, d — расстояние между компонентами.

В табл. 1–4 приведены результаты аберрационного расчёта двухлинзового объектива и объектива с компенсатором кривизны поверхности и астигматизма для точки на оси и главного луча.

Из анализа табл. 1–4 видно, что в объективе с компенсатором астигматизм и кривизна поверхности существенно меньше, чем у двухлинзового объектива [2].

В заключении следует сказать, что применение рассмотренных компенсаторов при расчёте светосильных объективов позволяет увеличить угловое поле двухлинзового объектива почти в пять раз.

ЛИТЕРАТУРА

1. Слюсарев Г.Г. Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1973. 639 с.
2. Турыгин И.А. Прикладная оптика. Л.: Машиностроение, 1965. 362 с.
3. Андреев Л.Н., Ежова В.В. Прикладная теория аберраций. Ч. 1. СПб.: Университет ИТМО, 2020. 103 с.
4. Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С. Прикладная теория аберраций. Ч. 3. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 46 с.
5. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор кривизны поверхности изображения // Патент РФ на полезную модель № 148389 от 30.10.2014.
6. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Афокальный компенсатор кривизны поверхности изображения // Патент РФ на полезную модель № 156864 от 25.10.2015.
7. Андреев Л.Н., Дегтярева Г.С. Объектив // Патент РФ на полезную модель № 147364 от 06.11.2014.