

УДК 535.317

Синтез объективов с вынесенным зрачком и телецентрическим ходом лучей

© 2018 г. **Л. Н. Андреев, доктор техн. наук; В. В. Ежова, канд. техн. наук;
А. В. Бахолдин, канд. техн. наук; В. Н. Васильев, доктор техн. наук**

Университет ИТМО, Санкт-Петербург

E-mail: evv_foist@mail.ru

Поступила в редакцию 31.08.2018

DOI:10.17586/1023-5086-2018-85-12-30-34

Приведены различные оптические схемы однокомпонентных объективов с вынесенным зрачком и телецентрическим ходом луча, а также методика их расчёта на основе теории aberrаций третьего порядка. Для иллюстрации показаны результаты aberrационного расчёта объективов такого типа.

Ключевые слова: объектив с вынесенным зрачком, aberrации третьего порядка, телецентрический ход луча.

Коды OCIS: 220.4830.

Необходимость расчёта объективов с телецентрическим ходом лучей и вынесенным входным зрачком связана с разработкой контрольно-измерительных инструментов, элементной оптической базы микроскопов, различных прицелов и др. [1–3].

Объективы такого типа могут применяться в некоторых случаях в системах дополненной реальности, используемых в различных областях. Их применение в этом случае обусловлено тем, что необходимо обеспечить достаточный вынос зрачка для размещения глаза наблюдателя. Телецентрический ход луча необходим в таких системах, прежде всего в случае использования в качестве генератора символов отражательного микродисплея типа FLCOS (Ferroelectric Liquid Crystal On Silicon — дисплеи на основе жидких ферроэлектрических кристаллов на кремнии) [4, 5].

К схемам с вынесенным зрачком можно отнести как объективы для камер скрытого видеонаблюдения, так и системы очков. Таким образом, существует достаточно большое разнообразие оптических схем объективов с вынесенным зрачком, однако они имеют следующие недостатки: большое количество линз и, как следствие, высокая трудность изготовления таких объективов [см., например, 6–8]. Кроме того, они не позволяют работать с FLCOS дисплеем. Поэтому, рациональный выбор схемы и исследование её возможностей остаётся предметом современных исследований и разработок.

Синтез объективов с такими оптическими свойствами и умеренными характеристиками может быть решён на основе теории aberrаций третьего порядка [1–3, 9–11].

На рис. 1 приведена принципиальная оптическая схема объектива в виде одного тонкого компо-

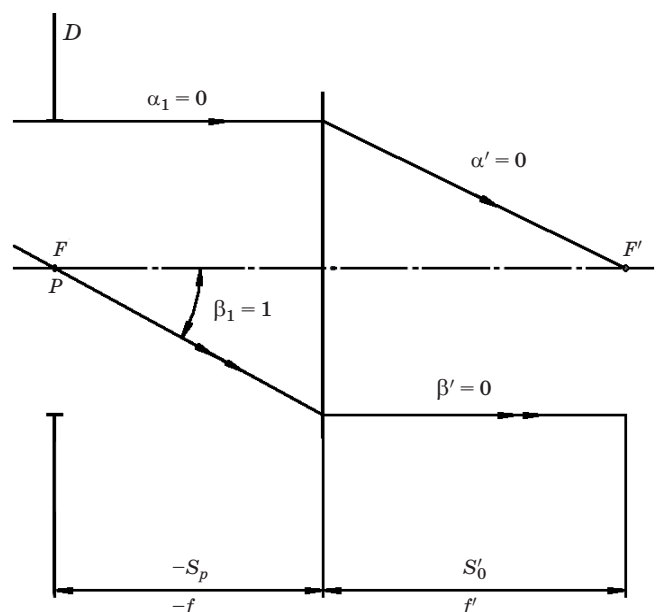


Рис. 1. Принципиальная оптическая схема однокомпонентного объектива с вынесенным зрачком и телецентрическим ходом лучей.

нента и представлен ход первого и второго параксиальных лучей.

При условии нормировки $\alpha_1 = 0$, $\alpha' = 1$, $\beta_1 = 1$, $\beta' = 0$, $h_1 = f' = 1$, $H_1 = -1$, $n = n' = 1$, коэффициенты aberrаций третьего порядка (суммы Зейделя), определяющие монохроматические aberrации, для тонкого компонента имеют вид [1, 9]

$$\begin{aligned} S_I &= P, \\ S_{II} &= -P + W, \\ S_{III} &= P - 2W + 1, \\ S_{IV} &= \pi \approx 0,7, \\ S_V &= -P + 3W - 3,7, \end{aligned} \quad (1)$$

где S_I, \dots, S_V — коэффициенты aberrаций третьего порядка, P, W, π — основные параметры, $\alpha_1, \alpha', \beta, \beta'$ — углы пересечения первого и второго параксиальных лучей с оптической осью, h, H — высоты пересечения лучей с компонентом.

Принимая во внимание (1), монохроматические aberrации третьего порядка можно определить выражением (2) [1–3]

$$\begin{aligned} \Delta s' &= -\frac{1}{2}f'tg^2\sigma'P, \\ \Delta y' &= -\frac{1}{2}f'tg^3\sigma'P, \\ \Delta y'_k &= 3\eta y' = \frac{3}{2}f'tg^2\sigma'tg\omega_1(-P + W), \\ z'_S &= \frac{1}{2}f'tg^2\omega_1(P - 2W + 1,7), \\ z'_M &= \frac{1}{2}f'tg^2\omega_1(3P - 6W + 3), \\ \Delta y'_D &= -\frac{1}{2}f'tg^3\omega_1(-P + 3W - 3,7), \end{aligned} \quad (2)$$

где $\Delta s'$, $\Delta y'$ — продольная и поперечная сферическая aberrация, $\Delta y'_k$ — кома, η — коэффициент отступления от изопланатизма, z'_S, z'_M — астigmatические отрезки, $\Delta y'_D$ — дисторсия, σ' — апертурный угол, ω_1 — полевой угол, y' — размер изображения.

Из (1) и (2) следует, что если объектив состоит из тонкого компонента, то все пять монохроматических aberrаций третьего порядка определяются двумя основными параметрами P и W .

Поэтому при расчёте объективов с угловыми полями $2\omega = 30^\circ\text{--}40^\circ$ обычно корректируют кому $\Delta y'_k$ и астigmatизм ($z'_S - z'_M$) [1–3].

Для выполнения этих требований из (2) и [1, 9] получают, что $S_{II} = 0$, $S_{III} = -0,35$.

Подставляя эти значения S_{II} и S_{III} в (1), находят, что $P = W = 1,35$.

Этим значениям основных параметров P и W соответствует тонкий компонент, состоящий из двух одинаковых симметрично расположенных

плосковыпуклых линз из оптического материала с показателем преломления $n = 1,75$ [10].

Для иллюстрации представлены результаты aberrационного расчёта объективов с вынесенным зрачком и телецентрическим ходом лучей со следующими характеристиками: $f' = 43$ мм, $D/f' = 1:3$, $2\omega = 40^\circ$, спектральная область — $\lambda_0 = 0,520$ мкм, $\lambda_1 = 0,510$ мкм, $\lambda_2 = 0,530$ мкм.

На рис. 2 приведена оптическая схема объектива в виде двух одинаковых и симметрично расположенных двухсклеенных линз.

Для коррекции хроматических aberrаций при работе в видимом спектральном диапазоне можно использовать «хроматические» пары стёкол, у которых $n_1 \approx n_2$, а $v_1 \approx v_2$.

В табл. 1 и 2 приведены остаточные aberrации объектива для $\lambda = 0,51\text{--}0,53$ мкм. При работе в видимом диапазоне монохроматические aberrации останутся практически постоянными, а хроматические aberrации можно исправить путём подбора хроматического радиуса. Следует отметить, что схема получена без использования оптимизации и при предположении бесконечно малых толщин линз.

Другой вариант построения схемы объектива на основе модульного принципа — использование афокального компенсатора хроматических aberrаций [12].

На рис. 3 приведена оптическая схема объектива, состоящего из двух тонких плосковыпуклых линз, перед которыми с целью коррекции хроматических aberrаций расположен компенсатор хроматических aberrаций в виде гиперхроматической линзы, склеенной из «хроматической» пары стёкол [11].

В табл. 3 и 4 приведены остаточные aberrации объектива.

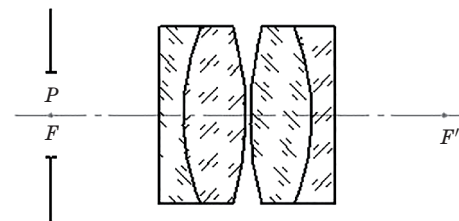


Рис. 2. Оптическая схема объектива в виде двух одинаковых и симметрично расположенных двухсклеенных линз.

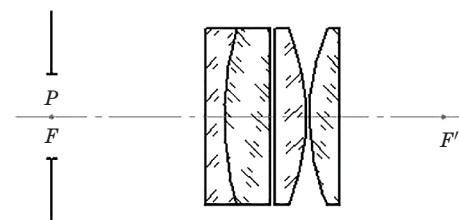


Рис. 3. Оптическая схема объектива, состоящего из двух тонких плосковыпуклых линз, с компенсатором хроматических aberrаций.

Таблица 5. Аберрации точки на оси

h , мм	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{\lambda 1} - S'_{\lambda 2}$, мм
7,00	-0,557	-0,089	0,13	-0,072
4,95	-0,266	-0,029	0,08	-0,071
0,00	0,000	0,000	0,00	-0,069

Таблица 6. Аберрации главного луча

y , град	y' , мм	z'_m , мм	z'_s , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y'_{\lambda 0}$, %	$\Delta y'_{\lambda 1 - \lambda 2}$, мм
-20°00'	15,13	0,04	-0,88	-0,92	-6,18	-0,99
-14°25'	14,25	0,34	-0,39	-0,73	3,14	-0,36
0°00'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Таблица 7. Аберрации точки на оси

h , мм	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$S'_{\lambda 1} - S'_{\lambda 2}$, мм
7,00	-0,579	-0,095	0,02	-0,017
4,95	-0,286	-0,061	0,01	-0,017
0,00	0,000	0,000	0,00	-0,017

Таблица 8. Аберрации главного луча

y , град	y' , мм	z'_m , мм	z'_s , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y'_{\lambda 0}$, %	$\Delta y'_{\lambda 1 - \lambda 2}$, мм
-20°00'	14,85	0,27	-0,95	-1,22	-6,18	-0,98
-14°25'	10,84	0,26	-0,46	-0,72	-3,11	-0,35
0°00'	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

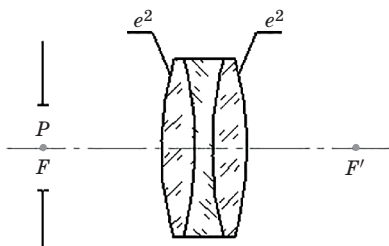


Рис. 5. Оптическая схема объектива в виде симметричного трёхлинзового компонента из «хроматической» пары оптических материалов.

В табл. 7 и 8 приведены остаточные значения аберраций объектива.

Применение в рассчитанных схемах хроматических поверхностей позволяет использовать такие схемы для достаточно широкого спектрального диапазона.

Следует отметить, что все приведённые схемы получены на основе теоретических соотношений и демонстрируют возможности аберрационной коррекции и подход к выбору стартовой оптической схемы систем такого типа.

Оценить качество полученных схем можно на основе различных критериев. Например, если предположить, что такая система должна работать в качестве коллиматорного объектива с микродисплеем размером 18×14 мм (это соответствует угловому полю $2\omega = 30^\circ$), то можно полагать достаточным, если пятно рассеяния при диаметре зрачка 4 мм для точки на оси соответствует $1'-2'$, а для края поля — до $6'$. Все представленные схемы удовлетворяют этим критериям.

Качество изображения может быть улучшено за счёт оптимизации с использованием современного программного обеспечения для проектирования оптических систем.

Таким образом, приведённые соотношения позволяют осуществить рациональный синтез стартовой схемы объективов с вынесенным зрачком и телецентрическим ходом луча на основе модульного принципа проектирования.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Госзадания (тема № 3.2506.2017/4.6).

ЛИТЕРАТУРА

1. *Слюсарев Г.Г.* Расчет оптических систем. Л.: Машиностроение, 1973. 639 с.
2. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. СПб.: Книжный дом «Либроком», 2011. 382 с.
3. *Турыгин И.А.* Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1966. 431 с.
4. *Romanova G.E., Bakhholdin A.V., Vasilyev V.N.* Optical schemes of the head-mounted displays // Proceedings of SPIE. 2017. V. 10374. P. 1037401-1–1037401-8.
5. *Бахолдин А.В., Васильев В.Н., Романова Г.Э., Гришина Н.Ю.* Схемотехника коллиматорных дисплеев дополненной реальности // Оптический журнал. 2016. Т. 83. № 10. С. 31–38.
6. *Антропова-Лившиц И.Л., Бронштейн И.Г.* Широкоугольный объектив с вынесенным входным зрачком // Патент № 2133488. 1999.
7. *Антропова-Лившиц И.Л., Бронштейн И.Г.* Телеобъектив с вынесенным входным зрачком // Патент № 2263336. 2005.
8. *Полякова И.П., Алешин И.Н., Пуйша А.Э., Осипова Л.П., Иванов Г.В.* Светосильный объектив с вынесенным входным зрачком // Патент № 2248597. 2005.
9. *Андреев Л.Н.* Прикладная теория аберраций. Учебное пособие. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 98 с.
10. *Андреев Л.Н., Ежова В.В.* Прикладная теория аберраций. Ч. 2. Учебное пособие. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 52 с.
11. *Андреев Л.Н., Ежова В.В., Дегтярева Г.С.* Прикладная теория аберраций. Ч. 3. Учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2016. 46 с.
12. *Андреев Л.Н., Ежова В.В.* Афокальные компенсаторы аберраций оптических систем // Известия вузов. Приборостроение. 2017. Т. 60. № 7. С. 660–663.