

# МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 535.015

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРИ ИЗУЧЕНИИ ДИСЦИПЛИН, СВЯЗАННЫХ С РАСЧЕТОМ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

© 2012 г. А. П. Грамматин, доктор техн. наук; Г. Э. Романова, канд. техн. наук; Е. А. Цыганок

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург

Email: romanova\_g\_e@mail.ru

Приведены описания и оптические схемы тестовых оптических систем, на примере которых изучаются свойства отдельных aberrаций третьего порядка, а также формулы, связывающие критерии качества изображения одиночных зеркал и двухлинзовых компонентов с фокусным расстоянием, диафрагменным числом и длиной волны света. Установлена линейная связь между коэффициентами уравнения поверхности зеркала и соответствующими порядками сферической aberrации.

**Ключевые слова:** компьютерное моделирование, сферическая aberrация.

Коды OCIS: 220.1010, 000.2060.

Поступила в редакцию 13.10.2011.

Благодаря общедоступности персональных компьютеров традиционная методика преподавания дисциплин, связанных с расчетом оптических систем, может быть принципиально изменена. Общепринятый вывод формул заменяется компьютерным моделированием, базирующимся на непосредственном расчете хода лучей. В результате могут быть получены эмпирические формулы, позволяющие оценить коррекционные возможности различных типов оптических систем.

Такая методика применяется при выполнении лабораторных работ, домашних заданий и выпускных квалификационных работ. Лабораторные работы, оформленные в виде учебного пособия [1], содержат три раздела:

1. Первый раздел посвящен изучению отдельных типов aberrаций третьего порядка на примерах тестовых систем, в каждой из которых имеет место одна конкретная aberrация, а остальные отсутствуют.

2. Во втором разделе устанавливают соотношения между сферической aberrацией различных порядков и смещением плоскости установки, что обеспечивает оптимальную коррекцию aberrаций.

3. В третьем разделе изложены приемы синтеза оптических систем, основанные на исполь-

зовании методов Г.Г. Слюсарева и М.М. Русинова [2, 3], а также исследования, позволяющие оценить их предельные коррекционные возможности.

Для изучения сферической aberrации третьего порядка используется зеркально-линзовая система, представленная на рис. 1. Сферические поверхности зеркала и линзы концентричны и конфокальны. В пространстве предметов и изображений имеет место телецентрический ход лучей. Роль апертурной диафрагмы выполняет оправа зеркала. Сферическая aberrация третьего порядка возникает на первой и последней плоскостях.

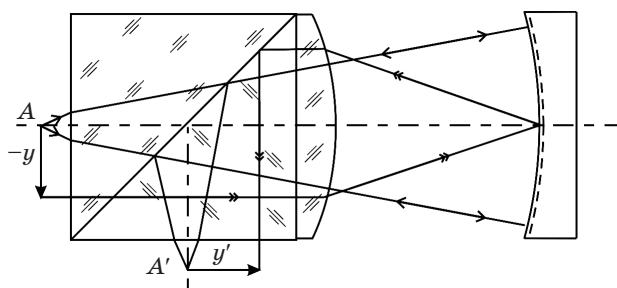


Рис. 1. Модифицированный объектив “Микронар”.

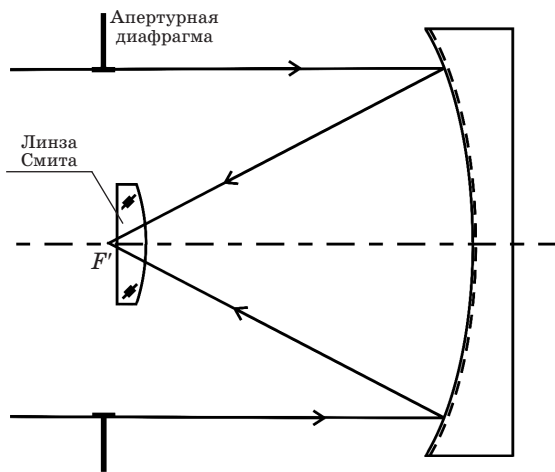


Рис. 2. Зеркальный параболоид с линзой Смита.

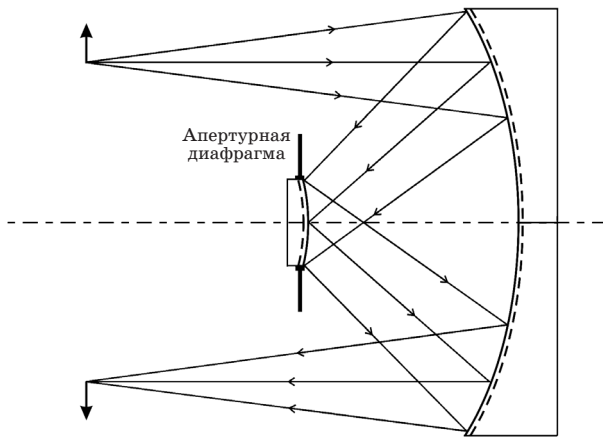


Рис. 3. Объектив "Авангард".

Изучение комы осуществляется с помощью параболоидального зеркала, снабженного для компенсации кривизны изображения линзой Смита (рис. 2). Для устранения астигматизма апертурная диафрагма расположена в фокальной плоскости зеркала.

Изучение астигматизма выполняется с помощью модифицированного трехзеркального объектива "Авангард" [4], представленного на рис. 3. В объективе "Авангард" сферические зеркала концентричны и конфокальны, первое и третье зеркала одинаковы и могут быть объединены в одну деталь. В пространстве предметов и изображений имеет место телецентрический ход лучей. Модификация, обеспечивающая появление астигматизма третьего

порядка, достигнута за счет асферизации поверхностей.

Кривизна поверхности изображения третьего порядка изучается на примере микрообъектива (рис. 4), состоящего из двух концентрических сферических зеркал [5]. В объективе исправлены сферическая aberrация, кома и астигматизм.

Для изучения хроматизма положения используется модификация объектива (рис. 1). Для устранения сферической aberrации и введения хроматической aberrации положения к входной и выходной граням присоединены две одинаковые плоскопараллельные пластины (рис. 5), выполненные из стекла с большим показателем преломления и меньшим числом Аббе, чем у призмы – куб. Компенсация сферической aberrации, возникающей на первой и последней поверхностях, достигается на второй и предпоследней плоских поверхностях.

Изучение сферохроматической aberrации, то есть разности сферических aberrаций для двух дополнительных длин волн, проводится на примере тест-системы, которая состоит из одиночной линзы с асферической поверхностью и склейки из двух линз, материалы которых специально подобраны для получения

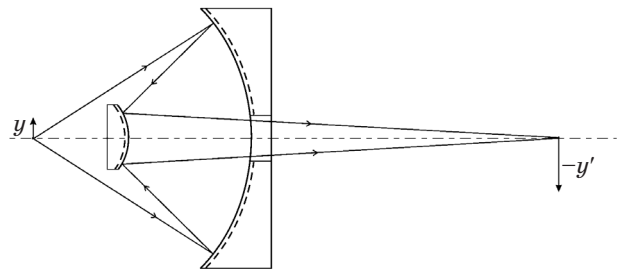


Рис. 4. Микрообъектив из двух сферических зеркал.

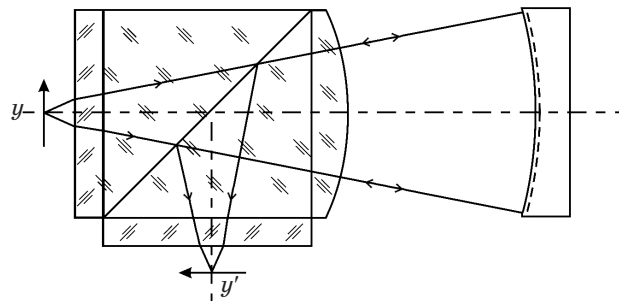


Рис. 5. Модифицированный объектив для изучения хроматизма положения.

больших значений сферохроматической аберрации (рис. 6), то есть образованными хроматическими парами стекол. Хроматизм положения в системе исправлен.

Изучение хроматизма увеличения осуществляется с помощью тест-системы, изображенной на рис. 7. Сферические поверхности линзы и зеркала концентричны и конфокальны. Апертурной диафрагмой служит оправа зеркала. В пространстве предметов и изображений имеет место телецентрический ход лучей. Верхняя и нижняя половина линзы выполнены из различных марок стекол, имеющих практически одинаковые показатели преломления для основной длины волны, но различные дисперсии (хроматические пары).

Во втором разделе на основании компьютерного моделирования установлены следующие положения:

1. Для одиночных зеркал, поверхности которых описываются уравнениями вида

$$by^2 + cx^2 - 2r_0z + a_2z^2 + a_3z^3 = 0, \quad (1)$$

где в осесимметричных поверхностях  $b = c = 1$ ,  $r_0$  – радиус при вершине поверхности, сферическая аберрация в плоскостях наилучшей установки определяется практически полностью коэффициентом  $a_2$  следующим образом

$$y' \approx 0,0039a_2f'K^{-3}, \quad (2)$$

$$w_{\text{СК}} \approx a_2f'K^{-4}\lambda^{-1}/6900, \quad (3)$$

где  $w_{\text{СК}}$  – среднеквадратическая волновая аберрация,  $K$  – диафрагменное число. Из последней формулы (3), полагая  $w_{\text{СК}} = 0,074$  (критерий Марешаля), можно получить полезное для практического использования соотношение:

$$K \geq 0,21(a_2f'\lambda^{-1})^{0,25}. \quad (4)$$

Для сферического зеркала при диафрагменных числах  $K > 2$  соотношение между сферической аберрацией пятого и третьего порядков не превышает 1%, что соизмеримо с точностью вычисления аберраций, осуществляемых с тремя значащими цифрами.

2. На примере одиночного зеркала показано, что коэффициент  $a_3$  определяет сферическую аберрацию пятого порядка и практически не влияет на аберрацию третьего порядка. Среднеквадратическая волновая аберрация  $w_{\text{СК}}$  в плоскости наилучшей установки зависит от коэффициента  $a_3$  следующим образом

$$w_{\text{СК}} \approx 0,013a_3f'K^{-6}\lambda^{-1}. \quad (5)$$

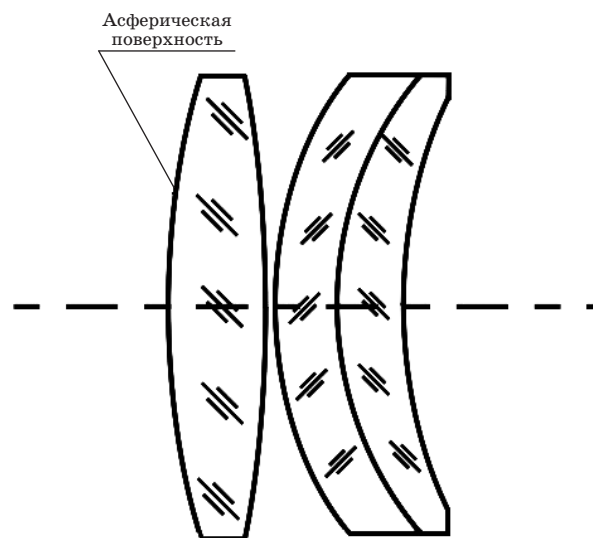


Рис. 6. Система для изучения сферохроматической аберрации.

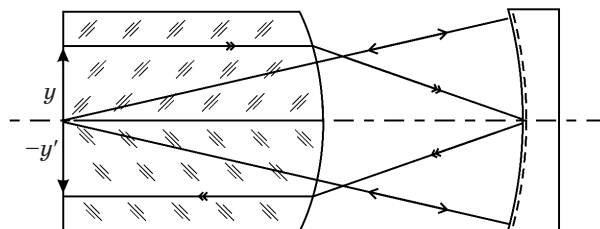


Рис. 7. Оптическая система для изучения хроматизма увеличения.

Поперечная сферическая аберрация  $y'$  в плоскости наилучшей установки зависит от коэффициента  $a_3$  следующим образом:

$$y' \approx 0,46a_3f'K^{-5}. \quad (6)$$

3. На примере одиночного зеркала установлено, что оптимальное сочетание сферической аберрации третьего порядка и неустранимой аберрации пятого порядка, обеспечивающие минимальное среднеквадратическое значение, может быть получено при условиях:

а)  $y_1 = 0$  (поперечная сферическая аберрация на краю отверстия), что достигается путем изменения аберрации третьего порядка;

б) введении плоскости установки, при которой волновая аберрация на краю отверстия составляет:

$$w'_1 = 0,6w_{V1} + w_1, \quad (7)$$

где  $w_{V1}$  – волновая сферическая аберрация шестого порядка на краю отверстия,  $w_1$  – вол-

новая сферическая aberrация на краю отверстия при поперечной (продольной) aberrации, равной нулю. Это подтверждает выводы работы [6].

4. Максимальное значение поперечной сферической aberrации при наличии aberrации третьего и пятого порядка, когда эта aberrация на краю отверстия  $H$  равна нулю, имеет место на высоте  $H_{\text{экстр}} \approx \sqrt{5/8}H$ .

5. Установлено, что оптимальная коррекция поперечной сферической aberrации, являющейся критерием качества изображения в зрительных трубах, в сочетании с введением плоскости наилучшей установки, а также при наличии неустраняемых пятых ее порядков, достигается при следующих условиях

$$y'_1 = -y'_{22} = y'_{24}, \quad (8)$$

где  $y'_{22}$  – поперечная сферическая aberrация для луча с координатой  $m = \sqrt{5/8}H$ ;  $y'_{24}$  – поперечная сферическая aberrация для луча с координатой  $m = \sqrt{1/8}H$ .

В третьем разделе изложены приемы синтеза оптических систем, основанные на использовании известных методов [2, 3, 7], а также исследования, позволяющие оценить их предельные коррекционные возможности. Установлено, что у объектива, состоящего из двух склеенных линз, при одинаковых значениях основных параметров  $P$ ,  $W$ ,  $C$  сферическая aberrация пятого порядка может различаться до трех раз. Показано, что минимальной aberrацией обладают сочетания стекол типа БФ, играющее роль крона, и ТФ. Так, при  $P \approx 0$ ,  $W \approx 0$ ,  $C \approx 0$  остаточная поперечная сферическая aberrация выражается формулой:

$$y' = (0,012 \div 0,036)f'K^{-5,23}. \quad (9)$$

Благодаря этому свойству разработана методика расчета трубок Галилея, основанная на взаимной компенсации сферической aberrации пятого порядка объектива и окуляра.

Применительно к зрительным трубам типа Кеплера с видимым увеличением  $\Gamma$  и, исходя из

допустимого углового пятна рассеяния за окуляром, равного одной угловой минуте, может быть получена полезная при габаритном расчете формула

$$K = (2,3 \div 2,8)\Gamma^{0,19}, \quad (10)$$

где  $K$  – диафрагменное число объектива.

Установлено, что объектив из трех склеенных линз не обладает какими-либо преимуществами в части aberrаций высшего порядка по сравнению с объективом, склеенным из двух линз. В объективе из двух линз с воздушным промежутком может быть полностью устранена сферическая aberrация пятого порядка. При одновременном исправлении хроматизма положения, а также при соблюдении условия изопланатизма, его коррекционные возможности ограничиваются сферической aberrацией седьмого порядка и выражаются формулой

$$y' \approx 0,025f'K^{-7,5}. \quad (11)$$

Формула (11) получена для оптимальной комбинации стекол СТК19 и ТФ10. Для других комбинаций стекол эта aberrация увеличивается в несколько раз. Аналог формулы (10) выглядит следующим образом:

$$K \geq 2,0\Gamma^{0,133}. \quad (12)$$

С использованием методик, изложенных в работах [2, 3], определены приемы расчета объектива, состоящего из двухлинзовых компонентов, разделенных воздушным промежутком и свободного от всех первичных монохроматических и хроматических aberrаций, а также объектива типа Петцваля с линзой Смита.

Путем компьютерного моделирования показана возможность исправления вторичного спектра в системах, не содержащих особых стекол и состоящих, по крайней мере, из двух тонких компонентов, разделенных воздушным промежутком, который соизмерим с фокусным расстоянием объектива, и обладающих большими значениями хроматических параметров  $C$  Г.Г. Слюсарева [8].

\* \* \* \* \*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Грамматин А.П., Романова Г.Э., Цыганок Е.А. Компьютерное моделирование при изучении дисциплин, связанных с расчетом оптических систем: Метод. указания к лабораторным работам. СПб.: НИУ ИТМО, 2011. 113 с.
2. Слюсарев Г.Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.

3. *Русинов М.М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
  4. *Грамматин А.П., Лустберг Э.А.* Зеркальный репродукционный объектив “Авангард” // ОМП. 1975. № 6. С. 35.
  5. *Грамматин А.П., Рыбаков И.Р.* Объектив для инфракрасного микроскопа из двух концентрических зеркал // ОМП. 1969. № 10. С. 77.
  6. *Марешаль А., Франсон М.* Структура оптического изображения. М.: Мир, 1964. 295 с.
  7. *Грамматин А.П.* Синтез оптических систем, состоящих из линз с апланатическими и изопланатическими поверхностями и бесконечно тонких компонентов // Труды ГОИ. 1981. Т. 49. В. 183. С. 23.
  8. *Грамматин А.П., Цыганок Е.А.* Апохроматические системы из обычных стекол // Оптический журнал. 2012. Т. 79. № 4. С. 9–12.
-