

Л. Н. АНДРЕЕВ, Ю. А. КОМАРОВА

АБЕРРАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА ОТРАЖАЮЩИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ВТОРОГО ПОРЯДКА

Рассмотрены коррекционные возможности в области Зейделя отражающих поверхностей второго порядка: параболы, гиперболы и эллипса. На основе выражений для коэффициентов aberrаций третьего порядка сформулирована теорема об абберационных свойствах этих поверхностей.

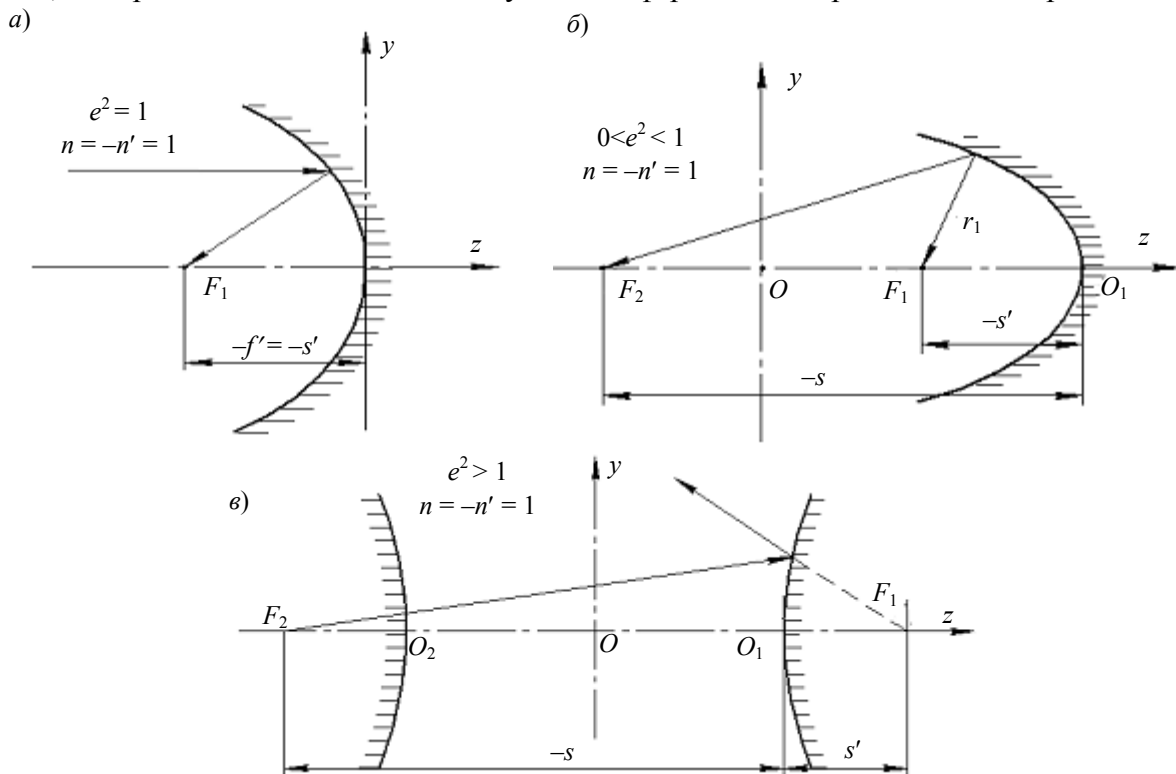
Ключевые слова: асферические отражающие поверхности, aberrации третьего порядка, абберационные свойства.

Уравнения кривых второго порядка имеют вид [1, 2]

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

где r_0 — радиус в вершине кривой, e — эксцентриситет кривой второго порядка.

Для окружности $e^2=0$, для параболы $e^2=1$, для эллипса $0 < e^2 < 1$ и для гиперболы $e^2 > 1$: см. рисунок, где приведены схемы соответствующих асферических отражающих поверхностей.



На основе фокальных свойств кривых второго порядка [3] установлено, что оба фокуса являются сопряженными. Поэтому при расположении точки предмета в одном из фокусов отражающих поверхностей изображение находится в другом, и при этом гомоцентричность пучков лучей не нарушается, т.е. сферическая aberrация отсутствует [4—9].

Рассмотрим коэффициенты (S_I — S_V) aberrаций третьего порядка отражающих поверхностей второго порядка.

Коэффициенты aberrаций третьего порядка, выраженные через параметры P , W , π [1], определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{I}} &= h(P + \Delta P); \\ S_{\text{II}} &= H(P + \Delta P) - IW; \\ S_{\text{III}} &= \frac{H^2}{h}(P + \Delta P) - 2I \frac{H}{h}W - I^2\Phi; \\ S_{\text{IV}} &= \pi = -\frac{\Delta n^{-1}}{r_0} = \Phi; \\ S_{\text{V}} &= \frac{H^3}{h^2}(P + \Delta P) - 3I \frac{H^2}{h^2}W - 2I^2 \frac{H}{h}\Phi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где h и H — высота пересечения соответственно 1-го и 2-го парааксиальных лучей с асферической поверхностью; $n = -n' = 1$; при этом

$$P = \left(\frac{\Delta a}{\Delta n^{-1}} \right)^2 \Delta a \frac{1}{n}; \quad W = \frac{\Delta a}{\Delta n^{-1}} \Delta a \frac{1}{n}; \quad \Phi = \frac{\alpha' - \alpha}{h}, \quad \Delta P = -e^2 \frac{\Delta a n^3}{\Delta n^2}.$$

Для параболоида (см. рисунок, *a*) при $\bar{P} = -0,25$; $\bar{W} = 0,50$; $\Delta \bar{P} = 0,25$ и $\alpha_1 = 0$; $\alpha' = 1$; $h_1 = f' = 1$; $\beta_1 = 1$, $I = -1$ уравнения (2) принимают следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \bar{S}_{\text{I}} &= 0; \\ \bar{S}_{\text{II}} &= \bar{W} = 0,5; \\ \bar{S}_{\text{III}} &= -H - 1 = -\bar{s}_p - 1; \\ \bar{S}_{\text{IV}} &= 1; \\ \bar{S}_{\text{V}} &= \frac{3}{2}\bar{H}^2 + 2\bar{H} = \frac{3}{2}\bar{s}_p^2 + 2\bar{s}_p, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где s_p — приведенное положение входного зрачка относительно вершины поверхности.

Для эллиптической и гиперболической отражающих поверхностей (см. рисунок, *b*, *в*) уравнения (2) при $\alpha_1 = -\beta^x$; $h_1 = s\alpha = -s\beta^x$; $H = s_p$; $I = n_1\alpha_1 l = -(s_p - s) \frac{1-e}{1+e}$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} S_{\text{I}} &= s \frac{(1-e)}{(1+e)} \left[-\frac{2e^2}{(1+e)^3} + \frac{2e^2}{(1+e)^3} \right] = 0; \\ S_{\text{II}} &= -\frac{2(s_p - s)(1-e)e}{(1+e)^3}; \\ S_{\text{III}} &= \frac{4(s_p - s)s_p e}{s(1+e)^2} + \frac{2(s_p - s)^2(1-e)}{s(1+e)^2}; \\ S_{\text{IV}} &= \pi = -\frac{\Delta n^{-1}}{r_0} = \Phi; \\ S_{\text{V}} &= -\frac{6e(s_p - s)s_p^2}{(1-e^2)s^2} + \frac{4(s_p - s)^2 s_p}{s^2(1+e^2)}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где s и s_p — расстояние от предмета и входного зрачка до вершины поверхности.

Для эллипсоида и гиперboloида

$$s = \frac{r_0}{1-e} \quad \text{или} \quad s' = \frac{r_0}{1+e}. \quad (5)$$

Анализ выражений (2)—(5) и фокальных свойств кривых второго порядка позволяет вывести следующую теорему.

Теорема. Отражающие поверхности второго порядка (параболоидальная, эллипсоидальная и гиперболоидальная) характеризуются следующими свойствами:

1) при расположении предмета в одном из фокусов сферическая аберрация исправлена ($S_I=0$), при этом гомоцентричность пучка лучей не нарушается;

2) при выполнении п. 1 кома третьего порядка не зависит от положения входного зрачка (s_p);

3) при выполнении п. 1 астигматизм третьего порядка зависит от положения входного зрачка (s_p): при расположении предмета и входного зрачка в сопряженных фокусах F_1 и F_2 соответственно он исправлен;

4) при выполнении п. 1 дисторсия третьего порядка зависит от положения входного зрачка: при $s_p=0$ и $s_p = \frac{2r_0}{2+e}$ исправлена;

5) кривизна поверхности изображения не зависит от положения входного зрачка (s_p) и эксцентриситета (e), так как $S_{IV} = \Phi = 2/r_0$.

В заключение следует отметить, что приведенные результаты исследования коррекционных свойств отражающих асферических поверхностей второго порядка в области Зейделя могут быть полезны при проектировании зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 379 с.
2. *Русинов М. М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
3. *Бронштейн И. Н., Семендяев К. А.* Справочник по математике. М.: Гостехтеориздат, 1956. 608 с.
4. *Русинов М. М.* Несферические поверхности в оптике. М: Недра, 1965. 195с.
5. *Чуриловский В. Н.* Теория оптических приборов. М. — Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
6. *Панов В. А., Андреев Л. Н.* Оптика микроскопов. Л.: Машиностроение, 1976. 432 с.
7. *Зверев В. А.* Основы геометрической оптики. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002. 218 с.
8. *Зверев В. А., Точилина Т. В.* Оптехника проектирования оптических приборов. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 457 с.
9. *Андреев Л. Н.* Прикладная теория аберраций. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2002. 96 с.

Сведения об авторах

Лев Николаевич Андреев

— д-р. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Юлия Александровна Комарова

— студентка; Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
19.03.08 г.