О КРИТЕРИИ РАСЧЕТА ДВУХЛИНЗОВЫХ СКЛЕЕННЫХ ОБЪЕКТИВОВ НА ЭВМ

А.А Шехонин, С.А. Родионов

Склеенный двухлинзовый объектив находит самое широкое применение при разработке оптических приборов различного назначения, поэтому автоматизация расчета склеенного дублета является необходимым звеном проектирования оптики.

Существующие программы автоматического расчета склеенного объектива [1, 2] не всегда удовлетворяют поставленным требованиям и не получили широкого распространения. Принципиальным недостатком этих программ, снижающим эффективность использования ЭВМ, является отсутствие оптимальной балансировки аберраций системы. Конструкции, определенные по программам, удовлетворяют только заданным значениям коэффициентов аберраций III порядка – P, W и C, в то время как другие аберрации, а именно сферохроматизм, хроматизм увеличения и сферическая аберрация на зоне не корригируются.

Рассмотрим задачу разработки критерия оптимальной балансировки всех аберраций склеенного дублета в любой спектральной области и с учетом конечного поля зрения для построения оптимальных конструкций (с апланатической и ахроматической коррекцией) на ЭВМ.

Как известно, для хорошо корригируемых систем вполне удовлетворительным критерием качества является число Штреля S, связанное со средним квадратом деформации волнового фронта, E_M для одной длины волны выражением [3]

$$S \approx 1 - 4\pi^2 \mathrm{E_M}, \tag{1}$$

где

$$E_M = \overline{W}^2 - (\overline{W})^2; \quad \overline{W} = \frac{1}{\pi}\int_0^1\int_0^{2\pi} W(\rho,\varphi)\rho d\rho d\varphi;$$

$$\overline{W}^2 = \frac{1}{\pi}\int_0^1\int_0^{2\pi} W^2(\rho,\varphi)\rho d\rho d\varphi,$$

$W(\rho,\varphi)$ – волновая аберрация в длинах волн, ρ,φ – полярные координаты на зрачке.

Оптимальная балансировка аберраций должна, следовательно, минимизировать E_M, но склеенный дублет работает в конечном интервале длин волн от $\lambda_{\min}$ до $\lambda_{\max}$. Обобщим указанный критерий на полихроматический случай.

В соответствии с формулой (1) запишем выражение для полихроматического числа Штреля ($S_{\text{п}}$):

$$S_{\text{п}} \approx 1 - 4\pi^2 \mathrm{E}_{\text{п}},$$

где $\mathrm{E}_{\Pi} = \int\limits_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} q(\lambda)E(\lambda)d\lambda$ – полихроматическая дисперсия волновой аберрации, $q(\lambda)$ – функция спектральной эффективности.

Удобно ввести вместо длины волны λ каноническую хроматическую координату χ следующим образом:

$$\chi = \frac{\lambda - \lambda_0}{\Delta\lambda},$$

где $\lambda_0 = \dfrac{\lambda_{\max} + \lambda_{\min}}{2}$ основная длина волны, $\Delta\lambda = \dfrac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{2}$ полуширина спектрального интервала.

Принимая $q(\lambda) = \dfrac{1}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}$, получим:

$$E_{\Pi} = \frac{1}{\pi}\int\limits_{-1}^{1}\left[\int\limits_0^1\int\limits_0^{2\pi} W^2(\chi, \rho, \varphi)\rho d\rho d\varphi - \frac{1}{\pi}\left(\int\limits_0^1\int\limits_0^{2\pi} W(\chi, \rho, \varphi)\rho d\rho d\varphi\right)^2\right]d\chi. \qquad (2)$$

Полученное выражение (2) представляет полихроматическую дисперсию волновой аберрации только для одной точки поля. Для осевой зоны предмета введем полярные координаты r, θ. В силу осевой симметрии свойства системы не зависят от θ. Поэтому, интегрируя по полю зоны и нормируя к ее площади, получим среднюю по полю полихроматическую дисперсию волновой аберрации $\overline{E}_{\Pi}$:

$$\overline{E}_{\Pi} = \frac{1}{r_{\max}^2}\int\limits_0^{r_{\max}^2} E_{\Pi}(r)dr^2. \qquad (3)$$

Заменим r на кононическую координату на предмете σ, при этом

$$\sigma = r\frac{A_0}{\lambda_0}, \qquad (4)$$

где A_0 – входная апертура.

Подставляя (2) в выражение (3) и учитывая (4), будем иметь:

$$\overline{E}_{\Pi} = \frac{1}{\sigma_{\max}^2}\int\limits_0^{\sigma_{\max}^2}\int\limits_{-1}^{1}\left\{\int\limits_0^1\int\limits_0^{2\pi} W^2(\sigma, \chi, \rho, \varphi)\rho d\rho d\varphi - \right.$$
$$\left. - \frac{1}{\pi}\left[\int\limits_0^1\int\limits_0^{2\pi} W(\sigma, \chi, \rho, \varphi)\rho d\rho d\varphi\right]^2\right\}d\sigma^2 d\chi \qquad (5)$$

Волновую аберрацию $W(\sigma, \chi, \rho, \varphi)$ представим в виде ряда по степеням $\sigma, \chi, \rho, \varphi$ [4]:

$$W(\sigma, \chi, \rho, \varphi) = (\omega_{0020} + \chi\omega_{0120})\rho^2 + (\omega_{0040} + \chi\omega_{0140})\rho^4 + \\ + \omega_{0060}\rho^6 + (\omega_{1011} + \chi\omega_{1111} + \rho^2\omega_{1031})\sigma\rho\cos\varphi + \dots, \tag{6}$$

где $\omega_{0020}, \omega_{1011}, \omega_{0040}, \omega_{0060}, \omega_{0120}, \omega_{1111}, \omega_{0140}, \omega_{1031}$ – соответственно коэффициенты продольной и поперечной расфокусировок, сферической аберрации третьего и пятого порядков, хроматизма положения, хроматизма увеличения, сферохроизма и комы третьего порядка.

Как показали исследования [5], указанного набора коэффициентов достаточно для удовлетворительного описания реальных аберраций склеенных дублетов с относительными отверстиями до 1:3,5 и полями зрения до 10°.

Подставляя выражение для волновой аберрации (6) в (5), получим после преобразований выражение для $\overline{E}_{\text{П}}$:

$$\overline{E}_{\text{П}} = \frac{1}{12}\left(\omega_{0020} + \omega_{0040} + \frac{9}{10}\omega_{0060}\right)^2 + \\ + \frac{1}{180}\left[\left(\omega_{0040} + \frac{3}{2}\omega_{0060}\right)^2 + \frac{9}{140}\omega_{0060}^2\right] + \\ + \frac{1}{36}\left[(\omega_{0120} + \omega_{0140})^2 + \frac{1}{15}\omega_{0140}^2\right] + \frac{\sigma_{\max}^2}{144}\omega_{1031}^2 + \frac{\sigma_{\max}^2}{15}\omega_{1111}^2. \tag{7}$$

В плоскости оптимальной установки выражение (7) примет вид:

$$\overline{E}_{\text{П}} = \frac{1}{180}\left[\left(\omega_{0040} + \frac{3}{2}\omega_{0060}\right)^2 + \frac{9}{140}\omega_{0060}^2\right] + \\ + \frac{1}{36}\left[(\omega_{0120} + \omega_{0140})^2 + \frac{1}{15}\omega_{0140}^2\right] + \frac{\sigma_{\max}^2}{144}\omega_{1031}^2 + \frac{\sigma_{\max}^2}{15}\omega_{1111}^2, \tag{8}$$

при этом

$$\omega_{0020} = -\left(\omega_{0040} + \frac{9}{10}\omega_{0060}\right).$$

Полученное выражение (8) представляет собой квадратичную форму от коэффициентов. Это позволяет представить оценочную функцию в виде суммы квадратов функций:

$$\overline{E}_{\text{П}} = \sum_{i=1}^{6} f_i^2, \tag{9}$$

где

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{180}}\left(\omega_{0040} + \frac{3}{2}\omega_{0060}\right), \quad f_1 = \frac{1}{6}\left(\omega_{0120} + \omega_{0140}\right),$$

$$f_3 = \frac{\sigma_{\max}}{12}\omega_{1031}, \quad f_4 = \frac{1}{\sqrt{540}}\omega_{0140}, \quad f_5 = \frac{1}{20\sqrt{7}}\omega_{0060}, \quad f_3 = \frac{\sigma_{\max}}{\sqrt{15}}\omega_{1111}.$$

Таким образом, задача автоматического построения оптимальной конструкции склеенного дублета (с апланатической и ахроматической коррекцией) сводится к уменьшению функционала $\overline{E}_{\text{П}}$, т. е. к поиску минимума системы функций f_i (9). Связав аналитически коэффициенты аберраций с конструктивными параметрами дублета, можно построить эффективный алгоритм поиска минимума указанной системы функций, например, по методу наименьших квадратов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Л. Н. [и др.]. Об автоматическом расчете двухлинзового склеенного объектива в области аберраций 3-го порядка на ЭВМ. ОМП, 1967, № 6.
2. Благодарова Н. А., Жаров Е. А., Цывкин Р. В. Использование малых ЭВМ в практике расчета оптических систем. ОМП, 1975, № 1.
3. Марешаль А., Франсон М. Структура оптического изображения. М., «Мир», 1964.
4. Hopkins H. H, Wave Theory of Aberrations. Oxford Clarendon Press. 1949.
5. Шехонин А. А. Автоматизация методов расчета оптических систем на стадии предварительного проектирования. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Л., ЛИТМО, 1975.