

## АЛГОРИТМ СИНТЕЗА ДВУСКЛЕЕННОГО ОБЪЕКТИВА НА ЭВМ

А. А. ШЕХОНИН, С. А. РОДИОНОВ

Рассматривается алгоритм автоматизированного синтеза склеенного двухлинзового объектива с оптимальной балансировкой заданных aberrаций. Приводятся результаты расчета двусклеенных объективов на ЭВМ ЕС-1022.

Склеенный двухлинзовый объектив является одним из наиболее широко распространенных и изученных видов оптических систем, поэтому его автоматизированный расчет является необходимым звеном синтеза автоматизированной системы проектирования оптики.

Принципиальными недостатками существующих алгоритмов автоматизированного расчета склеенного дублета [1, 2] являются: поиск решения только в области aberrаций III порядка, ограниченность спектрального интервала и отсутствие оптимальной балансировки aberrаций системы.

Рассмотрим задачу разработки алгоритма автоматизированного синтеза склеенного дублета с оптимальной балансировкой всех aberrаций в любой спектральной области с учетом конечной величины поля зрения и при условии выбора наилучшей комбинации стекол.

Для достижения оптимальной коррекции aberrаций применим в качестве критерия [3] их балансировки среднюю по полю зрения полихроматическую дисперсию волновой aberrации. Как было показано в этой работе, оптимальная балансировка aberrаций должна минимизировать указанный критерий, который представляет собой квадратичную форму от коэффициентов aberrаций дублета. Запишем в соответствии с [3] выражение для критерия  $E_{\Pi}$ :

$$E_{\Pi} = \sum_{i=1}^6 f_i^2, \quad (1)$$

где

$$f_1 = \frac{1}{6\sqrt{5}} \left( \omega_{0040} + \frac{3}{2} \omega_{0060} \right), \quad f_2 = \frac{1}{6} (\omega_{0120} + \omega_{0140}),$$

$$f_3 = \frac{\sigma}{12} \omega_{1031}, \quad f_4 = \frac{1}{6\sqrt{15}} \omega_{0140}, \quad f_5 = \frac{1}{20\sqrt{7}} \omega_{0060}, \quad f_6 = \frac{\sigma}{\sqrt{15}} \omega_{1111},$$

$\omega_{0040}$ ,  $\omega_{0060}$ ,  $\omega_{0120}$ ,  $\omega_{1111}$ ,  $\omega_{0140}$ ,  $\omega_{1031}$  – соответственно коэффициенты сферической aberrации третьего и пятого порядков, хроматизма положения и увеличения, сферохроматизма и комы третьего порядка,  $\sigma$  – приведенная величина предмета.

Указанный набор коэффициентов, как показали исследования [4], позволяет удовлетворительно описать реальные aberrации склеенных дублетов с апланатической и ахроматической коррекцией с относительными отверстиями до 1 : 3,5 и полями зрения до 10°.

Для построения алгоритма синтеза дублета необходимо иметь аналитические выражения, связывающие функции  $f_i$  с его параметрами и позволяющие определить как сами функции  $f_i$ , так и их производные. Для одной преломляющей поверхности справедливы следующие выражения для коэффициентов аберраций [4]:

$$\omega_{0120} = \alpha C_P, \quad \omega_{0040} = \frac{\alpha}{8} p[(1+p)z + y]z,$$

$$\omega_{0060} = \frac{1}{2} [(1-p-p^2)z^2 - pyz + y^2] \omega_{0040}$$

$$\omega_{1031} = pz[(1+p)z + y],$$

$$\omega_{0140} = \frac{\alpha}{8} \left\{ [2C_P + p(C_C - C_P) + p^2(C_C - C_P)]z^2 + [2C_P + p(C_C - C_P)]yz + 2C_P y^2 \right\}$$

$$\text{где } \alpha = -\frac{A}{\lambda_0} nz, \quad y = As, \quad z = A(s - \rho), \quad p = \frac{n-n'}{n}, \quad C_P = \frac{C-C'}{2}, \quad C_C = \frac{C+C'}{2},$$

$A$  – апертура,  $\lambda_0$  – основная длина волны,  $s$  – положение предмета,  $n$  и  $n'$  – показатели преломления сред,  $C$  и  $C'$  – коэффициенты хроматизма сред,  $\rho$  – кривизна поверхности.

Комбинируя предыдущие выражения и формулы перехода от поверхности к поверхности, получаем выражения для коэффициентов всего дублета, а следовательно, и функции  $f_i$ , в зависимости от параметров дублета

$$\begin{aligned} z_1 &= A_1(s_1 - \rho_1), \quad z_2 = A_2(s_2 - \rho_2), \quad z_3 = A_3(s_3 - \rho_3), \quad n, \\ p &= \frac{n-n'}{n}, \quad C_P = \frac{C-C'}{2}, \quad C_C = \frac{C+C'}{2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $n$ ,  $n'$ ,  $C$ ,  $C'$  – показатели преломления и коэффициенты хроматизма линз дублета;  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$  – апертуры на поверхностях дублета;  $s_1$ ,  $s_2$ ,  $s_3$  – соответствующие положения предмета;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$ ,  $\rho_3$  – кривизны поверхностей дублета.

Толщины дублета  $d_1$  и  $d_2$  не включены в число параметров, поскольку они выбираются с учетом конструктивных решений и условий устранения хроматизма увеличения. Можно показать, что при устраненном хроматизме положения, хроматизм увеличения, в основном, определяется соотношением толщин:

$$\omega_{1111} = -(C_C + C_P)z_1 d_1 + (1+p)[2nC_P z_2 - (C_P + C_C)z_1]d_2. \quad (3)$$

При исправлении хроматизма увеличения, как следует из выражения (3), соотношение толщин линз определяется по формуле:

$$\frac{d_1}{d_2} = \frac{(1+p)[2nC_P z_2 - (C_C + C_P)z_1]}{(C_C + C_P)z_1}. \quad (4)$$

Таким образом, задача автоматизированного синтеза дублета заключается в нахождении таких значений параметров (2), которые обеспечили бы минимум системы функций (1).

Алгоритм автоматизированного синтеза склеенного двухлинзового объектива строится следующим образом (см. рисунок).

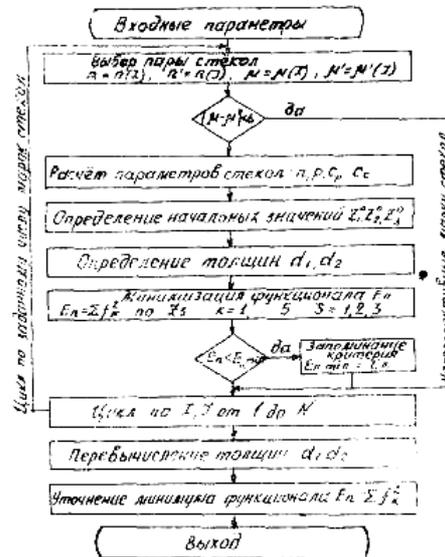


Рис.1.

Исходными данными для синтеза являются апертура, положение предмета и входного зрачка, поле зрения, увеличение, параметры спектрального интервала, номера используемых материалов по каталогу, стекла или их показатели преломления, вид синтеза дублета (одиночный, с призмой либо с дополнительной системой). При синтезе дублета с призмой или с дополнительной системой задаются соответственно толщина и положение призмы или аберрации системы, к которой добавляется дублет.

Для каждой комбинации стекол из набора находят начальные значения параметров  $z_1^0, z_2^0, z_3^0$  по формулам теории аберраций III порядка, модифицированным к используемым параметрам. Затем согласно формулам (3) и (4) определяются толщины линз дублета. После этого производится минимизация системы функций (1) по параметрам  $z_s, s = 1, 2, 3$ . В процессе минимизации соблюдается условие равенства увеличению заданному значению. Алгоритм оптимизации построен в соответствии с демпфированным методом наименьших квадратов с ограничениями [5]. После описанного перебора всех возможных пар стекол выбирается пара с минимальным значением критерия  $E_{\Pi}$ . Для ускорения сходимости данного итерационного процесса отбрасываются неперспективные пары стекол, разность дисперсий которых меньше, например, чем 10, т.е.  $\varepsilon < 10$ . Для оптимальной конструкции переычисляются толщины линз и окончательно минимизируется значение ее критерия  $E_{\Pi}$ .

Результаты расчета склеенных двухлинзовых объективов на ЭВМ ЕС-1022 по разработанному алгоритму приведены в таблице, где представлены три

варианта синтеза оптимальных конструкций. Первый и второй варианты соответствуют одиночному синтезу, а третий – дублету с призмой, толщина которой 49,5 мм, марка стекла К8. При синтезе склеенных дублетов первого варианта был рассмотрен набор, содержащий 23 марки стекла: СТКЗ, Ф8, ТК8, Ф1, КЗ, ТФ8, БК12, ЛФ10, ГФ7, К8, ТБФ4, ЛК1, КФ4, БФ24, ТК1, СТК9, ТФ1, ТФ10, СТК12, ОФ2, БФ28, БК8. Во втором варианте для инфракрасной области спектра были использованы материалы: CsJ, KRS-6, LiF, CaF<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub>, AgCl, Иртран-2, As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>. При синтезе дублета с призмой рассмотрен набор, включающий 6 марок стекла: БК10, ТФ3, БК6, Ф1, ТФ1, К8.

Приведенные результаты синтеза показывают, что разработанный алгоритм обеспечивает оптимальную балансировку aberrаций, которая зависит от апертуры, поля зрения, спектральной области и комбинаций стекол. Малое время расчета оптимальных конструкций подтверждает высокую эффективность алгоритма.

Вариант синтеза дублета	1	2	3
$2\omega^\circ$	10	10	4
$D/f'$	1:4	1:1,5	1:4,2
$\lambda_0$ , мкм	0,589	2,500	0,589
$\Delta\lambda$ , мкм	0,085	0,850	0,085
$f'$	100	100	50
$r_1$	61,820	77,533	34,478
$r_2$	-39,232	-118,077	-18,950
$r_3$	-192,949	-2401,565	-72,559
$d_1$	6,75	4,20	2,63
$d_2$	3,61	2,90	2,16
Выбранная комбинация материалов	БК8, Ф8	AgCl, As <sub>2</sub> S <sub>3</sub>	БК6, Ф1
$\Delta S'_{(\lambda_1-\lambda_2)_0}$	-0,094	-0,034	-0,056
На краю отверстия $\Delta S'_{\lambda_0}$	-0,002	0,011	0,017
$S'_{\lambda_1} - S'_{\lambda_2}$	0,112	0,030	0,021
$\eta\%$	-0,044	-0,063	-0,091
На зоне 0,707 $\Delta S'_{\lambda_0}$	-0,046	-0,032	-0,008
$S'_{\lambda_1} - S'_{\lambda_2}$	0,001	-0,002	-0,020
$\eta\%$	-0,004	-0,016	-0,039
Критерий $\sqrt{E_{\Pi}}$	$\frac{\lambda_0}{30}$	$\frac{\lambda_0}{100}$	$\frac{\lambda_0}{40}$
Время синтеза, мин	4	1	0,5

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Л. Н. и др. Об автоматическом расчете двухлинзового склеенного объектива в области аббераций III порядка на ЭВМ. – ОМП, 1967, № 6.
2. Благодарова Н. А., Жаров Е. А., Цывкин Р. В. Использование малых ЭВМ и практика расчета оптических систем. – ОМП, 1975, № 1.
3. Шехонин А. А., Родионов С. А. О критерии расчета двухлинзовых склеенных объективов на ЭВМ. – Тр./Ленинградский институт точной механики и оптики, 1977, вып. 88. Оптическое приборостроение.
4. Шехонин А. А. Автоматизация методов расчета оптических систем на стадии предварительного проектирования: [Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук]. Л.: ЛИТМО, 1975.
5. Полак Э. Численные методы оптимизации.–М.: Мир, 1974.