

## ФОРМУЛЫ ДЛЯ КРИТЕРИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО СИНТЕЗА СКЛЕЕННОГО ДВУХЛИНЗОВОГО ОБЪЕКТИВА

А. А. ШЕХОНИН. С. А. РОДИОНОВ

Рассматриваются аналитические выражения коэффициентов волновой aberrации и волнового хроматизма склеенного двухлинзового объектива, используемые при синтезе его на ЭВМ.

В работе [1] было показано, что в качестве критерия автоматизированного расчета склеенного двухлинзового объектива с апланатической и ахроматической коррекцией aberrаций вполне применим средний по полю полихроматический квадрат деформации волнового фронта. Было получено также следующее выражение для критерия  $E_{II}$ :

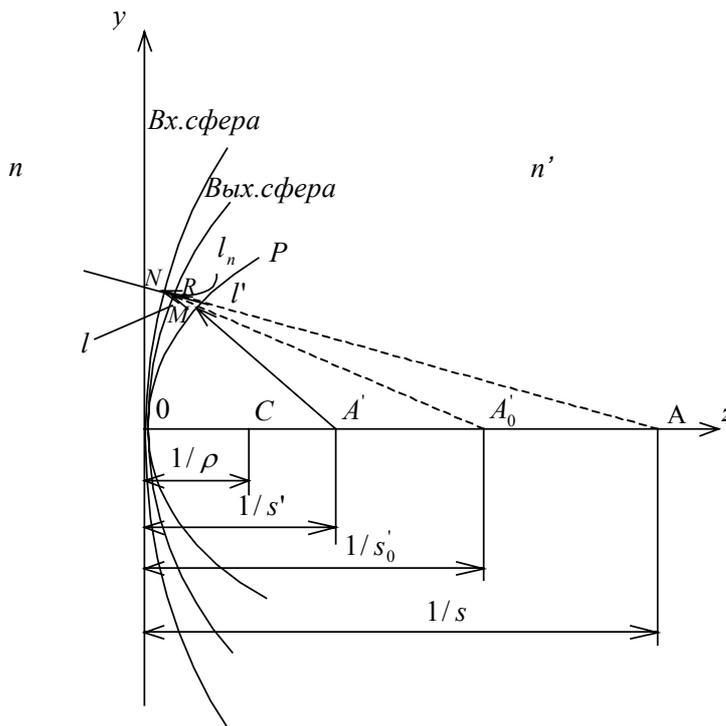
$$E_{II} = \sum f_i^2 \quad (1)$$

$$\text{где } f_1 = \frac{1}{6\sqrt{3}} \left( w_{0040} + \frac{3}{2} w_{0060} \right), \quad f_2 = \frac{1}{6} (w_{0120} + w_{0140}), \quad f_3 = \frac{\sigma}{12} w_{1031},$$

$$f_4 = \frac{1}{6\sqrt{15}} w_{0040}, \quad f_5 = \frac{1}{20\sqrt{7}} w_{0060}, \quad f_6 = \frac{\sigma}{\sqrt{15}} w_{1111}, \quad w_{0040}, \quad w_{0060}, \quad w_{00120}, \quad w_{1111}, \quad w_{0140},$$

$w_{1031}$  – коэффициенты сферической aberrации третьего и пятого порядков, хроматизма положения и увеличения, сферохроматизма и комы третьего порядка соответственно,  $\sigma$  – приведенная величина предмета.

Для разработки алгоритма автоматизированного синтеза склеенного дублета необходимо иметь аналитические выражения, связывающие функции  $f_i$  с его параметрами и позволяющие определить значения критерия по формуле (1). Рассмотрим вывод формул для определения коэффициентов волновой aberrации и волнового хроматизма склеенного дублета.



Получим сначала формулы коэффициентов для одной преломляющей поверхности. На рисунке изображен ход одного из лучей осевого пучка, выходящего из точки предмета  $A$  и пересекающего ось в точке  $A'$  после преломления на поверхности  $P$ , кривизна которой  $\rho$ . При этом  $S, S', S'_0$  – величины, обратные расстояниям от вершины поверхности до предмета, реального и гауссового изображений соответственно.

Волновая aberrация для данного луча определяется выражением

$$W = \frac{1}{\lambda_0} (nl - n'l'_n) \quad (2)$$

где  $\lambda_0$  – основная длина волны,  $l, l'_n$  – расстояния по лучу между преломляющей поверхностью, входной и выходной сферами соответственно,  $n, n'$  – показатели преломления сред до и после поверхности  $P$ .

Опуская несложные, но громоздкие преобразования, запишем выражение для величины  $l$ :

$$l = -\frac{1}{2} Az t - \frac{1}{8} Az (z^2 + yz + y^3) t^2 - \frac{1}{16} Az (z^4 + yz^3 + y^2 z^2 + y^3 z + y^4) t^3 \quad (3)$$

где  $A$  – апертура поверхности,  $t$  – квадрат относительной координаты на входной сфере,  $t = \rho^2$ ,  $z = (S - \rho)$ ,  $y = AS$ .

Нетрудно показать, что при разложении  $l$  в ряд до  $t^3$ , т.е. до aberrаций пятого порядка, справедливо следующее равенство:  $l'_n \approx l'$ , где  $l'$  – расстояние между преломляющей поверхностью и выходной сферой по нормали к последней.

Запишем выражение для  $l'$  по аналогии с формулой (3):

$$l' = -\frac{1}{2} Az' t' - \frac{1}{8} Az' (z'^2 + y' z' + y'^3) t'^2 - \frac{1}{16} Az' (z'^4 + y' z'^3 + y'^2 z'^2 + y'^3 z' + y'^4) t'^3 \quad (4)$$

Из гауссовой оптики следует:

$$z' = (1 + \rho)z, \quad y' = y + \rho z, \quad (5)$$

$$\text{где } \rho = \frac{n - n'}{n}.$$

Выражение для квадрата относительной координаты точки  $M$  (см. рисунок) на выходной сфере представим следующим образом:

$$t' = b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \quad (6)$$

Воспользовавшись формулами для расчета луча [2], определим квадрат высоты точки преломления луча  $Q$  на поверхности  $P$ :

$$U_Q = A^2 t + A^2 y z t^2 + \frac{1}{4} A^2 y z (y + z)^2 t^3 \quad (7)$$

Заменяя в (7)  $t$  на  $t'$  согласно (6),  $y$  на  $y'$ ,  $z$  на  $z'$  из (5) и приравнивая результат к (7), найдем значения коэффициентов выражения (6):

$$\begin{aligned} b_1 &= 1, \quad b_2 = -\rho z[(1 + \rho)z + y], \\ b_3 &= \frac{1}{4}b_2[(1 - 4\rho - 4\rho^2)z^2 - 2(1 + 2\rho)yz + y^2] \end{aligned} \quad (8)$$

Для вычисления коэффициентов волнового хроматизма воспользуемся методом Конради [3]. В соответствии с [3] и учитывая, что  $l'_x \approx l'$ , выражение (2) будет иметь вид

$$W(\chi) = \frac{1}{\lambda_0} [n(\chi)l + n'(\chi)l'] \quad (9)$$

где  $\chi$  – относительная спектральная координата. Выразим показатели преломления следующим образом:

$$n = n_0(1 + C'\chi), \quad n' = n'_0(1 + C'\chi)$$

где  $n_0, n'_0$  – показатели преломления для основной длины волны;  $C$  и  $C'$  – коэффициенты хроматизма сред.

Подставляя (3) и (4) в (9) и учитывая (6) и (8), после преобразований получим коэффициенты волновой аберрации и волнового хроматизма для преломляющей поверхности:

$$w_{0040} = -\frac{1}{8} \frac{A}{\lambda_0} n_0 \rho z^2 [(1 + \rho)z + y], \quad w_{0060} = w_{0040} \gamma, \quad (10)$$

$$w_{0120} = -\frac{A}{\lambda_0} n_0 z C_P,$$

$$w_{0140} = -\frac{1}{8} \frac{A}{\lambda_0} n_0 z \{ [2C_P + \rho(C_C - C_P) + \rho^2(C_C + C_P)]z^2 + [2C_P + \rho(C_C - C_P)]yz + 2C_P y^2 \}$$

$$\text{где } \gamma = \frac{1}{2} [(1 - \rho - \rho^2)z^2 - \rho yz + y^2], \quad C_C = \frac{C + C'}{2}, \quad C_P = \frac{C - C'}{2}.$$

При смещении предмета на величину  $\sigma$ , как известно [4], появляется следующая добавка волновой аберрации, обусловленная комой третьего порядка:

$$\Delta W = (\sigma, \overline{\rho}, \varphi) = \sigma w_{1031} \overline{\rho}^3 \cos \varphi$$

$$\text{Учитывая, что } t' = \overline{\rho}'^2 \text{ и } \overline{\rho}'^2 = a_1 + w_{1031} \overline{\rho}^3, \text{ а } \Delta \overline{\rho}' = \frac{\Delta t'}{2\rho}, \text{ найдем выражение}$$

для коэффициента комы:

$$w_{1031} = -\frac{1}{2} \rho z [(1 + \rho)z + y] \quad (11)$$

Суммируя волновые аберрации отдельных поверхностей тонкого дублета, а следовательно, и их коэффициенты (10), (11) и учитывая формулы перехода от поверхности к поверхности, найдем коэффициенты аберраций склеенного дублета, выраженные в матричном виде:

$$\begin{aligned} \bar{w}_{0120} &= \frac{1}{2} \frac{A}{\lambda_0} \bar{K}^T \bar{L} \bar{Z}_0, \quad \bar{w}_{0040} = -\frac{1}{8} \frac{A}{\lambda_0} \bar{Z}_{02}^T \bar{C} \bar{S} \bar{Z}_0, \quad \bar{w}_{1031} = \frac{1}{2} \frac{A}{\lambda_0} \bar{Z}^T \bar{R} \bar{S} \bar{Z}_0, \\ \bar{w}_{0140} &= -\frac{1}{8} \frac{A}{\lambda_0} \left[ \bar{P}_{20}^T \bar{Z}_1 + \bar{P}_{21}^T \bar{N}_1 \bar{Z}_2 + \bar{P}_{31}^T \bar{Z}_3 \right] + \Delta P_1, \\ \bar{w}_{0060} &= -\frac{1}{16} \frac{A}{\lambda_0} \left[ \bar{P}_{20}^T \bar{Z}_{10} + \bar{P}_{21}^T \bar{N}_2 \bar{Z}_{20} + \bar{P}_{31}^T \bar{N}_3 \bar{Z}_{30} \right] + \Delta P_2, \end{aligned} \quad (12)$$

где  $T$  – индекс транспонирования,  $\bar{K}$ ,  $\bar{L}$ ,  $\bar{Z}_0$ ,  $\bar{Z}_{02}$ ,  $\bar{Z}_1$ ,  $\bar{S}$ ,  $\bar{C}$ ,  $\bar{R}$ ,  $\bar{P}_{20}$ ,  $\bar{P}_{21}$ ,  $\bar{Z}_2$ ,  $\bar{N}_1$ ,  $\bar{P}_{31}$ ,  $\bar{Z}_3$ ,  $\bar{F}_{20}$ ,  $\bar{Z}_{10}$ ,  $\bar{Z}_{20}$ ,  $\bar{Z}_{30}$ ,  $\bar{N}_2$ ,  $\bar{F}_{21}$ ,  $\bar{N}_3$ ,  $\bar{F}_{31}$  – матрицы параметров дублета [5]. За параметры дублета примем:

$$z_1 = A_1(S_1 - \rho_1), \quad z_2 = A_2(S_2 - \rho_2), \quad z_3 = A_3(S_3 - \rho_3), \quad n, \rho, C_P, C_C$$

где  $A_1, A_2, A_3$  – апертуры по поверхностям дублета,  $S_1, S_2, S_3$  – соответствующие положения предмета,  $n, \rho, C_P, C_C$  – параметры материалов линз дублета. Поправки  $\Delta P_1$  и  $\Delta P_2$  в (12) обусловлены соответственно гауссовыми хроматизмом и сферической aberrацией третьего порядка.

Влияние толщин линз возможно учесть применением формул:

$$A_2 = A_1 - \bar{y}'_1 d_1, \quad A_3 = A_2 - \bar{y}'_2 d_2,$$

где  $d_1$  и  $d_2$  – толщины линз, а  $\bar{y}'_1$  и  $\bar{y}'_2$  – углы после преломления по 1-й и 2-й поверхностям.

При смещении предмета на величину  $\sigma$  появится добавка хроматической волновой aberrации для  $\rho$  не выше первой степени:

$$\Delta W = (\chi, \sigma, \rho, \varphi) \cong \sigma w_{1111} \bar{\rho} \chi \cos \varphi \quad (13)$$

Можно показать, что преломление на поверхностях дублета не вносит хроматизма увеличения, который определяется исключительно влиянием толщин при переносе координат выходной сферы первой поверхности на входную сферу третьей поверхности, Формулы переноса координат имеют вид

$$t_2 = t'_1 (1 - 2\bar{y}'_1 d_1), \quad t_3 = t'_2 (1 - 2\bar{y}'_2 d_2) \quad (14)$$

где  $t'_1, t'_2, t_2, t_3$  – координаты на сферах дублета. Выражения для углов преломления согласно (5) после второй и третьей поверхностей имеют вид

$$y_2 = y_1 + \rho_1(n)z_1, \quad y_3 = y_2 + \rho_2(n)z_2(n), \quad (15)$$

Учитывая зависимость  $\rho_1(\chi)$  и  $\rho_2(\chi)$  от  $\rho_1$  и  $\rho_2$  и подставляя (15) в (14), в соответствии с (13) определим коэффициент хроматизма увеличения дублета:

$$\bar{w}_{1111} = -(C_C + C_P)z_1 d_1 + (1 + \rho)[2nC_P z_2 - (C_C - C_P)z_1 d_2] \quad (16)$$

Таким образом, полученные аналитические выражения (12) и (16) позволяют определить коэффициенты aberrаций склеенного дублета по его параметрам и могут быть использованы при построении алгоритма синтеза склеенного дублета на ЭВМ для расчета критерия по формуле (1).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Шехонин А. А., Родионов С. А. О критерии расчета двухлинзовых склеенных объективов на ЭВМ. Л., Труды ЛИТМО, вып. 88, 1977.
2. Родионов С. А., Пржевалинский Л. И., Шехонин А. А. О вычислении волновой аберрации при расчете лучей через оптические системы. – Изв. вузов СССР – Приборостроение, 1974, т. 17, № 8.
3. Conrady A. E. Applied Optics and optical design. Part I, Oxford, 1929.
4. Родионов С. А. Передача пространственных частот неизопланатизма приборами. – Оптика и спектроскопия, 1972, т. 32, вып. 1.
5. Шехонин А. А. Автоматизация методов расчета оптических систем на стадии предварительного проектирования: [Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук]. – Л., ЛИТМО, 1975.