

С. Т. Бобров

АНАЛИТИЧЕСКИЙ И КОМПЬЮТЕРНЫЙ РАСЧЕТ АБЕРРАЦИЙ ВЫСШИХ ПОРЯДКОВ ЦЕНТРИРОВАННЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

4. ОРГАНИЗАЦИЯ РАСЧЕТА АБЕРРАЦИЙ СИСТЕМЫ

В предыдущих статьях были получены коэффициенты волновых aberrаций тонких оптических элементов на асферических поверхностях вращения [1] и формулы преобразования этих коэффициентов при переходе с одной из таких поверхностей на другую [2]. Полученные соотношения обеспечивают расчет aberrаций центрированной оптической системы, однако необходимо увязать их в единую методику, позволяющую осуществить расчет наиболее удобным образом.

Установим вначале набор параметров, которые должны быть известны для каждой оптической поверхности системы (или для каждого оптического элемента: поскольку рассматриваются тонкие элементы, то эти два термина означают одно и то же). К первой группе необходимых параметров относятся прежде всего параметры формы поверхности: радиус r_i в вершине поверхности и коэффициенты асферичности $\sigma_{3i} - \sigma_{7i}$, где i — номер элемента. Предпочтительно пользоваться обратным радиусом, т. е. кривизной поверхности $c_i = 1/r_i$, которая равна нулю для плоскости. Что касается коэффициентов асферичности, то более универсальными (т. е. пригодными для любой асферической поверхности, включая planoид) являются размерные коэффициенты [1], но оперировать удобнее с нормированными [1], величины которых, как правило, ближе к единице.

Кроме того, в эту группу параметров входят расстояния вдоль оси между вершинами поверхностей: расстояние d_{i-1} от предыдущей поверхности до рассматриваемой и d_i от рассматриваемой поверхности до последующей (см. рис. 1), а также показатели преломления среды до и после поверхности n_i и n'_i (напомним, что для дифракционных линз принимается $n_i = n'_i = 1$).

Ко второй группе параметров (в отличие от первой рассчитываемых, а не задаваемых изначально) относятся отрезки оптической поверхности s_i, s'_i , которые определяются по следующим формулам (с учетом правила знаков, принятого в оптике):

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{s_i} &= \frac{1/s'_{i-1}}{1 - d_{i-1}/s'_{i-1}}; \\ \frac{n'_i}{s'_i} &= \frac{n_i}{s_i} = \frac{n'_i}{f'_i}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Первое из соотношений (1) представляет собой тривиальное геометрическое соотношение $s_i = s'_{i-1} - d_{i-1}$ (см. рис. 1), но преобразованное таким образом, чтобы использовались только обратные отрезки, т. е. сами отрезки мо-

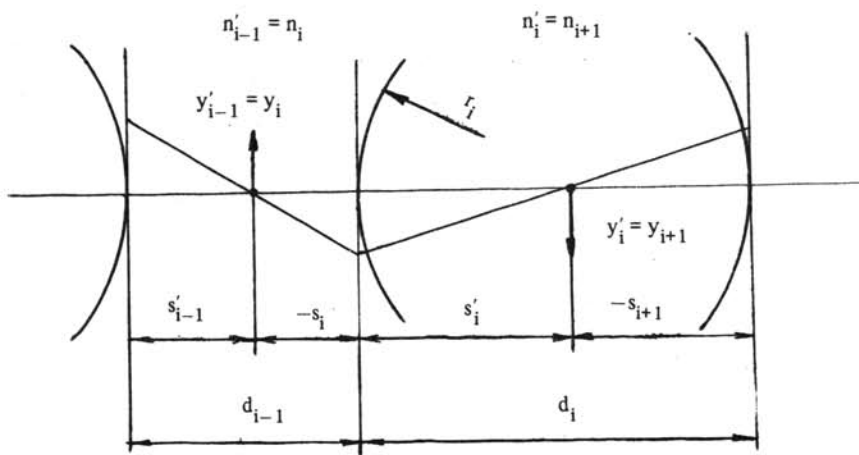


Рис. 1. Параметры i -го оптического элемента в осесимметричной оптической системе.
Показан ход предметного нулевого луча

гут быть бесконечными для некоторых поверхностей. Второе из выражений (1) является обобщенной формулой отрезков, которая может применяться как к преломляющим поверхностям, так и к дифракционным линзам. В первом случае заднее фокусное расстояние рассчитывается как

$$\frac{1}{f'_i} = \frac{n'_i - n_i}{n'_i r'_i}, \quad (2)$$

что следует из первого соотношения (8) в работе [1].

Во втором случае оба показателя преломления принимаются равными 1, а заднее фокусное расстояние равно:

$$\frac{1}{f'_i} = \frac{m\lambda}{\lambda_0} \left(\frac{1}{z'_i} - \frac{1}{z_i} \right) \quad (3)$$

в соответствии с первым из соотношений (12) в [1], где z_i, z'_i — отрезки записи дифракционной линзы; λ_0, λ — длина волны записи и рабочая длина волны; m — порядок дифракции.

Формулы (1) носят рекуррентный характер и могут использоваться в различной последовательности в зависимости от постановки задачи. Если известен передний отрезок системы s , то он же является и передним отрезком первой поверхности s_p с которой и следует начинать расчет. Если известен задний (выходной) отрезок системы s' , то он же является задним отрезком последней k -й поверхности, и расчет следует вести в обратной последовательности. Наконец, возможен случай, когда заданы оба отрезка системы, а в ее составе предусмотрен дифракционный корректор, т. е. дифракционная линза, обеспечивающая оптическое сопряжение предмета и изображения. В этом случае необходимо вести расчет отрезков от первой и последней поверхностей до корректора, заканчивая вычислением его отрезков.

Теперь рассмотрим форму представления абберационных коэффициентов оптических элементов, составляющих систему. В соотношениях (9–10, 13–14) работы [1] эти коэффициенты даны для случая, когда абберации выражены в координатах изображения, формируемого самим элементом (x'_i, y'_i) . Для разных поверхностей системы эти координаты не совпадают, кроме того, для какой-либо поверхности они могут оказаться бесконечными. Чтобы избежать указанных трудностей, преобразуем абберационные коэффициенты всех поверхностей системы, выразив абберации каждой из них через координаты изображения, формируемого системой в целом (x', y') . Для 3-го порядка, например, новые коэффициенты будут выражаться через старые следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{S}_{3i} &= S_{3i}; \quad \tilde{C}_{3i} = C_{3i} \left(\frac{y'_i}{y'} \right); \quad \tilde{A}_{3i} = A_{3i} \left(\frac{y'_i}{y'} \right)^2; \\ \tilde{F}_{3i} &= F_{3i} \left(\frac{y'_i}{y'} \right)^2; \quad \tilde{D}_{3i} = D_{3i} \left(\frac{y'_i}{y'} \right)^3. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Из формул работы [1] нетрудно убедиться, что коэффициенты полевых аббераций тонких оптических элементов содержат величину n'_i/s'_i (для дифракционной линзы $1/s'_i$) в степени, соответствующей степени полевой координаты в данной абберации. В итоге во все коэффициенты полевых аббераций в указанной степени войдет величина

$$x_1 = \frac{n'_i y'_i}{s'_i y'} = \frac{n_i y_i}{s_i y'}, \quad (5)$$

которая является инвариантом для данной поверхности, т. е. сохраняет свое значение при замене n'_i, s'_i, y'_i на n_i, s_i, y_i .

Расчет инвариантов X ведется по рекуррентной формуле:

$$X_i = X_{i-1} \frac{s'_{i-1}}{s_i} = X_{i-1} \frac{s_i + d_{i-1}}{s_i} = X_{i-1} \left(1 + \frac{d_{i-1}}{s_i}\right), \quad (6)$$

начиная с последней поверхности, для которой эта величина, как следует из (5), равна $X_k = n'_k/s'_k = n'/s'$. Ясно, что в качестве единой полевой координаты можно выбрать и координату предмета или любого промежуточного изображения в системе. В этом случае меняются только стартовая точка и направление расчета инвариантов X.

Описанное преобразование коэффициентов aberrаций позволяет представить их в форме, симметричной относительно n'_i, s'_i и n_i, s_i . Приведем в качестве примера выражения для модифицированных коэффициентов 3-го порядка преломляющей асферической поверхности, которые имеют вид (ср. с формулами (9) в [1], индекс i и тильду опускаем):

$$\left. \begin{aligned} S_3 &= -I_A^2 \left(\frac{1}{n's'} - \frac{1}{ns}\right) - \frac{\sigma_{30}}{r^3} (n' - n); \\ C_3 &= X \cdot I_A \left(\frac{1}{n's'} - \frac{1}{ns}\right); \quad A_3 = -X^2 \left(\frac{1}{n's'} - \frac{1}{ns}\right); \\ F_3 &= -X^2 I_A \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right); \quad D_3 = X^3 \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2}\right). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Напомним, что величина $I_A = (n'/s' - n/r)$ является инвариантом поверхности (инвариант Аббе), что следует хотя бы из выражения (8) работы [1].

Полученная форма aberrационных коэффициентов обеспечивает возможность расчета aberrаций как в прямом, так и в обратном ходе лучей. В последнем случае следует только поменять местами n', s' и n, s , что приведет к смене знака у всех коэффициентов.

Поскольку теперь aberrации поверхностей системы выражены в единых полевых координатах, то, пересчитывая aberrационные коэффициенты одной поверхности на другую, их можно складывать с коэффициентами этой другой поверхности без каких-либо дополнительных преобразований. Необходимо, однако, модифицировать формулы пересчета, полученные в работах [2, 3].

Во-первых, следует определить смысл величин z и t , фигурирующих в этих формулах. Напомним, что z — это расстояние от вершины исходной поверхности до плоскости, в которой располагается центр кривизны aberrированной сферической волны, распространяющейся между поверхностями. Отсюда ясно, что при расчете в прямом ходе лучей, когда требуется перейти с i -й поверхности на $(i+1)$ -ю, таким расстоянием является выходной (задний) отрезок i -й поверхности s'_i . Величина t в этом случае очевидным образом равна расстоянию между вершинами поверхностей d_i . В обратном ходе лучей при пересчете aberrаций с i -й поверхности на $(i-1)$ -ю в качестве z следует использовать отрезок s_i (причем с обратным знаком), а в качестве t — расстояние d_{i-1} .

Необходимо также скорректировать формулы преобразования aberrаций с учетом замены обычных коэффициентов на модифицированные [см. (4)]. В качестве примера приведем выражение для пересчета коэффициента дисторсии 7-го порядка из плоскости в плоскость в прямом ходе лучей (ср. с последним из выражений (11) в работе [2]):

$$\begin{aligned} D'_7 &= T_{1i} [D_7 - T_{1i} (F_7 + 6A_7) + 3T_{2i}^2 (3C_{7(3)} + 4Z_7) - \\ &- T_{2i}^3 (3S_{7(3)} + 24P_{7(2)} + 8B_7) + 5T_{2i}^4 (3C_{7(2)} + 4M_7) - \\ &- 3T_{2i}^5 (S_{7(2)} + 6P_{7(2)}) + 7T_{2i}^6 C_{7(1)} - T_{2i}^7 S_{7(1)}] - \\ &- \frac{3d_i}{5n'_i T_{1i}} (4A'_5 D'_3 + F'_5 D'_3 + 2D'_5 A'_3 + D'_5 F'_3) - \frac{2d_i^2}{5n_i^2 T_{1i}^2} (3C'_3 D_3'^2 + \\ &+ 4A'_3 D_3' + 4A'_3 F'_3 D_3' + F_3'^2 D_3') - \frac{6T_{2i}}{5n_i s'_i} [T_{3i} (2A'_3 D_3' + F_3' D_3') - D_3'^2]. \end{aligned} \quad (8)$$

Индекс i при aberrационных коэффициентах опущен, поскольку, вообще говоря, речь идет о преобразовании не aberrаций i -й поверхности, а суммарных aberrаций всех предшествующих поверхностей. Вспомогательные величины в выражении (8) равны:

$$\left. \begin{aligned} T_{11} &= \frac{z}{z-t} = \frac{1}{1-d_1/s'_1}; \\ T_{21} &= \frac{t}{z-t} \cdot \frac{y'_1}{y'} = \frac{X_1 d_1}{n'_1} T_{11}; \\ T_{31} &= \frac{y'_1}{y'} = \frac{X_1 s'_1}{n'_1}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Аналогичным образом надо скорректировать и формулы преобразования aberrаций при изменении формы поверхности. Так, соотношение для пересчета коэффициента первой птеры 7-го порядка из плоскости на сферу будет иметь вид (ср. с соответствующей формулой (10) из [3]):

$$P'_{7(1)} = P_{7(1)} - \frac{4}{5s'_1 r_1} (T_{31} C'_{5(1)} - 2P'_5) - \frac{2}{15s'_1 r_1^2} (3T_{31}^2 S_3 - 14T_{31} C_3 + 5A_3) - \frac{2}{15s'_1 r_1^3} (T_{31} C_3 - A_3) - \frac{4}{15r_1} (S_3 A_3 + 2C_3^2). \quad (10)$$

Таким образом, введение единых полевых координат и соответствующая модификация выражений для aberrационных коэффициентов и формул пересчета устраняют все трудности, связанные с возможным положением какого-либо промежуточного изображения в системе на бесконечности. Форма представления всех соотношений позволяет, кроме того, легко осуществлять расчет aberrаций как в прямом, так и в обратном ходе лучей. В результате становится возможным создание достаточно эффективной программы анализа aberrационных свойств оптических систем.

В качестве иллюстрации тех сведений о системах, которые можно получать с помощью этой программы, приведем результаты исследования свойств весьма простого фокусирующего объектива для лазерного проигрывателя [3], схема которого представлена на рис. 2. Объектив состоит из плосковыпуклой рефракционной линзы и дифракционного корректора aberrаций, который расположен со стороны сферической поверхности линзы. Со стороны корректора падает лазерный пучок, фокусируемый объективом. В работе [3] представлены результаты численных расчетов качества фокусировки, которые показывают, что с увеличением оптической силы корректора это качество растет, но при достижении определенного предела оно резко ухудшается, и объектив становится неработоспособным. Использование программы расчета aberrаций позволяет дать этому факту наглядное объяснение.

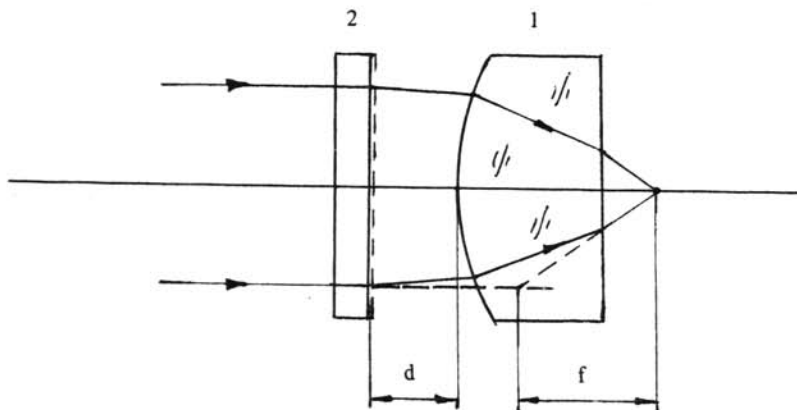


Рис. 2. Оптическая схема фокусирующего объектива:

1 – рефракционная линза; 2 – дифракционный корректор

Поскольку фокусирующий объектив работает в пределах небольшого поля зрения, то качество фокусировки зависит прежде всего от комы 3-го и 5-го порядков. На рис. 3 даны графики изменения этих aberrаций (в долях длины волны) в зависимости от расстояния d между рефракционной линзой и дифракционным корректором для трех соотношений между фокусными расстояниями корректора и объектива. Приведены также и зависимости критерия Маршала (т. е. общего качества фокусировки) от этого расстояния.

Нетрудно видеть, что при наименьшей оптической силе корректора из трех представленных характер изменения комы 3-го и 5-го порядков таков, что при определенном расстоянии d они равны и противоположны по знаку

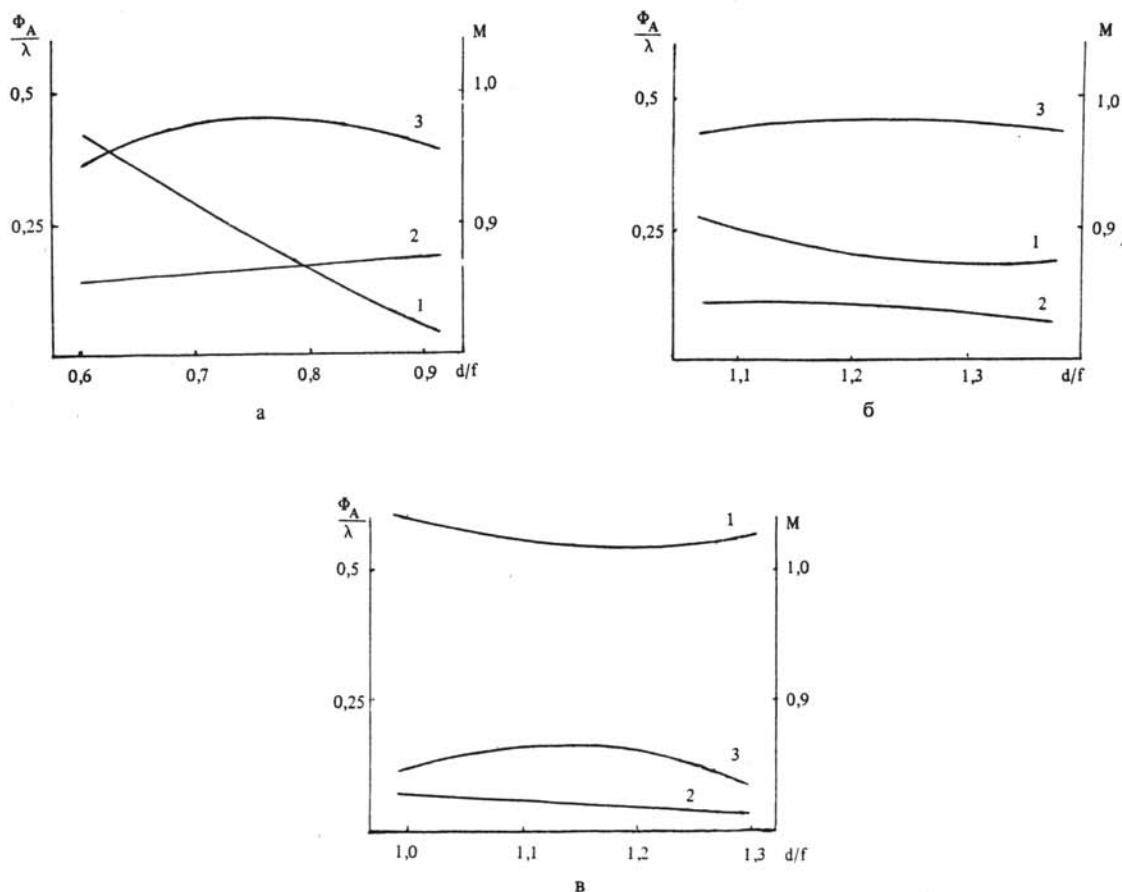


Рис. 3. Зависимости комы 3-го порядка (1), первой комы 5-го порядка (2, величина aberrации отложена с обратным знаком) и критерия Марешаля М (3) от отношения расстояния между компонентами объектива (d) к его фокусному расстоянию (f). Отношение фокусных расстояний объектива и корректора составляет 0,25 (а); 0,30 (б) и 0,35 (в)

(максимум критерия Марешаля лежит несколько в стороне в силу влияния других aberrаций). При увеличении оптической силы корректора равенство абсолютных величин двух ком уже не достигается, но они достаточно близки друг к другу, что обеспечивает высокое качество фокусировки. При дальнейшем увеличении оптической силы корректора величины двух ком значительно отличаются, и качество фокусировки падает.

В приведенном примере aberrационный анализ изменения качества фокусировки не позволил каким-либо образом улучшить объектив в силу его предельной простоты, однако в более сложных случаях расчет aberrационных коэффициентов оптических систем несомненно поможет оптимизировать их конструкции.

Литература

1. Бобров С. Т. Аналитический и компьютерный расчет aberrаций высших порядков: 1. Общие положения и aberrации тонких элементов//Компьютерная оптика: Сб./МЦНТИ, М., 1992, вып. 10–11.
2. Бобров С. Т. Аналитический и компьютерный расчет aberrаций высших порядков: 2. Преобразование aberrаций из плоскости в плоскость//Компьютерная оптика: Сб./МЦНТИ, М., 1992, вып. 10–11.
3. Бобров С. Т., Туркевич Ю. Г. Объектив с дифракционным корректором для лазерного проигрывателя//Компьютерная оптика: Сб./МЦНТИ, М., 1990, вып. 7.