

УДК 681.45

УПРОЩЕНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ПРИЕМНОГО ОБЪЕКТИВА В ЦИФРОВЫХ КАМЕРАХ ЗА СЧЕТ АППАРАТНОЙ И ПРОГРАММНОЙ КОМПЕНСАЦИИ ЕГО АБЕРРАЦИЙ

Р. В. Анитропов,

инженер

В. Н. Васильев,

доктор техн. наук, профессор

В. А. Зверев,

доктор техн. наук, профессор

И. Л. Лившиц,

старший научный сотрудник

Национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

М. Б. Сергеев,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Унчун Чо,

доктор техн. наук, профессор

Корейский политехнический университет

Представлены теоретические основы проектирования однолинзового объектива типа «плананастигмат», применение которого в цифровых камерах позволяет существенно упростить и удешевить их устройство. Практический пример подтверждает полученные теоретические соотношения и облегчает компьютерное моделирование аналогичных устройств.

Ключевые слова — объектив, плананастигмат, асферические поверхности, aberrации, цифровые мегапиксельные камеры.

Введение

Использование базовых законов проектирования оптических систем для создания на их основе объективов, содержащих минимальное количество компонентов, наряду с возможностью учета технологических особенностей изготовления этих компонентов, позволяет создавать однолинзовые объективы. При этом единственная линза, aberrации которой практически будут исправлены, облегчает программную компенсацию оставшихся aberrаций и позволяет получить оптико-электронную систему с качеством изображения, близким к дифракционному пределу. Очевидно, что такие линзы имеют асферические поверхности, применение которых является рациональным и не усложняет техноло-

гию производства оптики из пластических материалов.

В настоящей статье рассматриваются теоретические основы проектирования однолинзового объектива типа «плананастигмат» и приводится практический пример его реализации для цифровых мегапиксельных видеокамер.

Теоретические соотношения, обеспечивающие аппаратную компенсацию aberrаций

Тонкую линзу с помощью углов α , образованных осевым виртуальным (нулевым) лучом с оптической осью, можно записать в следующем виде:

$$\begin{array}{ccc} \alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\ \alpha_2 = \alpha & d = 0 & n_2 = n \\ \alpha_3 = 1 & & n_3 = 1 \end{array}$$

Первичная сферическая аберрация изображения, образованного тонкой линзой, определяется коэффициентом S_I^* [1]:

$$S_I^* = B_0 = Q_1 + Q_2,$$

где

$$Q_i = P_i + T_i \sigma_i;$$

$$P_i = \frac{(\alpha_{i+1} - \alpha_i)^2}{(v_{i+1} - v_i)^2} (v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i), \quad v_i = \frac{1}{n_i};$$

$$T_i = \frac{(n_{i+1} \alpha_{i+1} - n_i \alpha_i)^3}{(n_{i+1} - n_i)^2};$$

σ_i — коэффициент деформации сферической поверхности [2, 3] в уравнении

$$x_i^2 + y_i^2 = 2r_i z_i - (1 + \sigma_i) z_i^2.$$

В рассматриваемом случае $B_0 = P + T_1 \sigma_1 + T_2 \sigma_2$, где

$$P = P_1 + P_2 = \frac{n(2+n)\alpha^2 - n(2n+1)\alpha + n^2}{(n-1)^2}; \quad (1)$$

$$T_1 = \frac{n^3 \alpha^3}{(n-1)^2}; \quad (2)$$

$$T_2 = \frac{(1-n\alpha)^3}{(n-1)^2}. \quad (3)$$

Первичная кома изображения, образованного тонкой линзой, определяется при $B_0 = 0$ коэффициентом

$$S_{II}^* = K_0 = -W_1 - W_2,$$

где

$$W_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} (v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i).$$

В рассматриваемом случае $K_0 = -\frac{n-(n+1)\alpha}{n-1}$. При $K_0 = 0$ угол

$$\alpha = \frac{n}{n+1}. \quad (4)$$

Подставив это соотношение в выражения (1)–(3), при $B_0 = 0$ получаем

$$(n^2 - n - 1)^3 \sigma_2 - n^3 \sigma_1 = n + 1. \quad (5)$$

Соотношение (4) и уравнение (5) определяют условие отсутствия первичной сферической аберрации и первичной комы в изображении, образованном тонкой линзой. При этом коэффициенты деформации поверхностей линзы могут принимать любые значения, удовлетворяющие уравнению (5).

Пусть $\sigma_1 = 1$. Тогда $\sigma_2 = \frac{n+1}{(n^2 - n - 1)^3}$. Легко убедиться, что если показатель преломления мате-

риала линзы удовлетворяет условию $1,618 \leq n < \infty$, то $\infty \geq \sigma_2 > 0$. Следовательно, вторая поверхность линзы будет иметь форму сплюснутого сфероида. При $n < 1,618$ коэффициент деформации второй поверхности линзы будет удовлетворять условию $-\infty < \sigma_2 < -1$. В этом случае поверхность линзы будет иметь форму гиперболоида вращения.

Пусть $\sigma_2 = 0$. Тогда $\sigma_1 = -\frac{n+1}{n^3}$. Легко убедиться, что при $n = 1,32472$ коэффициент $\sigma_1 = -1$. При этом первая поверхность линзы имеет форму гиперболоида вращения. При $1,32472 \leq n < \infty$ значения коэффициента σ_1 должны удовлетворять условию $-1 \leq \sigma_1 < 0$, что соответствует эллипсоидной форме первой поверхности линзы.

Первичный астигматизм изображения определяется при $B_0 = 0$ и $K_0 = 0$ коэффициентом

$$S_{III}^* = C_0, \quad \text{где } C_0 = \sum_{i=1}^{i=2} \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_1}.$$

В рассматриваемом случае при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_3 = 1$ высота $h_1 = f'$. При оптической силе линзы $\varphi = 1$ высота $h_1 = 1$. Тогда $C_0 = 1$. Пецвалева кривизна поверхности изображения определяется коэффициентом $S_{IV}^* = D_0$, где

$$D_0 = \sum_{i=1}^{i=2} \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} n_i r_i} = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{\varphi}{n},$$

$$\varphi = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

Следовательно, при $\varphi = 1$ коэффициент $D_0 = \frac{1}{n}$, при этом астигматизм и кривизна поверхности изображения соответственно равны [1]:

$$z'_s - z'_m = f' w^2;$$

$$z'_p = -\frac{1}{2n} f' w^2.$$

Итак, в изображении, образованном тонкой линзой, деформацией одной из сферических поверхностей можно компенсировать сферическую аберрацию изображения, а прогибом линзы (изменением угла α) — кому изображения. При этом остаются не компенсированными остаточный астигматизм и кривизна поверхности изображения. При сравнительно большом расстоянии между вершинами поверхностей появляются дополнительные коррекционные возможности, анализ которых имеет практический интерес.

Представим линзу конечной толщины углами α в виде

$$\begin{array}{lll} \alpha_1 = 0 & & n_1 = 1 \\ \alpha_2 = \alpha & d_1 = d & n_2 = n \\ \alpha_3 = 1 & & n_3 = 1 \end{array}$$

При условиях, аналогичных рассмотренным выше, пещвалева кривизна поверхности изображения и в этом случае определяется коэффициентом S_{IV}^* . Положив $S_{IV}^* = 0$, получаем линзу с равными радиусами кривизны поверхностей: $r_1 = r_2 = r$. Оптическая сила такой линзы

$$\varphi = (n-1)^2 \frac{d}{nr^2}.$$

Выразим толщину линзы через радиус кривизны поверхностей линзы в виде $d = kr$. Тогда при $\varphi = 1$ получаем

$$r = \frac{(n-1)^2}{n} k. \quad (6)$$

Известно [4], что $n_{i+1}\alpha_{i+1} - n_i\alpha_i = h_i \frac{n_{i+1} - n_i}{r_i}$. В соответствии с этой формулой для первой поверхности имеем $n\alpha = h_1 \frac{n-1}{r_1} = \frac{n-1}{r}$. При этом

$$r = \frac{n-1}{n\alpha}. \quad (7)$$

Приравняв правые части выражений (6) и (7), получаем

$$\alpha = \frac{1}{k(n-1)}. \quad (8)$$

Тогда $h_2 = h_1 - \alpha d = 1 - \alpha kr$. Учитывая выражения (7) и (8), получаем

$$h_2 = \frac{n - (n-1)k}{n}. \quad (9)$$

Выражения коэффициентов, определяющих aberrации изображения, образованного рассматриваемой линзой, принимают вид

$$B_0 = h_1 Q_1 + h_2 Q_2 = Q_1 + h_2 Q_2;$$

$$K_0 = -W_1 - W_2 + h_2 S_2 Q_2; \quad (10)$$

$$C_0 = \frac{n^2 - 1}{n^2 - n(n-1)k} - 2S_2 W_2 + h_2 S_2^2 Q_2, \quad (11)$$

где

$$S_i = \sum_{k=2}^{k=i} \frac{d_{k-1}}{n_k h_k h_{k-1}}; \quad S_2 = \frac{d}{nh_2}.$$

Применив формулы (6) и (9), получаем

$$S_2 = \frac{(n-1)^2}{n} \frac{k^2}{n - (n-1)k}. \quad (12)$$

Из выражения (10) при $K_0 = 0$ находим, что

$$Q_2 = \frac{W_1 + W_2}{h_2 S_2}. \quad (13)$$

Подставив это соотношение в выражение (11), при $C_0 = 0$ получаем

$$S_2(W_2 - W_1) = \frac{n^2 - 1}{n^2 - n(n-1)k}. \quad (14)$$

С другой стороны, в этом выражении

$$W_2 - W_1 = \frac{n(n-1)^2 k^2 - (n^2 - 1)k + 2}{(n-1)^3 k^2}.$$

Тогда, применив выражение (12), получаем

$$S_2(W_2 - W_1) = \frac{1}{n(n-1)} \frac{n(n-1)^2 k^2 - (n^2 - 1)k + 2}{n^2 - n(n-1)k}. \quad (15)$$

Приравняв правые части выражений (14) и (15), получаем уравнение следующего вида:

$$k^2 - \frac{n+1}{n(n-1)} k - 1 + \frac{1+n(2-n)}{n(n-1)^2} = 0. \quad (16)$$

Полученное уравнение при выбранном значении показателя преломления позволяет найти значение коэффициента k . Однако следует заметить, что это уравнение имеет решение при $n > 1,602$ [5].

Выражение, определяющее коэффициент B_0 , можно представить как $B_0 = P_1 + T_1 \sigma_1 + h_2 Q_2$. Положив в этом выражении $B_0 = 0$, находим, что коэффициент деформации первой поверхности линзы

$$\sigma_1 = -\frac{1}{T_1} (P_1 + h_2 Q_2). \quad (17)$$

Здесь параметр $P_1 = \frac{n\alpha^3}{(n-1)^2}$, а параметр T_1 определяется формулой (2). При этом выполняется соотношение $\frac{P_1}{T_1} = \frac{1}{n^2}$. Применив формулу (8), находим, что $T_1 = \frac{n^3}{(n-1)^5 k^3}$. Высота h_2 определяется формулой (9). Раскрыв величины, входящие в выражение (13), получаем

$$Q_2 = \frac{n^2}{(n-1)^4} \frac{n(n-1)k - n - 1}{k^3}.$$

При этом выражение (17) можно преобразовать к виду

$$\sigma_1 = \frac{(n-1)^3}{n} \left[k^2 - \frac{n-1}{n} \frac{n^3 - 1}{(n-1)^3} k + \frac{n^3 - n - 1}{n(n-1)^3} \right]. \quad (18)$$

Параметр $Q_2 = P_2 + T_2 \sigma_2$ [6]. Отсюда находим, что коэффициент деформации второй поверхности линзы

$$\sigma_2 = \frac{1}{T_2} (Q_2 - P_2). \quad (19)$$

Параметр $P_2 = n \frac{(1-\alpha)^2}{(n-1)^2} (n-\alpha)$, а параметр T_2 определяется формулой (3). Применив формулу (8), находим

$$P_2 = \frac{n}{(n-1)^5 k^3} \times$$

$$\times [n(n-1)^3 k^3 - (n-1)^2 (1+2n)k^2 + (n-1)(2+n)k - 1];$$

$$T_2 = \frac{[(n-1)k - n]^3}{(n-1)^5 k^3}.$$

При этом выражение (19) можно преобразовать к виду

$$\sigma_2 = \frac{n(n-1)^3}{[n - (n-1)k]^3} \times$$

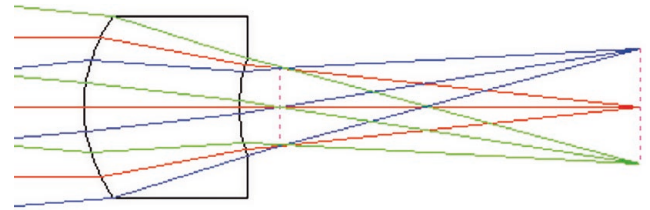
$$\times \left[nk^3 - \frac{1+2n}{n-1} k^2 + \frac{n^3-1}{(n-1)^3} (2-n)k + \frac{n^3-n-1}{(n-1)^3} \right]. \quad (20)$$

Пример реализации однолинзового объектива типа «плананастигмат»

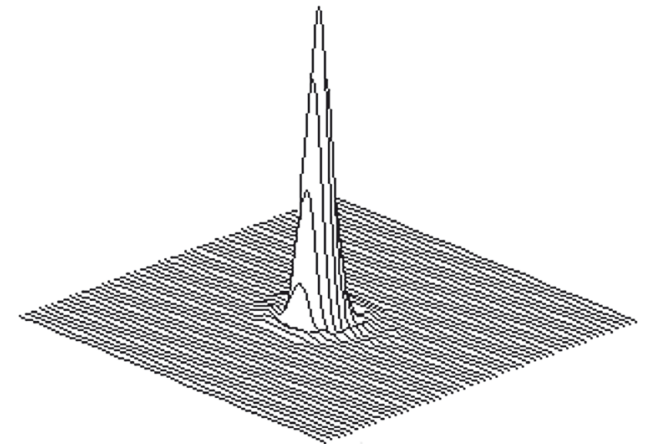
Выберем для примера в качестве материала линзы стекло ТК8 ($n_e = 1,61675$). При этом для коррекции хроматических аберраций возможно введение в линзу в сочетании со стеклом Ф1 ($n_e = 1,61688$) так называемой хроматической преломляющей поверхности [2]. Подставив значение $n_e = 1,61675$ в уравнение (16), получаем два решения: $k_1 = 1,6090$ и $k_2 = 1,0153$. Выбираем $k = 1,0153$. В соответствии с формулой (6) находим, что при $f' = 10$ мм радиус кривизны поверхностей $r = 2,389$ мм, при этом $d = 2,425$ мм. Используя формулы (18) и (20), находим коэффициенты деформации сферических поверхностей линзы: $\sigma_1 = -0,008$; $\sigma_2 = 2,664$. Вычисленные значения параметров позволяют определить форму первой поверхности линзы уравнением $x^2 + y^2 = 4,778z - 0,992z^2$, а форму второй поверхности — уравнением $x^2 + y^2 = 4,778z - 3,664z^2$.

В результате компьютерной оптимизации по критерию качества изображения форма первой поверхности не изменилась, а форма второй поверхности стала определяться уравнением $x^2 + y^2 = 4,778z - 3,538z^2$, т. е. изменилась весьма незначительно. На рис. 1 представлена оптическая схема однолинзового объектива, рассчитанного по предлагаемому методу, а на рис. 2 — функция дифракционного рассеяния точки, подтверждающая качество изображения оптической системы, близкое к идеальному.

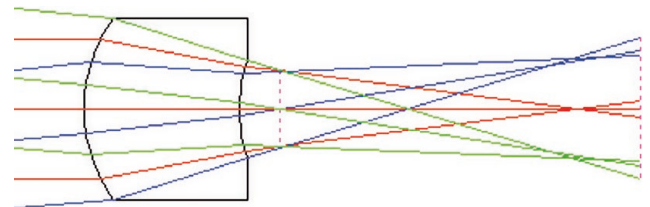
Аналогичные характеристики для объектива, не содержащего асферическую поверхность, показаны на рис. 3, 4. При сравнении технических



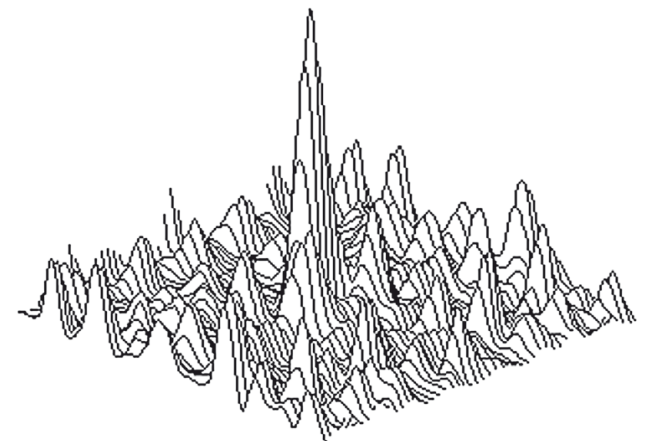
■ Рис. 1. Оптическая схема объектива «плананастигмат» с одной асферической поверхностью 2-го порядка



■ Рис. 2. Дифракционная функция рассеяния точки, подтверждающая качество изображения объектива, представленного на рис. 1



■ Рис. 3. Объектив без асферик



■ Рис. 4. Дифракционная функция рассеяния точки, иллюстрирующая низкое качество изображения однолинзового объектива

решений, представленных на рисунках, становится очевидным преимущество предлагаемой оптической схемы для использования приемного объектива в цифровых камерах.

Полученные результаты выполненного исследования аберрационных свойств однолинзовой оптической системы позволяют сделать следующие выводы:

— в изображении, образованном тонкой линзой, при несферической форме хотя бы одной из поверхностей и определенном ее прогибе возможна только апланатическая коррекция аберраций;

— в изображении, образованном линзой при сравнительно большом расстоянии между вершинами и при несферической форме поверхностей, возможна плананастигматическая коррекция аберраций изображения.

Полученные аналитические соотношения позволяют определить параметры как тонкой линзы, так и линзы при сравнительно большом расстоянии между вершинами поверхностей (толстой линзы).

Заключение

Представленные в статье теоретические основы проектирования однолинзового объектива

типа «плананастигмат» и практический пример его реализации подтверждают возможность создания объективов цифровых мегапиксельных камер, состоящих всего из одной линзы. При этом очевидно, что при использовании пластических материалов для изготовления линз применение асферических поверхностей является рациональным и не усложняет технологию производства оптики.

Деформации пластиковых линз, возникающие при их изготовлении, менее существенно влияют на качество изображения в случае «толстых» линз, описанных в данной работе. Кроме того, при наличии современного программного обеспечения эти деформации, приводящие к изменению формы линзы и, как следствие, ухудшению качества изображения, могут быть не только учтены, но и скомпенсированы на стадии моделирования оптической системы.

Таким образом, предлагаемая методика позволяет учесть базовые законы проектирования оптических систем и создать на их основе эффективные оптические системы, содержащие минимальное количество компонентов с возможностью учета технологических особенностей изготовления этих систем в условиях массового производства.

Литература

1. Зверев В. А. Основы геометрической оптики / СПбГУ ИТМО (ТУ). — СПб., 2000. — 218 с.
2. Чуриловский В. Н. Теория хроматизма и аберраций третьего порядка. — Л.: Машиностроение, 1968. — 312 с.
3. Зверев В. А., Кривоустова Е. В. Опотехника несферических поверхностей: учеб. пособие. — СПб.: СПбГУ ИТМО, 2006. — 203 с.
4. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. — М.-Л.: Машиностроение, 1966. — 564 с.
5. Бронштейн И. Г., Лившиц И. Л., Сергеев М. Б., Унчун Чо. Теория и практика расчета малогабаритных объективов для оптико-информационных систем // Информационно-управляющие системы. 2007. № 5. С. 52–55.
6. Анитропов Р. В. и др. Анализ параметрической модели обобщенного триплета и его применение в оптико-информационных системах технологий // Информационно-управляющие системы. 2010. № 1. С. 6–13.