

УДК 681.45

АНАЛИЗ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОГО ТРИПЛЕТА И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ

Р. В. Анитропов,

инженер

ООО «Анкил»

И. Г. Бронштейн,

директор Центра оптико-информационных технологий

В. Н. Васильев,

доктор техн. наук, профессор

В. А. Зверев,

доктор техн. наук, профессор

И. Л. Лившиц,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Санкт-Петербургский государственный 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

Представлен анализ параметрической модели объектива типа «триплет», определены его основные аберрационные свойства, приводятся примеры современного применения триплета в оптико-информационных системах.

Ключевые слова — объектив, аберрации, оптико-информационные системы.

Введение

Несмотря на долгую историю существования объективов типа «триплет» (первый триплет рассчитан Гарольдом Тейлором для фирмы «Кук» и запатентован в 1894 г. [1]) интерес к этой простой и изящной конструкции не только не ослабевает, но и постоянно растет. Применение новых оптических материалов, использование в качестве дополнительных параметров асферических поверхностей позволили разработать большое количество новых «триплетов» с улучшенными характеристиками. Поэтому авторы считают необходимым еще раз проанализировать свойства этого объектива и его параметрическую модель.

Построение аналитической модели триплета

Известно, что в оптической системе, представленной углами, образованными осевым виртуальным (нулевым) лучом с оптической осью, оптическая сила i -го тонкого компонента (линзы) взаимосвязана с углами α_i и α_{i+1} в пространстве предметов и изображений соответственно соотношением

$$h_i \varphi_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i,$$

где h_i — расстояние от оптической оси до точки пересечения виртуального луча с главной плоскостью компонента. Угол $\tilde{\alpha}_i$, образованный тем же лучом с оптической осью в материале линзы, определяет кривизну поверхностей («прогибы»)

линзы. В изображении предмета, образованном тонкой линзой, поперечное увеличение которого равно V_i , астигматизм третьего порядка будет отсутствовать, если входной зрачок расположить от линзы на расстоянии [2]

$$a_{pi} = \frac{(n_i - 1)(V_i - 1)}{n_i + V_i - (n_i + 1)\tilde{\alpha}_i \pm \sqrt{(\tilde{\alpha}_i - n_i)(\tilde{\alpha}_i - n_i V_i)}} \quad (1)$$

где n_i — показатель преломления материала линзы.

Поместив во входном зрачке линзы тонкий двухлинзовый афокальный ($\varphi_1 = -\varphi_2$) компенсатор, получаем оптическую систему, обладающую принципиальной возможностью коррекции сферической аберрации, комы и астигматизма третьего порядка образованного ею изображения. Заменим малый промежуток между линзами компенсатора промежуток конечной длины и будем считать, что $\varphi_1 \neq \varphi_2 \neq \varphi_3$. В результате получим оптическую систему из трех линз типа «триплет». В этом случае при $\alpha_1 = 0$ и $\alpha_4 = 1$ углы $\tilde{\alpha}_2, \tilde{\alpha}_3, \alpha_3, \tilde{\alpha}_3$, воздушные промежутки d_1 и d_2 , показатели преломления n_1, n_2, n_3 и коэффициенты дисперсии ν_1, ν_2 и ν_3 материала линз можно считать свободными параметрами и использовать их в качестве коррекционных для взаимной компенсации пяти монохроматических и двух хроматических аберраций образованного рассматриваемой оптической системой изображения.

Оптическую систему, состоящую из трех тонких компонентов, разделенных воздушными промежутками конечной длины, будем называть обобщенным триплетом. При $\alpha_1 = 0, h_1 = 1$ и $\alpha_4 = 1$ условие масштаба представления величин конструктивных параметров рассматриваемой оптической системы из трех тонких компонентов определится выражением вида

$$\varphi_1 + h_2\varphi_2 + h_3\varphi_3 = 1. \quad (2)$$

Положив $h_1 = 1$ и $\alpha_4 = 1$ ($\varphi = 1$), при принятых обозначениях получаем

$$\alpha_2 = h_1\varphi_1 = \varphi_1; \quad (3)$$

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 d_1 = 1 - \varphi_1 d_1; \quad (4)$$

$$\alpha_3 = \alpha_2 + h_2\varphi_2 = \varphi_1 + \varphi_2 - \varphi_1\varphi_2 d_1; \quad (5)$$

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 d_2 = (1 - \varphi_1 d_1)(1 - \varphi_2 d_2) - \varphi_1 d_2; \quad (6)$$

$$\alpha_4 = \alpha_3 + h_3\varphi_3 = 1. \quad (7)$$

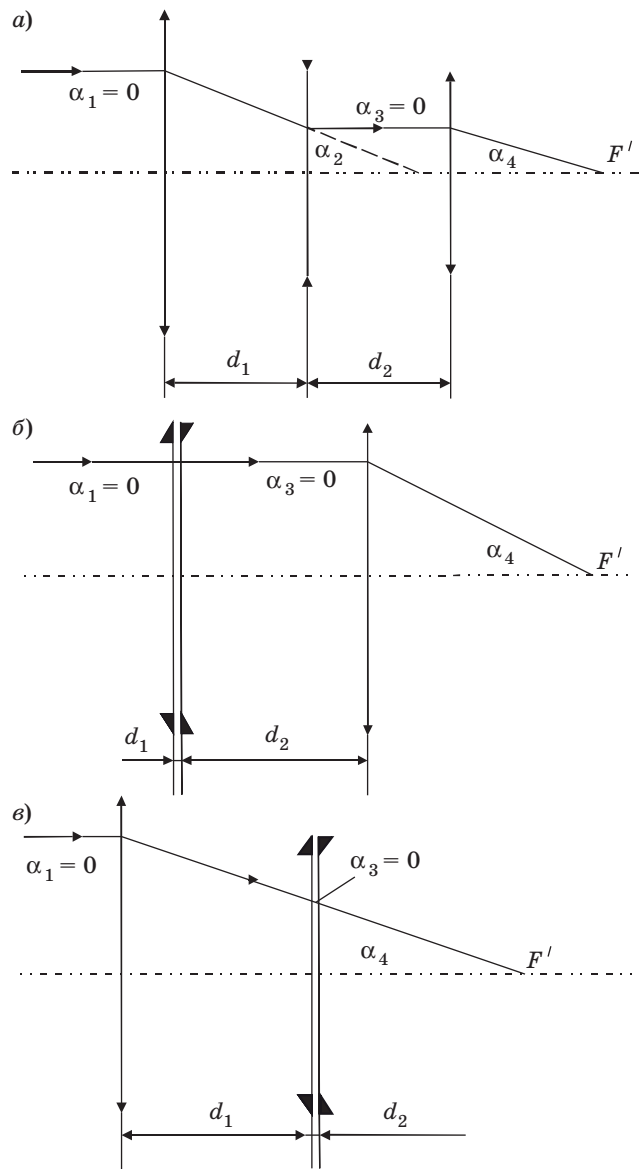
Применив выражения (5) и (6), получаем

$$\varphi_1(1 - \varphi_3 d_2) + \varphi_2(1 - \varphi_1 d_1) + \varphi_3(1 - \varphi_1 d_1)(1 - \varphi_2 d_2) = 1. \quad (8)$$

Выражение (8) определяет условие масштаба. Задний фокальный отрезок системы определяется соотношением

$$s'_{F'} = \frac{h_3}{\alpha_4} = h_3. \quad (9)$$

Формула (8) определяет взаимосвязь всех «воздушных» параметров оптической системы из трех тонких компонентов и, по сути дела, определяет все многообразие оптических систем подобного типа. В частном случае, когда $\alpha_3 = 0$, первые два компонента образуют телескопическую систему (рис. 1, а). При этом, как следует из соотношения (5):



■ Рис. 1. Варианты компоновки триплета: а — первые два компонента, расположенные на значительном расстоянии друг от друга, образуют телескопическую систему; б — первые два компонента, расположенные на минимальном расстоянии друг от друга, образуют афокальный компенсатор; в — афокальный компенсатор образован вторым и третьим компонентами триплета

$$d_1 = f'_1 + f'_2. \quad (10a)$$

Угловое увеличение изображения, образованного полученной таким образом телескопической системой, равно

$$\gamma = -\frac{f'_1}{f'_2} = \frac{1}{1 - \varphi_1 d_1}. \quad (10б)$$

Как следует из выражений (7) и (9), при $\alpha_3 = 0$ задний фокальный отрезок

$$s'_{F'} = h_3 = \frac{1}{\varphi_3}.$$

При $d_1 = 0$ величина $\gamma = 1^*$, а $f'_2 = -f'_1$. При этом телескопическая система преобразуется в тонкий двухкомпонентный афокальный компенсатор остаточных aberrаций третьего компонента (рис. 1, б).

Другой вариант системы из трех тонких компонентов при $\alpha_3 = 0$ можно получить, если принять $\varphi_2 = -\varphi_3$. Заметим, что и в этом случае $h_2 = h_3$, при этом, как следует из выражения (2), $\varphi_1 = 1$. При $d_2 = 0$ рассматриваемая оптическая система из трех тонких компонентов преобразуется в систему с тонким афокальным двухкомпонентным компенсатором aberrаций изображения, образованного первым компонентом, расположенным в сходящемся пучке лучей (рис. 1, в).

Астигматизм третьего порядка изображения определяется разностью координат $z'_s - z'_m$, где z'_s, z'_m — осевые координаты изображения внеосевой точки предмета, образованного узкими пучками лучей в сагиттальной и меридиональной плоскостях соответственно; при этом кривизна поверхности изображения определяется соотношением [3]

$$z'_p = \frac{3z'_s - z'_m}{2}.$$

При $z'_s = z'_m$, т. е. при отсутствии астигматизма в изображении точки, координата $z'_p = z'_s = z'_m$. Заметим, что из этой формулы следует практически важное соотношение $z'_s = -z'_m = \frac{1}{2}z'_p$. В общем случае координата z'_p определяется формулой [3]

$$z'_p = -\frac{1}{2n'} W^2 J^2 S_{IV},$$

где W — угловое поле в пространстве предметов; J — инвариант Лагранжа—Гельмгольца: $J = n'\alpha'l' = n'\alpha'(-\beta_1 f')$; при $n'=1, \alpha'=1, \beta_1=1, J=-f'$.

При $f'=1$ $z'_p = -\frac{1}{2} W^2 S_{IV}$.

Если оптическая система состоит из тонких компонентов, то коэффициент

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^{i=m} \left(\sum_{j=1}^{j=\mu} \frac{\varphi_j}{n_j} \right)_i = \sum_{i=1}^{i=m} \frac{\varphi_i}{\tilde{n}_i}, \quad (11)$$

где m — число тонких компонентов; μ — число тонких линз в i -м компоненте; φ_j — оптическая сила j -й линзы в i -м компоненте; n_j — показатель преломления материала j -й линзы; \tilde{n}_i — условный показатель преломления i -го тонкого компонента.

Известно, что хроматическая aberrация положения определяется выражением

$$\delta s'_{xp} = \frac{1}{n'\alpha'^2} S_{Ixp},$$

где

$$S_{Ixp} = -\sum_{i=1}^{i=m} h_i^2 \left(\sum_{j=1}^{j=\mu} \frac{\varphi_j}{v_j} \right)_i = -\sum_{i=1}^{i=m} h_i^2 \frac{\varphi_i}{\tilde{v}_i}, \quad (12)$$

а относительная величина хроматической aberrации увеличения равна $\frac{\Delta y'_{xp}}{y'} = \frac{1}{J} S_{IIxp}$, где

$$S_{IIxp} = -\sum_{i=1}^{i=m} H_i h_i \left(\sum_{j=1}^{j=\mu} \frac{\varphi_j}{v_j} \right)_i = -\sum_{i=1}^{i=m} H_i h_i \frac{\varphi_i}{\tilde{v}_i}. \quad (13)$$

Здесь v_j — коэффициент дисперсии (число Аббе) j -й линзы в i -м компоненте; \tilde{v}_i — условный коэффициент дисперсии i -го тонкого компонента.

При принятой нормировке величин

$$\delta s'_{xp} = S_{Ixp}, \quad \frac{\Delta y'_{xp}}{y'} = -S_{IIxp}.$$

Вполне очевидно [4], что условный коэффициент дисперсии тонкого компонента, состоящего из двух линз, обладающих оптической силой разного знака, может изменяться в интервале $v_{\min} \leq \tilde{v}_i \leq \infty$.

Заметим, что пецвалева кривизна поверхности изображения и хроматические aberrации изображения определяются оптическими силами линз и не зависят от их «прогиба». В случае оптической системы, состоящей из трех тонких компонентов, разделенных воздушными промежутками конечной длины, формулы (11) — (13) можно представить в виде

$$S_{IV} = \frac{\varphi_1}{\tilde{n}_1} + \frac{\varphi_2}{\tilde{n}_2} + \frac{\varphi_3}{\tilde{n}_3}; \quad (14)$$

$$-S_{Ixp} = \frac{\varphi_1}{\tilde{v}_1} + h_2^2 \frac{\varphi_2}{\tilde{v}_2} + h_3^2 \frac{\varphi_3}{\tilde{v}_3}; \quad (15)$$

$$-S_{IIxp} = H_1 \frac{\varphi_1}{\tilde{v}_1} + h_2 H_2 \frac{\varphi_2}{\tilde{v}_2} + h_3 H_3 \frac{\varphi_3}{\tilde{v}_3}. \quad (16)$$

При хорошем исправлении aberrаций положение входного зрачка не влияет на качество изображения. Чтобы упростить вычисления, будем считать, что апертурная диафрагма расположена в плоскости второго компонента. При этом $H_2 = 0$, а высоты H_1 и H_3 удовлетворяют очевидному соотношению

$$\frac{H_1}{d_1} = -\frac{H_3}{d_2}.$$

Отсюда находим, что

$$H_3 = -\frac{d_2}{d_1} H_1.$$

Но $H_1 = a_p \beta_1 = \frac{a'_p \beta_1}{1 - a'_p \varphi_1}$.

При $H_2 = 0$ отрезок $a'_p = d_1$.

При $\beta_1 = 1$ получаем

$$H_1 = \frac{d_1}{1 - \varphi_1 d_1} = \frac{d_1}{h_2}$$

и, соответственно, $H_3 = -\frac{d_2}{h_2}$. Полученные соотношения, а также формулы (4) и (6) позволяют исключить из формул (2) и (15) — (17) величины h_i и H_i .

В случае системы, состоящей из трех тонких линз, профессор Г. Г. Слюсарев дополнил формулы (14) — (16) приближенным выражением вида [5]

$$3,65 \left(H_1 \varphi_1 + \frac{H_2 \varphi_2}{h_2} + \frac{H_3 \varphi_3}{h_3} \right) = S_V. \quad (17)$$

Реализация параметрической модели обобщенного триплета

Если считать, что материалы линз выбраны или заданы, то в полученных пяти уравнениях (2), (14) — (17) неизвестными остаются пять величин: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, d_1$ и d_2 , — найти которые весьма не просто, поскольку уравнения нелинейны относительно указанных неизвестных. В этой связи Г. Г. Слюсарев отмечает [5], что математическая трактовка приводит в большинстве случаев к решениям, не имеющим практического значения, так как соответствующие этим решениям конструкции неосуществимы. Предлагаемая авторами методика, основанная на известной теории [5], позволяет получить приемлемые решения при изменении значения одной из сумм в выражениях (14) — (17) на ничтожно малую величину. Такой искусственный прием дает в результате решения реальную систему конструктивных элементов триплета. В качестве иллюстрации в таблице приведены конструктивные элементы

■ Конструктивные элементы триплета

| Номер поверхности | Радиус, мм | Толщина, мм | Марка стекла | Показатель преломления n_d | Коэффициент дисперсии v_d |
|-------------------|------------|-------------|--------------|------------------------------|-----------------------------|
| 0 | | | | | |
| 1 | 30,00 | 5,70 | ТК16 | 1,6128 | 58,22 |
| 2 | 1100,00 | 6,20 | Воздух | — | — |
| 3 | -74,00 | 1,90 | БФ12 | 1,6259 | 39,11 |
| 4 | 30,00 | 10,30 | Воздух | — | — |
| 5 | 175,00 | 3,80 | ТК16 | 1,6128 | 58,22 |
| 6 | -35,73 | 60,37 | — | — | — |
| Изображение | | | | | |

оптической системы, рассчитанной по этому методу. Схема и aberrации системы представлены на рис. 2 (см. с. 3 обложки).

Для этой системы при $f' = 1$ $S_{IV} = 0,421$, $S_{Ixp} = -0,00444$, $S_{IIxp} = 0,00047$.

Применив формулу $\beta_{i+1} - \beta_i = H_i \varphi_i$, находим, что при $\beta_1 = 1$ угловое увеличение в изображении зрачков

$$\gamma_p = \frac{\beta_4}{\beta_1} = 1 + H_1 \varphi_1 + H_3 \varphi_3 = 1 + \frac{H_1}{d_1} (d_1 \varphi_1 - d_2 \varphi_3).$$

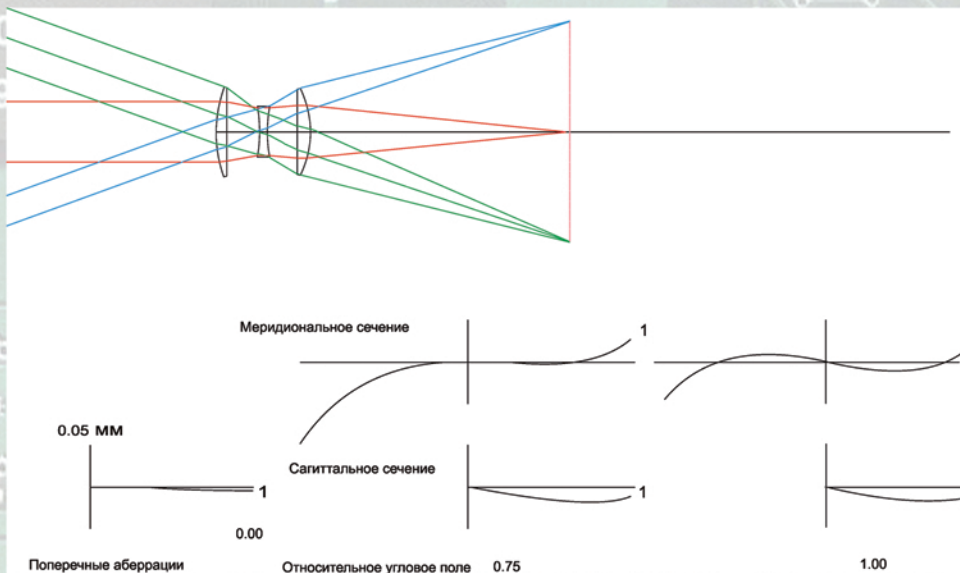
Это выражение можно записать в виде [5]

$$d_1 \varphi_1 - d_2 \varphi_3 - \chi = 0, \quad (18)$$

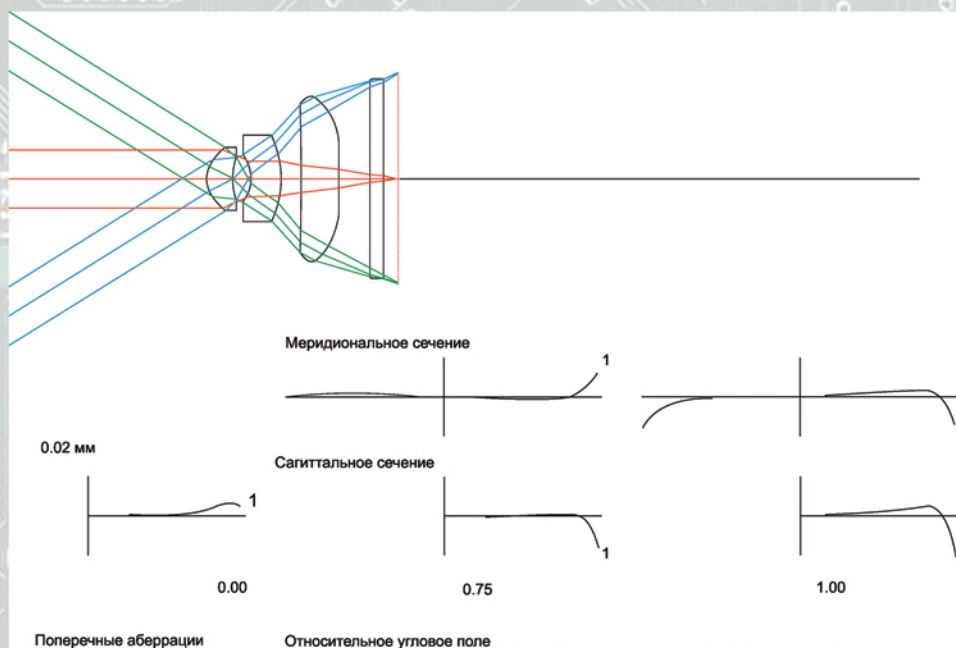
где β_i, β_{i+1} — углы, образованные главными виртуальными (нулевыми) лучами с оптической осью триплета, а величина $\chi = \frac{\gamma_p - 1}{h_2}$.

Известно, что дисторсия изображения, образованного рассматриваемой системой, определяется отступлением от условия синусов и сферической aberrацией в изображении зрачков. Если условие синусов в изображении зрачков соблюдается и сферическая aberrация отсутствует, то только при $\gamma_p = 1^*$ отношение синусов равно отношению тангенсов соответствующих углов и дисторсия в изображении отсутствует. Именно этим определяются коррекционные возможности изменения величины χ , названной М. Береком [6] поправочным членом, влияющим на устранение дисторсии изображения. Заметим, что угловое увеличение в зрачках $\gamma_p = 1^*$ остается неизменным, если соблюдается соотношение $\frac{d_1}{d_2} = \frac{\varphi_3}{\varphi_1}$. Поскольку ход лучей световых пучков через первую

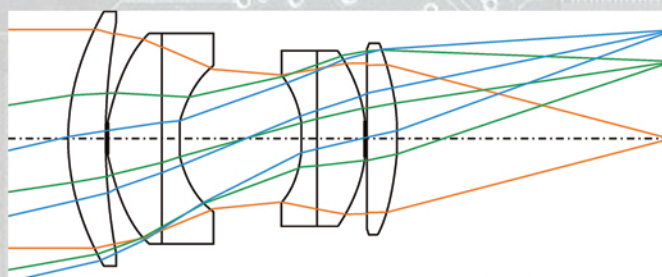
Иллюстрации к статье Р. В. Анитропова, И. Г. Бронштейна, В. Н. Васильева,
В. А. Зверева, И. Л. Лившиц, М. Б. Сергеева, Унчун Чо
«Анализ параметрической модели обобщенного триплета и его применение
в оптико-информационных системах», с. 6–13



■ Рис. 2. Оптическая схема и aberrации триплета



■ Рис. 5. Оптическая схема и графики остаточных aberrаций объектива триплета с асферическими поверхностями



■ Рис. 6. Объектив Гаусса

и третью линзу симметрией относительно средней линзы не обладает, это соотношение может оказаться полезным в процессе поиска варианта сочетания конструктивных параметров из условия наилучшей коррекции aberrаций широкого и узкого пучков лучей.

Рассматриваемую систему уравнений М. Берек назвал системой условий, дополнив ее условием [6]

$$d_1 + d_2 = L, \quad (19)$$

где L — длина триплета. Кроме того, в систему включено условие (18) вместо выражения (17). Представленная система содержит в шести условиях восемь независимых переменных: $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \nu_1, \nu_2, \nu_3, d_1, d_2$ — двумя из которых можно распорядиться. Берек приводит приближенные соотношения, облегчающие решение этих сложных аналитических выражений. Применение метода показано на примере расчета, в результате которого получена следующая оптическая система:

$$\varphi_1 = 2, n_1 = 1,553, \nu_1 = 50;$$

$$\varphi_2 = -3,44, n_2 = 1,631, \nu_2 = 30,2;$$

$$\varphi_3 = 2, n_3 = 1,625, \nu_3 = 43,8;$$

$$d_1 = 0,1, d_2 = 0,1; h_2 = 0,8, h_3 = 0,875.$$

Применив соответствующие соотношения, для этой системы получаем

$$S_{Ixp} = 0,002, S_{IIxp} = 0,010, S_{IV} = 0,410.$$

Из соотношения (14) следует, что

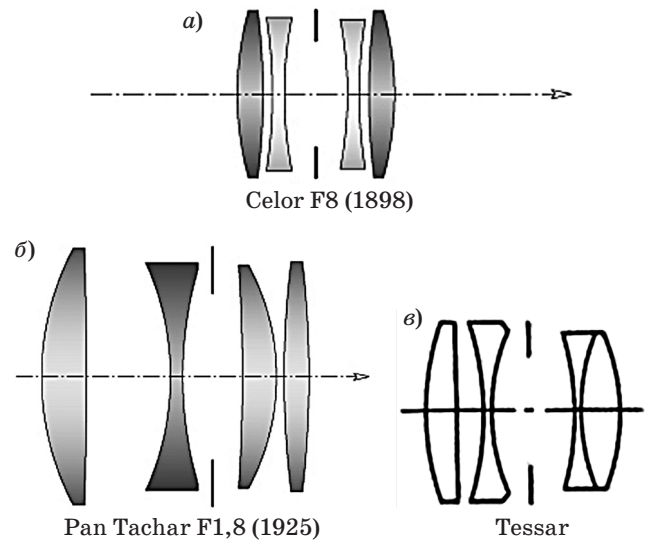
$$\varphi_2 = n_2 S_{IV} - \frac{n_2}{n_1 n_3} (n_3 \varphi_1 + n_1 \varphi_3).$$

Пусть $S_{IV} = 0$. Тогда при $\varphi_1 > 0$ и $\varphi_3 > 0$ оптическая сила $\varphi_2 < 0$, причем при $n_1 < n_2$ и $n_3 < n_2$ величина $|\varphi_2| > \varphi_1 + \varphi_3$. Таким образом, средняя линза триплета обладает наибольшей абсолютной величиной оптической силы. Поэтому естественно предположить, что именно эта линза является причиной появления aberrаций высших порядков.

Развитие схемы обобщенного триплета

В результате замены средней линзы триплета двумя линзами вблизи апертурной диафрагмы, расположенной между ними, появился объектив Celor (рис. 3, а), первый советский аналог этого объектива — «Ортагоз» — разработан профессором И. А. Турыгиным. Этот объектив, также рассчитанный по схеме триплета, пользовался большой популярностью в 30-х годах прошлого столетия.

Были и другие попытки усовершенствовать триплет. Такие фирмы, как Astrohezelshaft, выпускавшая объективы Tachar, и фирма



■ Рис. 3. Варианты развития схемы объектива триплета: а — объектив Celor / «Ортагоз»; б — объектив Tachar (1925) / объектив Слюсарева (1922); в — объектив Tessar / «Индустар»; F — диафрагменное число

Bausch&Lomb заменили базовую линзу двумя тонкими линзами. Объектив подобного типа, схема которого представлена на рис. 3, б, в 1922 г. был разработан Г. Г. Слюсаревым.

Наиболее удачным усовершенствованием схемы триплета была замена простой базовой линзы двойной склеенной (рис. 3, в). Среди объективов такого типа самым распространенным является объектив Tessar, разработанный в 1902 г. сотрудником фирмы «К. Цейсс» доктором П. Рудольфом. Построенные в соответствии с этой оптической схемой, объективы непрерывно совершенствуются и выпускаются в разных странах под разными названиями: «Индустар» (Россия), Ektar (фирма Kodak, США), Elmar (фирма Leitz, Германия), Xenar (фирма Schneider, Германия) и др. Триплеты встречаются и в ранних модификациях фотокамер Rolleiflex TLR, Zeiss Ikonta, Voigtlander Brilliant, китайском Seagull 4A-105, отечественном фотоаппарате «Любитель».

Рассмотрим еще несколько важных соотношений, позволяющих обеспечить оптимальное распределение оптических сил компонентов триплета с точки зрения его aberrационной коррекции.

Из соотношений (4) и (6) следует, что

$$d_1 = \frac{1 - h_2}{\varphi_1}; \quad (20)$$

$$d_2 = \frac{h_2 - h_3}{\varphi_1 + h_2 \varphi_2}. \quad (21)$$

Подставив эти соотношения в выражение (18), получаем

$$(1 - h_2 - \chi)\varphi_1 + h_2(1 - h_2 - \chi)\varphi_2 - (h_2 - h_3)\varphi_3 = 0. \quad (22)$$

Будем считать уравнения (2), (14) и (22) линейными относительно величин φ_1 , φ_2 и φ_3 . Тогда в соответствии с формулами Крамера [7]

$$\varphi_1 = \frac{D_1}{D}; \varphi_2 = \frac{D_2}{D}; \varphi_3 = \frac{D_3}{D},$$

где D_j — определитель. Определитель рассматриваемой системы уравнений можно преобразовать к виду

$$D = h_2 \left(1 - h_3 - \chi \frac{h_3}{h_2} \right) \left(\frac{h_2}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right). \quad (23)$$

Соответственно находим, что определитель

$$D_{\varphi_3} = (1 - h_2 - \chi) \left(\frac{h_2}{n_1} - \frac{1}{n_2} \right), \quad (24)$$

при этом

$$\varphi_3 = \frac{D_{\varphi_3}}{D} = \frac{1 - h_2 - \chi}{h_2 \left(1 - h_3 - \chi \frac{h_3}{h_2} \right)}. \quad (25)$$

Умножим уравнение (14) на n_1 и вычтем его из уравнения (2). В результате получим уравнение, содержащее величины φ_2 и φ_3 . Из этого уравнения находим, что

$$\varphi_2 = \frac{1 - n_1 S_{IV} - \left(h_3 - \frac{n_1}{n_3} \right) \varphi_3}{h_2 - \frac{n_1}{n_2}}. \quad (26)$$

Тогда в соответствии с выражением (2) величина

$$\varphi_1 = 1 - h_2 \varphi_2 - h_3 \varphi_3. \quad (27)$$

Применив соотношения, определяющие H_1 и H_3 , а также соотношение (18), преобразуем выражение (16) к виду

$$\frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1} = \frac{h_3 \left(1 - \frac{\chi}{d_1 \varphi_1} \right)}{1 + \frac{\tilde{v}_1 h_2}{d_1 \varphi_1} S_{IIxp}}. \quad (28)$$

Применив соотношение (20), формулу (28) можно представить в виде

$$\frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1} = \frac{h_3(1 - h_2 - \chi)}{1 - h_2 + \tilde{v}_1 h_2 S_{IIxp}}. \quad (29)$$

Из выражений (28) и (29) следует, что при $S_{IIxp} = 0$ и $\chi = 0$ величина $h_3 = s'_{F'} = \frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1}$. Если при этом

$\tilde{v}_3 = \tilde{v}_1$, то в соответствии с формулой (25) оптическая сила $\varphi_3 = \infty$. Но если $\chi \neq 0$, то

$$\varphi_3 = \frac{D_{\varphi_3}}{D} = \frac{1 - h_2 - \chi}{-\chi}. \quad (30)$$

С другой стороны, если $h_3 = h_2$, то независимо от величины χ оптическая сила $\varphi_3 = 1/h_2$. Если сколь угодно малым изменениям исходных данных могут соответствовать большие изменения решения, то такие задачи принято считать некорректными (точнее, некорректно поставленными) или плохо обусловленными. Следовательно, к таким задачам можно отнести и задачу расчета триплета.

Выражение (15) можно преобразовать к виду

$$\frac{\tilde{v}_2}{\tilde{v}_1} = \frac{h_2^2 \varphi_2}{-\varphi_1 - \frac{\tilde{v}_1}{\tilde{v}_3} h_3^2 \varphi_3 - \tilde{v}_1 S_{Ixp}}. \quad (30)$$

Применив формулу (2), при $h_3 = \frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1}$ получаем

$$\frac{\tilde{v}_2}{\tilde{v}_1} = \frac{h_2^2 \varphi_2}{h_2 \varphi_2 - 1 - \tilde{v}_1 S_{Ixp}}. \quad (31)$$

Если величина h_3 определяется, главным образом, отношением $\frac{\tilde{v}_3}{\tilde{v}_1}$, то величина h_2 входит параметром в формулы (25) — (27), (29) и (31), определяющие конструктивные параметры рассматриваемой оптической системы. Таким образом, задача расчета триплета решается, если величину h_2 считать свободным параметром. При этом в случае оптической системы из трех тонких линз вид формул (25), (26), (29) и (31) позволяет сделать наиболее целесообразный подбор параметров материала линз триплета. В численном примере [8] решена задача расчета триплета при $S_{Ixp} = 0$, $S_{IIxp} = 0$, $S_{IV} = 0,25$, $\chi = 0$. Материалами линз выбраны стекла: ТК9 ($n_{e1} = 1,61993$, $v_{e1} = 53,76$), ТФ2 ($n_{e2} = 1,67762$, $v_{e2} = 31,99$), БФ25 ($n_{e3} = 1,61085$, $v_{e3} = 45,82$). В соответствии с формулой (29) находим

$$h_3 = s'_{F'} = \frac{v_{e3}}{v_{e1}} = 0,852.$$

Пусть $h_2 = 0,75$. Подставив эти значения h_2 и h_3 в формулу (25), получаем $\varphi_3 = 2,25$. Применяя формулу (26), находим, что $\varphi_2 = -4,36$.

Подставив полученные величины в выражение (31), находим коэффициент дисперсии материала второй линзы: $v_{e2} = 30,88$. Полученная величина v_{e2} не равна коэффициенту дисперсии стекла ТФ2. Из формулы (31) находим, что

$$S_{Ixp} = \frac{1}{v_1} (h_2 \varphi_2 - 1) - \frac{1}{v_2} h_2^2 \varphi_2.$$

При $v_2 = v_{e2} = 31,99$ получаем $S_{Ixp} = 0,016$. Чтобы уменьшить величину этого коэффициента, внесем поправку в значение параметра h_2 . Вы-

полним это следующим образом. Полагая $S_{Ixp} = 0$, продифференцируем выражение (31):

$$dv_2 = v_1 h_2 \varphi_2 \frac{h_2 \varphi_2 - 2}{(h_2 \varphi_2 - 1)^2} dh_2 - \frac{v_1 h_2^2}{(h_2 \varphi_2 - 1)^2} d\varphi_2. \quad (32)$$

В результате дифференцирования выражения (26) и выражения (25) при $\chi = 0$ получаем

$$d\varphi_2 = -\frac{1}{h_2 - \frac{n_1}{n_2}} \left[\left(h_3 - \frac{n_1}{n_3} \right) d\varphi_3 + \varphi_2 dh_2 \right]; \quad (33)$$

$$d\varphi_3 = -\frac{dh_2}{h_2^2(1-h_3)}. \quad (34)$$

Соотношения (33) и (34) позволяют выражение (32) преобразовать к виду

$$dv_2 = \frac{v_1}{(h_2 \varphi_2 - 1)^2} \times \left[\frac{1}{h_2 - \frac{n_1}{n_2}} \left(\frac{h_3 - \frac{n_1}{n_3}}{h_3 - 1} + h_2^2 \varphi_2 \right) + h_2 \varphi_2 (h_2 \varphi_2 - 2) \right] dh_2.$$

Вид этого выражения существенно упрощается, если в первом приближении принять $n_1 = n_2 = n_3$. Заменяя при этом дифференциалы конечными разностями, получаем интерполяционную формулу в виде

$$\Delta v_2 = \frac{v_1}{(h_2 \varphi_2 - 1)^2} \left[\frac{1 + h_2^2 \varphi_2}{h_2 - 1} + h_2 \varphi_2 (h_2 \varphi_2 - 2) \right] \Delta h_2. \quad (35)$$

Подставив в эту формулу значения величин из рассматриваемого примера, получаем $\Delta h_2 = 0,016$. При $h_2 = 0,716$ получаем $\varphi_1 = 2,742$, $\varphi_2 = -4,570$, $\varphi_3 = 2,064$; $d_1 = 0,085$, $d_2 = 0,113$. Подставив полученные значения величин в формулу (31), при $S_{Ixp} = 0$ находим, что $v_2 = 32,02$. Тогда при $v_2 = v_{e2} = 31,99$ получаем $S_{Ixp} = 0,0001$. Решим эту же задачу при $S_{IV} = 0$. В этом случае при уточненном значении $h_2 = 0,732$ получаем $\varphi_1 = 3,217$, $\varphi_2 = -5,908$, $\varphi_3 = 2,474$; $d_1 = 0,083$, $d_2 = 0,108$; $S_{Ixp} = 0$.

Из формулы (26) следует, что чем меньше величина коэффициента S_{IV} , т. е. чем меньше кривизна поверхности изображения, тем больше абсолютная величина оптической силы каждой линзы, при этом оптическая сила второй линзы достигает значений, при которых трудно рассчитывать на получение оптической системы, формирующей изображение приемлемого качества, при достаточно высоком относительном отверстии (выше, чем 1 : 4). Этот вывод вполне подтверждают параметры системы последнего примера.

Современные конструкции триплетов

Проверенные временем объективы типа «триплет» досрости до сложнейших современных оптических систем.

Так, триплеты с улучшенными характеристиками используются в качестве объективов биноклей и любительских телескопов, например, эстонско-итальянская фирма William Optics изготавливает высококачественные объективы-триплеты, у которых положительные линзы выполнены из специального флюоритового стекла (FPL-53), при этом за счет специфики примененного оптического материала с высоким коэффициентом дисперсии удается полностью исправить хроматические аберрации.

Триплеты применяются и в качестве луп (рис. 4), они обладают высоким качеством изображения и рассчитываются с увеличением от 10 до 30 крат.

Триплеты с асферическими поверхностями используются в качестве объективов камер для мобильных телефонов (рис. 5 см. с. 3 обложки). Объектив имеет следующие технические характеристики: фокусное расстояние 3,8 мм, относительное отверстие 1 : 2,8; угловое поле в пространстве предметов $2W = 65^\circ$.

Аналогичные триплеты, но с вынесенным вперед входным зрачком находят широкое применение в устройствах видеонаблюдения.

Современные оптико-информационные системы включают в себя множество устройств, объединенных тем, что информация, «собираемая» объективом, поступает на светочувствительный материал приемника изображения (матрицу или систему матриц у цифровых приемников изображения). Информация, полученная таким способом, может обрабатываться и сохраняться на различных носителях — флэш-памяти, оптических дисках, дискетах и др. Примерами таких систем являются видеозаписывающая аппаратура, цифровые фотоаппараты (видеокамеры), web-камеры и др.

Например, оптико-информационная система цифрового аппарата известной фирмы Canon, объектив которой, имеющий эффективное фокусное расстояние (EFL) 50 мм, F1.8, был разработан на основе схемы обобщенного триплета. В этом



■ Рис. 4. Внешний вид современной лупы типа триплет

объективе хорошо исправлена аберрация — кома, в результате он стал исторической вехой в создании объективов благодаря резкому улучшению качества изображения, которое он обеспечивает.

Canon по-прежнему использует конструкцию обобщенного триплета, известного под именем объектива Гаусса (рис. 6 см. с. 3 обложки), в современных объективах, таких как EFL 50 мм, F1.8; EFL 50 мм, F1.0; EFL 50 мм, F1.4; EFL 85 мм, F1.2; EFL 90 мм, F2.8.

Заключение

Результаты выполненного анализа параметрической модели обобщенного триплета позволяют сделать вывод о том, что практически возможно обоснованное определение параметров оптической системы, исходной для последующего аберрационного расчета. Однако эти результаты убеждают и в том, что многопараметрическая система из трех тонких линз обладает достаточно

ограниченными коррекционными возможностями. Поэтому для практического применения необходимо усложнение конструкции этой системы путем замены отдельных линз тонким компонентом из двух линз (метод «дробления» компонентов). При этом оптические силы этих компонентов могут быть как одного, так и разных знаков, причем в последнем случае материалы линз могут иметь разные показатели преломления и коэффициенты дисперсии, а сам компонент может иметь различные значения корригируемых параметров (например, параметров P и W в области аберраций третьего порядка).

Из представленного анализа можно сделать вывод, что коррекционные возможности обобщенного триплета до конца не использованы, его классическая оптическая схема в сочетании с современными технологиями все еще предоставляет оптикам-разработчикам большие возможности по созданию современных высококачественных объективов.

Литература

1. Патент Великобритании № 22607 (GB189322607).
2. Гаврилюк А. В., Лившиц И. Л. Простые оптические апланатические системы // ОМП. 1990. № 4. С. 14–18.
3. Зверев В. А. Основы геометрической оптики: учеб. пособие. СПб.: СПб ГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
4. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1969. — 672 с.
5. Слюсарев Г. Г. Расчет оптических систем. — Л.: Машиностроение, 1975. — 672 с.
6. Берек М. Основы практической оптики. — М.-Л.: ГТТИ, 1933. — 136 с.
7. Бронштейн И. Н., Семендяев К. А. Справочник по математике для инженеров и учащихся ВТУЗов. — М.: ГИТТЛ, 1957. — 608 с.
8. Волосов Д. С. Фотографическая оптика: учеб. пособие для киновузов. — М.: Искусство, 1978. — 543 с.