

## ЗАФОКАЛЬНЫЕ И ПРЕДФОКАЛЬНЫЕ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Канд. техн. наук АРТЮХИНА Н. К., асп. МИЦКЕВИЧ Э. П.

Белорусский национальный технический университет

Исследуя потенциал двухзеркальных систем со сферическими поверхностями для поиска новых решений, представляется разумным разграничить области, классифицируя возможные и уже известные типы систем по ходу нулевого луча в системе. Под двухзеркальными системами мы понимаем системы, содержащие два зеркала, участвующие в построении изображения. Первое зеркало по ходу луча называют главным, диаметр которого  $D_1$ , а второе зеркало обычно называется вторичным. Каждое из зеркал не плоское и меняет сходимости и аберрации пучка. При этом такая система может содержать произвольное число плоских дополнительных зеркал.

В этой работе используются формулы [1], соединяющие конструктивные параметры с коэффициентами Зейделя, при условии, что центр входного зрачка оптической системы совпадает с вершиной ее первой преломляющей поверхности:

$$\begin{aligned} v_s &= \frac{1}{n_s}; \\ h_{s+1} &= h_s - a_{s+1}d_s; \\ r_s &= h_s \frac{v_s - v_{s+1}}{v_s a_{s+1} - v_{s+1} a_s}; \\ S_s &= \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{s-1} \frac{v_{k+1} d_k}{h_k h_{k+1}}; \quad S_1 = 0; \\ Q_s &= T_s \sigma_s + P_s; \\ T_s &= \frac{(v_s a_{s+1} - v_{s+1} a_s)^3}{v_s v_{s+1} (v_{s+1} - v_s)^2}; \end{aligned}$$

$$P_s = \frac{(a_{s+1} - a_s)^2}{(v_{s+1} - v_s)^2} (v_{s+1} a_{s+1} - v_s a_s);$$

$$W_s = \frac{a_{s+1} - a_s}{v_{s+1} - v_s} (v_{s+1} a_{s+1} - v_s a_s);$$

$$B_0 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s Q_s;$$

$$K_0 = -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s Q_s;$$

$$C_0 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{v_{s+1} a_{s+1} - v_s a_s}{h_s} - \sum_{s=1}^{s=m} S_s W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s^2 Q_s;$$

$$D_0 = \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{v_s a_{s+1} - v_{s+1} a_s}{h_s} + C_0;$$

$$\begin{aligned} E_0 &= -\frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} \frac{v_{s+1}^2 - v_s^2}{h_s^2} + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s \frac{v_s a_{s+1} - v_{s+1} a_s}{h_s} + \\ &+ \frac{3}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s^2 \frac{v_{s+1} a_{s+1} - v_s a_s}{h_s} - \frac{3}{2} \sum_{s=1}^{s=m} S_s^2 W_s + \frac{1}{2} \sum_{s=1}^{s=m} h_s S_s^3 Q_s. \end{aligned}$$

Следует учесть, что при сферической поверхности  $\sigma_s = 0$ , а следовательно,  $Q_s = P_s$ .

Рассматривая ход нулевого луча в двухзеркальных системах, создающих реальное изображение, возможны три прототипа, к которым математически можно свести все многообразие решений в области двухзеркальных систем.

В табл. 1 дана классификация систем в зависимости от угла падения нулевого луча на вторичное зеркало  $a_2$ .

Таблица 1

**Классификация двухзеркальных  
телескопических объектов**

| Тип двухзеркальной системы | Ход нулевого луча в системе                                     |
|----------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 1 (предфокальные системы)  | $\alpha_1 = 0; \alpha_2 > 0; \alpha_3 = 1; h_1 = 1; f' = 1$     |
| 2 (предфокальные системы)  | $\alpha_1 = 0; \alpha_2 < 0; \alpha_3 = 1; h_1 = 1; f' = -1$    |
| 3 (зафокальные системы)    | $\alpha_1 = 0; \alpha_2 \ll 0; \alpha_3 = -1; h_1 = 1; f' = -1$ |

Угол падения луча на вторичное зеркало можно использовать в качестве переменной и фиксируя расстояние между зеркалами. Таким

образом мы получаем ряд систем в пределах одного типа. Имея возможность связать коэффициенты aberrаций третьего порядка с конструктивными параметрами системы, можно построить графики зависимости этих коэффициентов от такого параметра, как угол падения нулевого луча на вторичное зеркало  $a_2$ . Каждому значению  $a_2$  соответствует определенная система для определенного значения положения зеркал  $d_1$ . Результаты расчетов представлены в табл. 2–4.

Графические схемы трёх типов двухзеркальных телескопических систем представлены на рис. 1 в соответствии с классификацией по табл. 1.

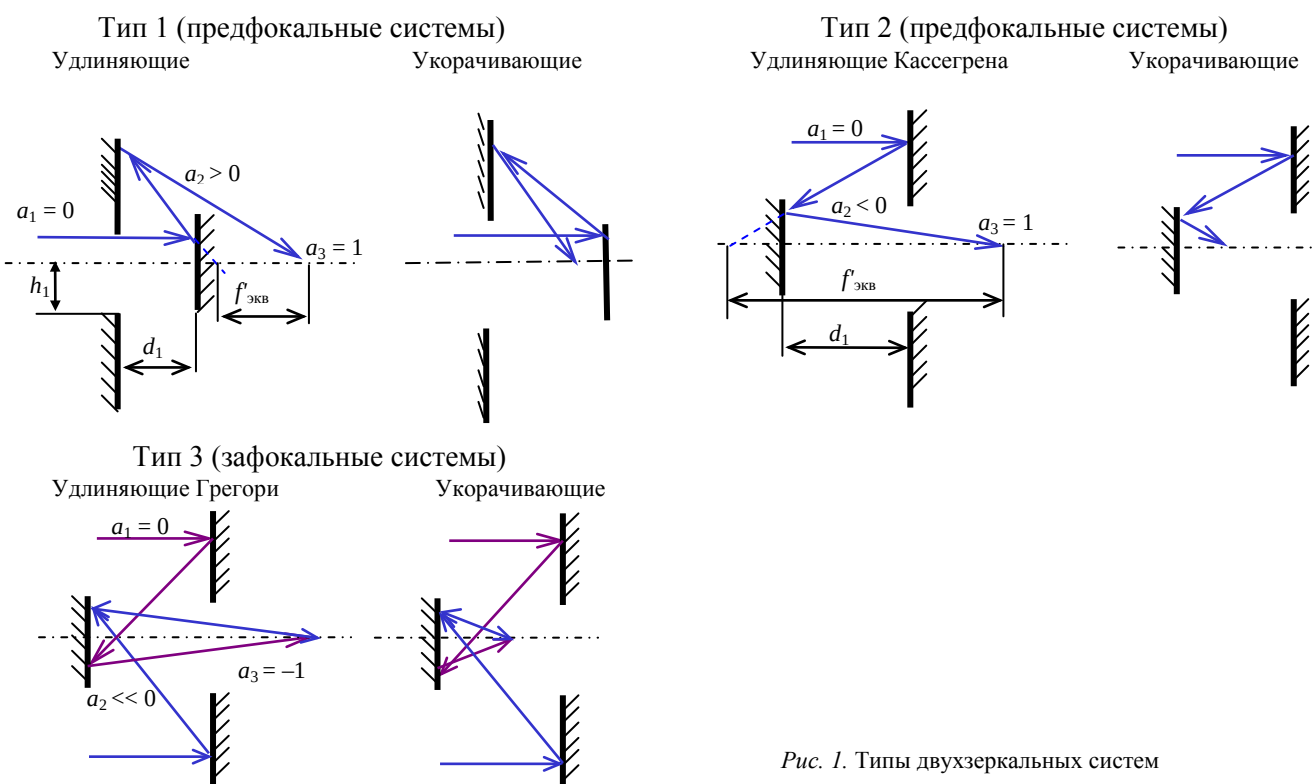


Рис. 1. Типы двухзеркальных систем

Рассмотрим первый тип.

Таблица 2

**Зависимость коэффициентов aberrаций и конструктивных параметров от  $a_2$  для первого типа систем**

| $a_2$ | $r_1$ | $r_2$ | $d_1$ | $d_2$ | $B_0$ | $K_0$  | $C_0$ | $D_0$ | $E_0$ |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| 0,3   | 6,67  | 1,77  | -0,5  | 1,15  | 0,09  | -0,210 | 0,23  | -0,18 | 0,47  |
| 0,5   | 4,00  | 1,67  | -0,5  | 1,25  | 0,04  | -0,23  | 0,21  | -0,14 | 0,55  |
| 0,7   | 2,86  | 1,59  | -0,5  | 1,35  | -0,02 | -0,24  | 0,19  | -0,09 | 0,60  |
| 0,9   | 2,22  | 1,53  | -0,5  | 1,45  | -0,09 | -0,25  | 0,17  | -0,03 | 0,65  |
| 1,0   | 2,00  | 1,50  | -0,5  | 1,50  | -0,13 | -0,25  | 0,17  | 0,00  | 0,67  |
| 1,1   | 1,82  | 1,48  | -0,5  | 1,55  | -0,16 | -0,25  | 0,16  | 0,03  | 0,68  |
| 1,2   | 1,67  | 1,46  | -0,5  | 1,60  | -0,20 | -0,25  | 0,16  | 0,07  | 0,70  |
| 1,3   | 1,54  | 1,44  | -0,5  | 1,65  | -0,23 | -0,24  | 0,16  | 0,11  | 0,71  |
| 1,8   | 1,11  | 1,36  | -0,5  | 1,90  | -0,30 | -0,14  | 0,161 | 0,32  | 0,75  |

Таблица 3

Зависимость коэффициентов аберраций и конструктивных параметров от  $a_2$  для второго типа систем

| $a_2$ | $r_1$  | $r_2$ | $d_1$ | $d_2$ | $B_0$ | $K_0$ | $C_0$ | $D_0$ | $E_0$  |
|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| -0,1  | -20,00 | 2,13  | -0,4  | 0,96  | 0,13  | -0,2  | 0,33  | -0,18 | 0,21   |
| -0,4  | -5,00  | 2,80  | -0,4  | 0,84  | 0,13  | -0,19 | 0,38  | -0,17 | -0,04  |
| -0,5  | -4,00  | 3,20  | -0,4  | 0,80  | 0,13  | -0,19 | 0,40  | -0,16 | -0,16  |
| -0,8  | -2,50  | 6,80  | -0,4  | 0,68  | 0,12  | -0,22 | 0,46  | -0,09 | -0,63  |
| -0,98 | -2,04  | 60,80 | -0,4  | 0,61  | 0,12  | -0,25 | 0,50  | -0,01 | -1,05  |
| -1,2  | -1,67  | -5,20 | -0,4  | 0,52  | 0,15  | -0,30 | 0,54  | 0,13  | -1,82  |
| -1,4  | -1,43  | -2,20 | -0,4  | 0,44  | 0,22  | -0,37 | 0,58  | 0,33  | -2,91  |
| -1,5  | -1,33  | -1,60 | -0,4  | 0,40  | 0,27  | -0,41 | 0,60  | 0,47  | -3,67  |
| -1,6  | -1,25  | -1,20 | -0,4  | 0,36  | 0,33  | -0,45 | 0,61  | 0,64  | -4,65  |
| -1,7  | -1,18  | -0,43 | -0,5  | 0,15  | 0,52  | -0,57 | 0,60  | 2,09  | -13,96 |
| -1,8  | -1,11  | -0,25 | -0,5  | 0,10  | 0,65  | -0,64 | 0,54  | 3,64  | 10,00  |

Таблица 4

Зависимость коэффициентов аберраций и конструктивных параметров от  $a_2$  для третьего типа систем

| $a_2$ | $r_1$ | $r_2$ | $d_1$ | $d_2$ | $B_0$ | $K_0$ | $C_0$ | $D_0$ | $E_0$  |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| -0,85 | -2,35 | 0,30  | -1,5  | 0,27  | 0,08  | -0,26 | 4,59  | 0,80  | -60,59 |
| -0,90 | -2,22 | 0,37  | -1,5  | 0,35  | 0,09  | -0,25 | 3,59  | 0,42  | -37,09 |
| -1,20 | -1,67 | 0,73  | -1,5  | 0,80  | 0,23  | -0,27 | 1,59  | -0,38 | -6,88  |
| -1,25 | -1,60 | 0,78  | -1,5  | 0,88  | 0,26  | -0,28 | 1,47  | -0,44 | -5,71  |
| -1,30 | -1,54 | 0,83  | -1,5  | 0,95  | 0,3   | -0,29 | 1,38  | -0,48 | -4,79  |
| -1,38 | -1,45 | 0,90  | -1,5  | 1,07  | 0,37  | -0,32 | 1,26  | -0,50 | -3,71  |
| -1,50 | -1,33 | 1,00  | -1,5  | 1,25  | 0,52  | -0,37 | 1,14  | -0,61 | -2,62  |
| -1,80 | -1,11 | 1,21  | -1,5  | 1,70  | 1,11  | -0,59 | 1,03  | -0,69 | -1,23  |
| -2,00 | -1,00 | 0,13  | -0,6  | 0,20  | 1,07  | -0,48 | 4,67  | -3,82 | -64,88 |
| -2,10 | -0,95 | 0,44  | -0,8  | 0,68  | 1,48  | -0,63 | 1,76  | -1,56 | -6,22  |

Результаты исследования показывают, что системы, относящиеся к первому типу, имеют низкие значения коэффициентов аберраций по сравнению с двумя другими, далее представленными на всем варьируемом диапазоне от 0,1 до 2,2 параметра  $a_2$ . Существенным недостатком двухзеркальных систем, ограничивающим их использование, является высокое центральное экранирование. Чем больше значение угла  $a_2$ , тем больше высота второго зеркала, что позволяет уменьшить центральное экранирование (рис. 2). Представленные в табл. 2 системы первого типа имеют фокусное расстояние, равное единице:  $f' = 1$ .

Системы первого типа позволяют построить системы, достаточно хорошо исправленные относительно аберраций третьего порядка. К недостаткам следует отнести значительные

габариты таких систем, а также очень высокое центральное экранирование для систем первого типа, у которых  $a_2$  лежит в диапазоне от 0,8 до 1,4. Хотя последний недостаток является и своего рода преимуществом, так как центральное экранирование увеличивает контраст изображения. Использование источника света с соответствующим распределением излучения позволит полностью или частично уменьшить потери излучения.

Рассмотрим второй тип двухзеркальных систем.

Как видно из результатов расчетов, системы второго типа имеют гораздо лучшую геометрию как относительно поперечных, так и продольных габаритов, что позволило снизить коэффициент экранирования. Недостатком систем второго типа является большое значение неизопланатизма.

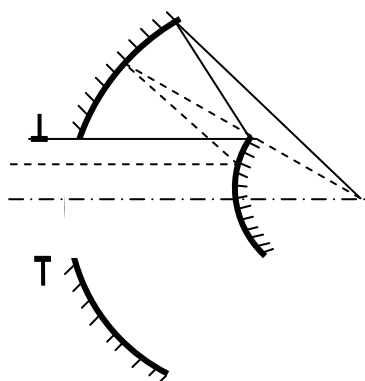


Рис. 2. Двухзеркальная система первого типа  $a_2 = 2,0$ ;  
 $d_2 = -7,9$  мм;  $r_1 = 10$  мм;  $r_2 = 17,2$  мм;  $f = 10$  мм

Работая с формулами, мы пришли к выводу, что для поиска новых систем имеется только два свободных параметра, причем радиус главного зеркала зависит от расстояния между зеркалами  $d_1$  и углом  $a_2$ . Увеличение фиксируемого параметра  $d_1$  ведет к повышению коэффициентов aberrаций третьего порядка.

Рассмотрим третий тип двухзеркальных систем. В этом случае гораздо сложнее получить систему с низким коэффициентом экранирования и хорошим исправлением aberrаций.

Удлиняющие системы третьего типа будут лучше, чем укорачивающие исправлены относительно aberrаций третьего порядка. Однако необходима коррекция сферической aberrации через введение асферической поверхности на одном из зеркал. Также для последней системы

следует предусмотреть экранирование изображения от паразитной засветки.

## ВЫВОД

Наиболее интересными решениями являются системы первых двух типов. Системы первого типа со значениями параметра  $a_2 = 0,4-0,8$  и  $1,4-2,2$  при оптимально выбранном расстоянии между зеркалами позволяют получить наилучшее качество изображения. Диапазон  $a_2 = 0,8-2,2$  для первого типа систем выпадает из-за высокого центрального экранирования. Однако для систем второго типа именно в этом диапазоне находятся приемлемые решения в случае верно выбранного расстояния между зеркалами.

Системы третьего типа показали себя как малоперспективные.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Чуриловский, В. Н.** Теория оптических приборов / В. Н. Чуриловский. – М.: Машиностроение, 1966. – С. 138–143.
2. **Михельсон, Н. Н.** Оптические телескопы. Теория и конструкция / Н. Н. Михельсон. – М.: Наука, 1976.
3. **Бездидько, С. Н.** Исследование aberrационных характеристик зеркального объектива Кассегрена: сб. тр. «ПО-2002» / С. Н. Бездидько. – М., 2002. – Т. 3
4. **Laikin, M.** Modern lens design; Second Edition / M. Laikin, Marcel Dekker, Inc., 1992.

Поступила 25.05.2007