

УДК 535.317; 681.7

**ЗЕРКАЛЬНЫЕ КОНЦЕНТРИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ С РАЗЛИЧНЫМ ЧИСЛОМ ОТРАЖЕНИЙ**Артюхина Н.К.<sup>1</sup>, Алешкевич К.В.<sup>1</sup>, Стуканова В.А.<sup>1</sup>, Самбрано Лус Фабиола<sup>2</sup><sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет

Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Центр астрономических исследований им. Франсиско Х.Дуарте (CIDA)

Мерида, Венесуэла

**Аннотация.** Представлен анализ базовых схем и результаты расчета зеркальных концентрических систем с различным числом отражений от поверхностей зеркал.

**Ключевые слова:** зеркальный объектив, коррекция aberrаций, качество изображения.

**MIRROR CONCENTRIC SYSTEMS WITH DIFFERENT NUMBER OF REFLECTIONS**Artyukhina N.K.<sup>1</sup>, Aleshkevich K.V.<sup>1</sup>, Stukanova V.A.<sup>1</sup>, Zambrano L.F.<sup>2</sup>,<sup>1</sup>Belarusian National Technical University

Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Francisco H. Duarte Center for Astronomical Research

Merida, Venezuela

**Abstract.** The analysis of basic schemes and calculation results of mirror concentric systems with a different number of reflections from mirror surfaces are presented.

**Key words:** mirror lens, aberration correction, image quality.

Адрес для переписки: Алешкевич К.В., ул. Я. Коласа, 22 – 604, а, г. Минск, 220013, Республика Беларусь  
e-mail: kari.alyshkevich@gmail.com.

При конструировании зеркального объектива возникает сложность борьбы с aberrациями путем наращивания числа оптических элементов, составляющих объектив. Хотя из-за отсутствия хроматических aberrаций число элементов может быть существенно меньшим по сравнению с линзовыми, но в силу своей непрозрачности зеркала способны эффективно затенять друг друга и закрывать путь для прохождения лучей. Существуют различные алгоритмы оптотехнических расчетов, которые позволяют находить такие сочетания форм и расположения зеркал, при которых осуществляются эффективно и компенсация aberrаций, и прохождение пучков лучей.

Среди группы зеркальных систем следует отметить концентрические, которые теоретически могут развивать относительное отверстие более 1:1 и поле зрения свыше 20° [1]. Особенностью таких систем является то, что при расположении входного зрачка в центре кривизны зеркальных поверхностей отсутствуют aberrации: комы, астигматизма и дисторсии ( $S_{II} = S_{III} = S_V = 0$ ). Кривизна поверхности изображения 3-го порядка не подлежит исправлению. Сферическая aberrация в общем случае не исправлена.

Цель работы – определить соотношения между конструктивными параметрами концентрической системы, при которых сферическая aberrация окажется скорригированной и сохраняется высокое качество изображения.

В процессе выполнения работы проанализированы конструкции зеркальных систем с различным числом отражений. Рассмотрены две схемы,

где световой луч претерпевает два последовательных отражения: от выпуклого и затем от вогнутого зеркала (рисунок 1).

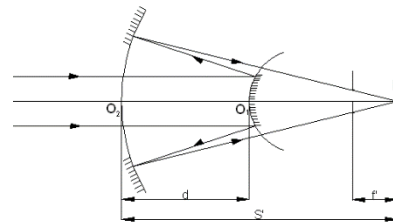


Рисунок 1 – Ход луча от удаленного предмета

При составлении алгоритма расчета получены уравнения, определяющие сферическую aberrацию 3-го порядка (сумм Зейделя) [2]. Имеем уравнение aberrационной коррекции сферической aberrации при расположении предмета на конечном расстоянии при следующих условиях нормировки:

$$\alpha_1 = \beta, \alpha' = 1, n_1 = -n_2 = n_3 = 1, h_1 = s_1 \beta.$$

$$\begin{aligned} \bar{S}_I = & \frac{\kappa^3}{4(\kappa-1)^3} \{S_1 \beta^3 [2\beta(1 - \frac{1}{\kappa}) + S_1 \beta] + [S_1 \beta + \\ & + \frac{2(\kappa-1)^2}{\kappa} \beta f' + 2(\kappa-1)S_1 \beta f'] \times \\ & \times [1 - \frac{1}{\kappa} - \beta(1 - \frac{1}{\kappa}) - S_1 \beta]^2 [1 - \frac{1}{\kappa} + S_1 \beta]\}. \end{aligned}$$

В результате анализа уравнения и проведения численных расчетов с использованием компьютерного пакета прикладных программ «Опал» найдены приближенные зависимости  $k = f(\beta)$  при исправлении сферической aberrации ( $S_I = 0$ ). Параметр  $k = r_2/r_1$ ,  $\beta$  – линейное увеличение.

$$k = 0,382 + 0,660\beta \text{ при } \beta = -(0-0,2^X);$$

$$k = 2,618 - 5/\beta \text{ при } \beta = -(10^X-100).$$

Графическая интерпретация результатов расчета представлена на рисунке 2.

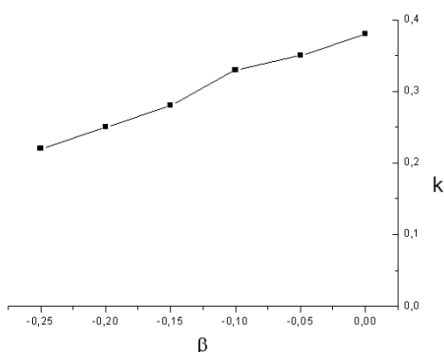


Рисунок 2 – Схема выбора конструктивных параметров зеркального объектива

Меняя условия нормировки для схемы (рисунок 1):  $\alpha_1 = 0$ ,  $\alpha' = 1$ , формула сферической аберрации 3-го порядка упрощается:

$$\bar{S}_1 = -\frac{1}{4} \left( \frac{2k-1}{k-1} \right)^2.$$

Соответственно значения параметра  $k$ :

$$k = 0,382, k = 2,618 \text{ при } S_1 = 0.$$

При необходимости коррекции сферической аберрации высшего порядка следует незначительно изменить отношение  $k = r_1/r_2$ , оставляя прежнюю коррекцию:  $S_{II} = S_{III} = S_V = 0$ .

В ходе работы были проанализированы варианты конструкции концентрических объективов с тремя и четырьмя отражениями, обеспечивающие получение изображения высокого качества при оптимальных конструктивных параметрах. На основе представленной методики были предложены модификации с асферическими зеркалами при оптимизации базового концентрического зеркального модуля.

На рисунке 3 представлены схемы концентрического двухзеркального объектива с четырьмя отражениями от сферических зеркал, расположенных на расстоянии равной разности радиусов их кривизны и объектива, состоящего из двух гиперболических зеркал, основными достоинствами которых являются простота конструкции и изготовления.

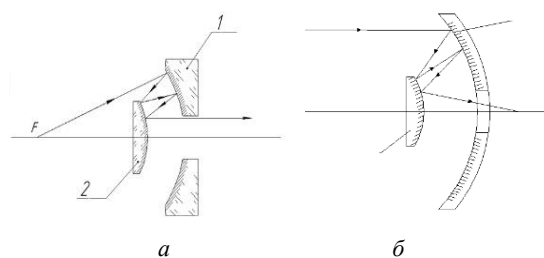


Рисунок 3 – Двухзеркальные объективы с четырьмя отражениями: а – концентрический двухзеркальный объектив; б – объектив из двух гиперболических зеркал

В работе также проанализированы конструкции объектива, состоящие из трех вогнутых концентрических зеркал, обеспечивающие анастигматическую коррекцию [3].

Получены результаты:

- предложенные аналитические выражения позволяют значительно упростить поиск конструкций концентрических двухзеркальных объективов с заданными характеристиками, сферическая аберрация которых исправлена;
- проведено моделирование и расчет двух и трехзеркальных концентрических объективов для различных технических характеристик;
- предложенные оптические модули позволяют получать изображение, как в фокальной плоскости, так и в бесконечности, что дает возможность их применения в различного рода приборах, не ограничивая при этом спектральную область использования, в связи с отсутствием преломляющих элементов;
- введение дополнительных элементов усложняет конструкцию и может значительно влиять на ее габаритные размеры, но они обеспечивают компактность схем при заданной коррекции аберраций [3].

#### Литература

1. Попов, Г.М. Современная астрономическая оптика / Г.М. Попов. – Л. : Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 192 с.
2. Запрягаева, Л.А. Расчет и проектирование оптических систем / Л.А. Запрягаева, И.С. Свешникова. – М. : Логос, 2000. – 584 с.
3. Артюхина, Н.К. Синтез зеркальных светосильных объективов с плоским зеркалом / Н.К. Артюхина // Метрология и приборостроение. – 2019. – № 1 – С. 28–33.