

# 02, февраль 2016

УДК 681.7.067.23

## **Трёхзеркальный длиннофокусный объектив без центрального экранирования**

*Дашкевич А.В., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Хохлов Д.Д., студент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»*

*Научный руководитель: Батшев В.И., к.т.н, доцент  
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
кафедра «Лазерные и оптико-электронные системы»  
[batshev.vlad@gmail.ru](mailto:batshev.vlad@gmail.ru)*

### **Введение**

В современной астрономии широко используются длиннофокусные зеркальные и зеркально-линзовые системы. В простейшем случае такие системы являются двухзеркальными апланатами, свободными от сферической аберрации и комы. Однако, для таких систем астигматизм и кривизна поля не исправлены, и для коррекции этих полевых аберраций требуется включать в оптическую схему линзовые корректоры. В свою очередь, линзовые компоненты, входящие в состав корректоров, ограничивают спектральный диапазон работы объектива, что является нежелательным фактором. Для получения длиннофокусных астрономических систем, целесообразно использовать трёхзеркальные системы. В таких оптических системах могут быть получены близкие к нулю сферическая аберрация, кома, астигматизм, а также кривизна поверхности изображения. Более того, они имеют большее количество варьируемых конструктивных параметров. При выборе наиболее подходящей схемы такой системы одним из ключевых факторов является влияние экранирования части входного зрачка. Для того, чтобы исключить экранирование, используются внеосевые оптические системы.

Наиболее известными являются системы, предложенные Лэси Ж. и Куком [4], а также система с зеркалами Манжена и эксцентричным полем изображения, разработанная В.И. Заварзиным, С.О. Кравченко и С.А. Морозовым [5].

Первая упомянутая система состоит из трёх асферических зеркал с различными параметрами. При этом во избежание экранирования пучка выпуклым зеркалом, все три зеркала разносятся в пространстве таким образом, что главные лучи, помимо наклона в меридиональной плоскости, приобретают наклон в сагиттальной плоскости. Такое сочетание конструкции зеркал и их взаимного расположения очень существенно усложняет процедуры изготовления, сборки и юстировки триплета.

Вторая система [5], в отличие от триплета Кука [4], является эксцентричной только в меридиональной плоскости. Однако, её схема предполагает применение зеркала Манжена и внеосевого мениска, что сужает её рабочий спектральный диапазон. Оптическая схема трёхзеркального объектива с зеркалом Манжена приводится на рис.1.

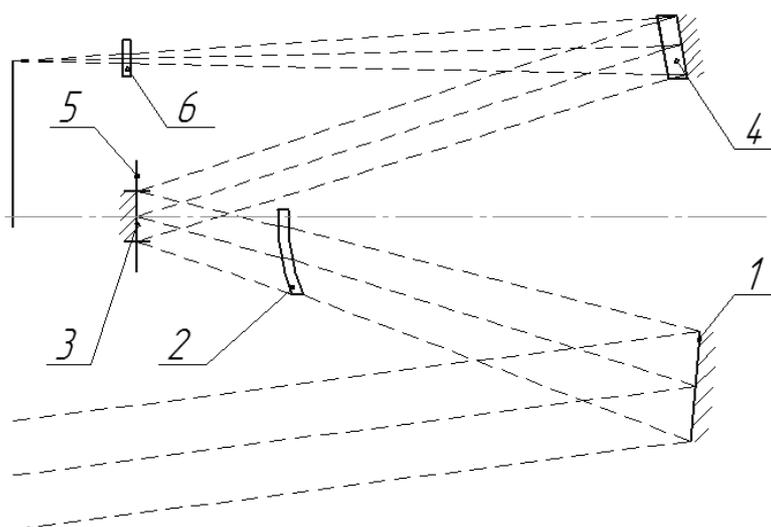


Рис. 1. Оптическая схема трёхзеркального объектива с зеркалом Манжена

Как видно из рисунка, компоненты системы взаимно расположены в меридиональной плоскости произвольным образом, а, следовательно, задача юстировки такой системы также представляется непростой.

Нами предлагается более простая система, состоящая из главного асферического и вторичного сферического зеркал. От главного зеркала лучи отражаются дважды, что переводит систему в разряд трехзеркальных.

Методика расчета предложенной системы, изображенной на рис. 2, заключается в том, что сначала, рассчитывается исходная осесимметричная система с центральным экранированием, а затем выделяется ее внеосевая часть.

## 1. Методика расчёта исходной зеркальной системы объектива с центральным экранированием

Конструктивные параметры и суммы Зейделя выражаются через соотношения с коэффициентом экранирования  $\eta$  [3].

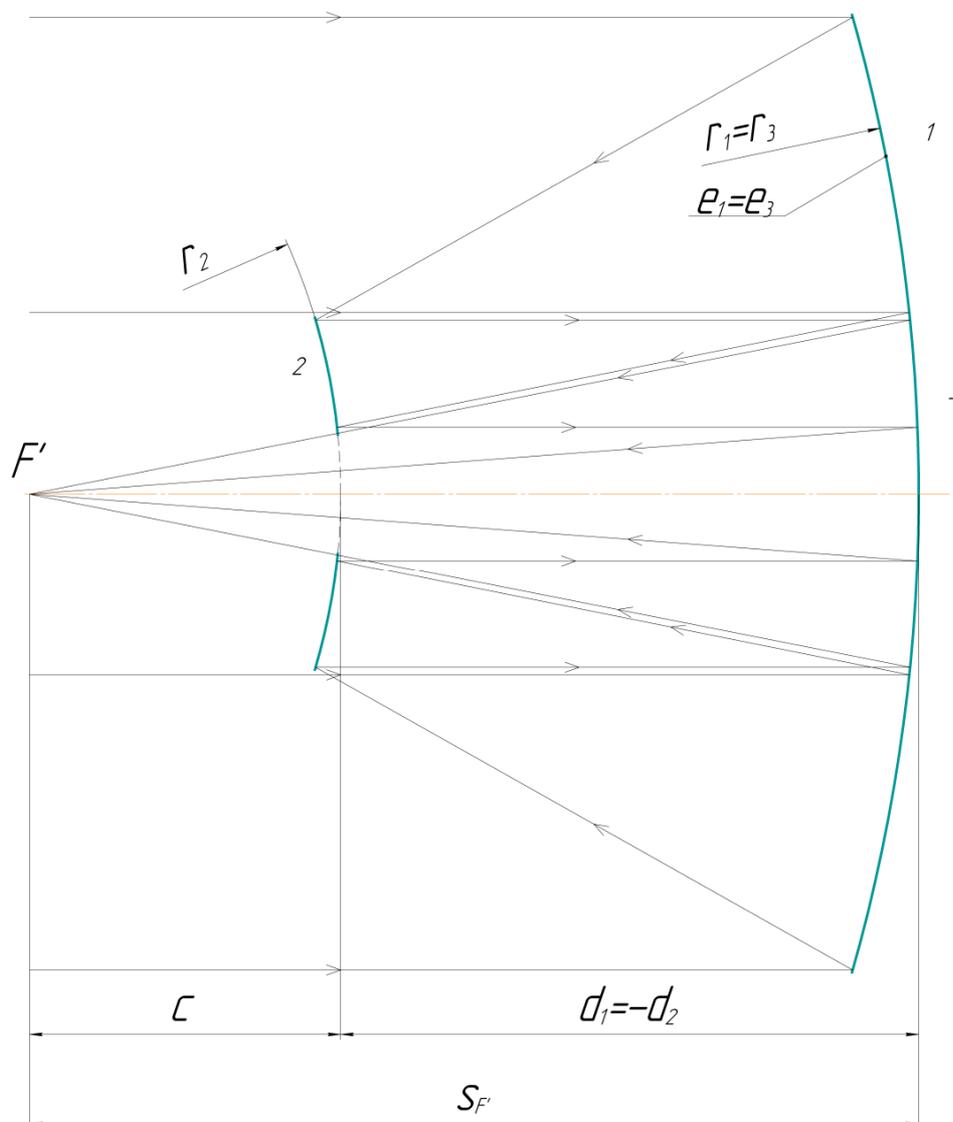


Рис. 2. Исходная ОС трехзеркального объектива

Считаем, что оптическая система приведена к единичному фокусному расстоянию ( $f' = 1$ ), оптическая сила главного зеркала  $\Phi_1$ :

$$\Phi_1 = \frac{1}{\eta}, \quad (1)$$

и его радиус кривизны при вершине  $r_1$ :

$$r_1 = -2\eta. \quad (2)$$

Оптическая сила контрзеркала  $\Phi_2$ :

$$\Phi_2 = -\frac{1}{\eta^2} \quad (3)$$

и радиус кривизны при вершине контрзеркала  $r_2$ :

$$r_2 = -2\eta^2. \quad (4)$$

Осевое расстояние между зеркалами  $d_1$  определим, исходя из следующей формулы:

$$d_1 = -d_2 = \frac{\eta - 1}{\Phi_1} = \eta(\eta - 1). \quad (5)$$

Вынос задней фокальной плоскости за вершину контрзеркала определяется как:

$$c = -(\eta + d_1) = -\eta^2. \quad (6)$$

Задний фокальный отрезок объектива может быть найден по формуле:

$$s'_{F'} = -\eta. \quad (7)$$

Аберрационные коэффициенты (суммы Зейделя) также выражаются через коэффициент экранирования  $\eta$ . Так, первая сумма Зейделя системы сферических зеркал будет равна:

$$S_I = \frac{\eta - 1 - \eta^4}{4\eta^3}. \quad (8)$$

Так как для исправления сферической аберрации зеркального объектива используется асферизация главного зеркала, квадрат его эксцентриситета равен:

$$e_1^2 = e_3^2 = \frac{1 - \eta + \eta^4}{1 + \eta^4}. \quad (9)$$

Вторая сумма Зейделя, определяющая кому:

$$S_{II} = \frac{2\eta^6 + \eta^4 - \eta^3 + 2\eta^2 - \eta + 1}{4\eta^2(1 + \eta^4)}. \quad (10)$$

Формула для третьей суммы Зейделя:

$$S_{III} = \frac{-4\eta^7 - 2\eta^5 + 3\eta^4 - 4\eta^3 - 2\eta + 1}{4\eta^2(\eta^4 + 1)}. \quad (14)$$

Кривизна поля изображения:

$$S_{IV} = \frac{2\eta + 1}{\eta^2}. \quad (15)$$

Дисторсия определяется пятой суммой Зейделя:

$$S_V = \frac{6\eta^8 - 7\eta^6 - 2\eta^5 + 7\eta^4 + 2\eta^3 - 7\eta^2 + 1}{4\eta^2(\eta^4 + 1)}. \quad (16)$$

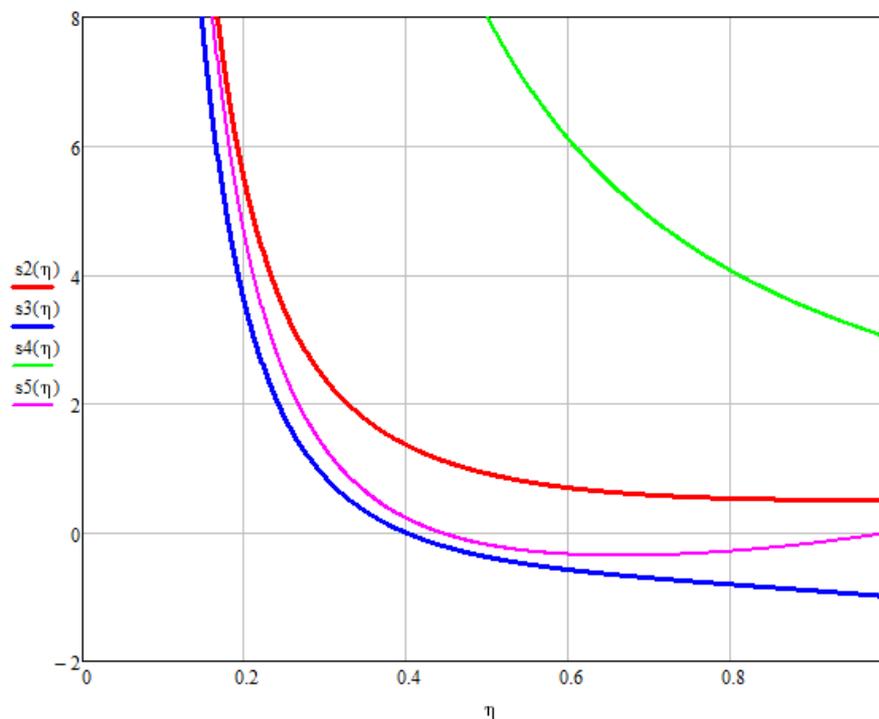


Рис. 3. Графики зависимости второй, третьей, четвертой и пятой сумм Зейделя от коэффициента центрального экранирования

На основании графических зависимостей сумм Зейделя от коэффициента центрального экранирования, приведённых на рис. 3, можно сделать вывод о том, что оптимальным, с точки зрения монохроматических aberrаций третьего порядка, диапазоном значений коэффициента экранирования будет диапазон 0,3...0,5.

## 2. Расчет параметров внеосевой системы

Оптическая схема зеркального объектива без центрального экранирования приведена на рисунке 4.

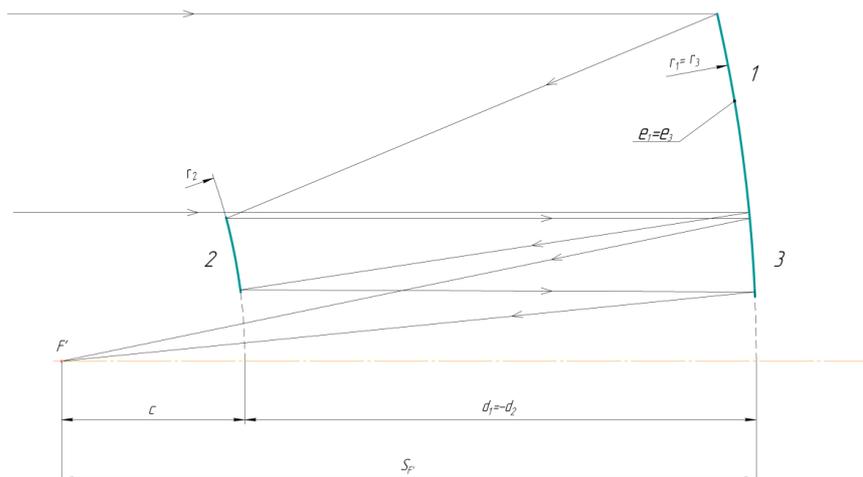


Рис. 4. ОС зеркального объектива без центрального экранирования

Как видно из п.1 ключевой параметр, определяющий конструктивные характеристики – коэффициент экранирования. Поэтому при проектировании системы без центрального экранирования важно правильно выбрать значение коэффициента экранирования исходной системы. Рассмотрим влияние коэффициента экранирования на габариты системы в рамках диапазона  $\eta = 0.3 \dots 0.5$ , выбранного ранее. Для наглядности приведем функциональные зависимости габаритных соотношений от коэффициента экранирования. Поперечные габариты системы будут определяться, как половина диаметра главного зеркала осевой системы  $D_0$ , для которого справедливо соотношение:

$$\frac{D_0}{2} = \frac{D}{1 - \eta}, \quad (17)$$

где  $D$  – диаметр входного зрачка внеосевой системы, задаваемый проектировщиком. На рисунке 5 представлена графическая зависимость  $D_0(\eta)$  (при  $D = 100$ ).

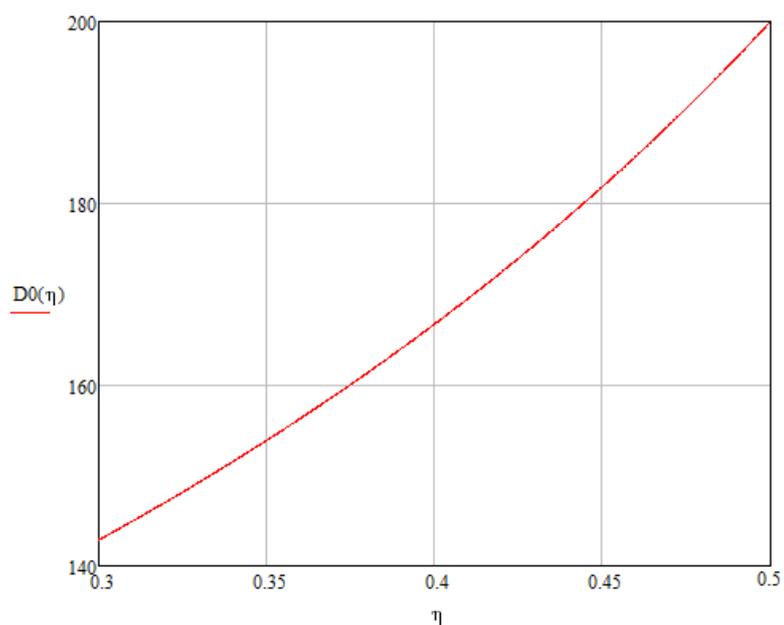


Рис. 5. Зависимость поперечных габаритов системы от  $\eta$

Осевые габариты системы можно охарактеризовать, при помощи зависимости расстояния между зеркалами от  $\eta$ . График зависимости осевого расстояния между зеркалами от коэффициента экранирования приводится на рисунке 6 (для приведенной ОС с единичным фокусным расстоянием).

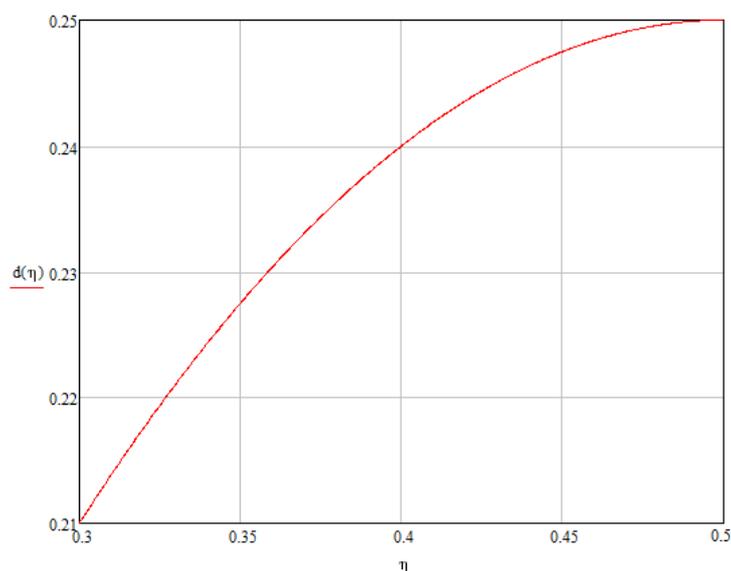


Рис. 6. График зависимости осевого расстояния между зеркалами от  $\eta$

Таким образом, коэффициент экранирования исходной системы влияет на габариты внеосевого объектива. Для обеспечения минимальных габаритов следует выбрать  $\eta = 0.3$ .

## **Заключение**

Разработанный объектив без центрального экранирования обладает удобной компоновкой оптических элементов. Он состоит из двух зеркал: вогнутого асферического, от которого лучи отражаются дважды, и выпуклого сферического. В сравнении с существующими аналогами более прост в изготовлении и в процессе юстировки. Объектив обеспечивает приемлемое качество изображения, которое можно повысить, применяя линзовый или зеркальный полевой корректор.

## **Список литературы**

- [1]. Михельсон Н.Н. Оптика астрономических телескопов и методы её расчёта. М.: Физматлит, 1995. 384 с.
- [2]. Слюсарев Г.Г. Расчёт оптических систем. Л.: Машиностроение, 1975. 640 с.
- [3]. Батшев В.И., Бодров С.В. Компактный трёхзеркальный астрономический объектив // Приборы и техника эксперимента. Принята к публикации.
- [4]. Cook, G. Lacy Reflective optical triplet having a real entrance pupil, US Patent № 4.733.955.1988.
- [5]. Заварзин В.И., Кравченко С.О., Морозов С.А. Методика расчёта объективов с зеркалами Манжена на основе трёхзеркальной системы с эксцентрично расположенным полем изображения // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2013. Режим доступа: <http://engjournal.ru/articles/521/521.pdf> (дата обращения 29.06.2015).