

Зеркальные системы с четырьмя отражениями

Артюхина Н.К., Богатко А.В., Марчик В.А.

Белорусский национальный технический университет

В последнее время в различных областях оптического и оптоэлектронного приборостроения все более широкое применение находят чисто зеркальные системы. Это связано с возможностью их работы в широком спектральном диапазоне – от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного. Исследования в области зеркальных объективов направлены на поиск схемных решений с увеличенным полем зрения при сохранении высокой светосилы, которые должны быть откорректированы в отношении сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны изображения.

В предлагаемой работе рассматриваются различные схемные построения зеркальных объективов с четырьмя отражениями: как ранее разработанные, так и новый тип систем – двухзеркальные объективы с двойным отражением от зеркал, которые отличаются простотой конструкции в сочетании с высокими коррекционными возможностями и оптическими характеристиками.

Среди многообразия зеркальных объективов с четырьмя отражениями представляет интерес группа систем, состоящих из четырех зеркал с попарно совмещенными вершинами первого и третьего, и, второго и четвертого зеркал.

Объектив, предложенный Коршем, построен на основе системы Кассегрена (рис.1, а). Подобный объектив, построенный на основе зафокальной системы (рис.1, б), разработан отечественными авторами.

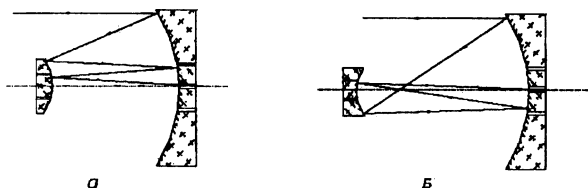


Рис.1. Четырехзеркальные объективы с попарно совмещенными вершинами зеркал

Оба объектива состоят из четырех асферических зеркал с попарно совмещенными вершинами первого и третьего, и второго и четвертого зеркал, и исправлены в отношении четырех аберраций – сферической, комы, астигматизма и дисторсии.

Оптические характеристики системы Корша:

$$f' = 1320 \text{ мм}, \quad D/f' = 1:13.2, \quad 2\omega = 30'.$$

Такие схемные решения являются более технологичными, чем четырехзеркальные системы с разнесенными вершинами зеркал, где возникают трудности с креплением зеркал, которое приводит к увеличению коэффициента экранирования, и обладают большими коррекционными возможностями, чем двух-, трехзеркальные объективы. Недостатком остается наличие четырех асферических зеркал различного профиля.

Дальнейшее исследование зеркальных систем с целью упрощения конструкции с одновременным увеличением оптических характеристик привело к получению трехзеркальных систем с четырьмя отражениями (с двойным отражением от главного зеркала). Оптические системы телескопов, предложенные Цукановой, состоят из зафокального объектива и дополнительного малого зеркала, при этом конструкция обеспечивает процесс двойного отражения луча от главного зеркала.

Система, показанная на рис.2 *a*, состоит из трех параболических зеркал и исправлена в отношении сферической аберрации, комы, астигматизма и кривизны изображения. Недостатком такого решения является то, что малое зеркало, расположенное между главным и вторичным, вызывает затруднение при креплении, а из-за небольшого отверстия в главном зеркале возникает значительное виньетирование. Эти недостатки устранены в схеме, в которой третье зеркало расположено вблизи вершины второго зеркала (рис.2, *б*), а вследствие того, что между главным и вторичным зеркалами не параллельный ход лучей, как в предыдущем случае, а расходящийся, отверстие в главном зеркале увеличивается и виньетирование уменьшается. Обе системы имеют увеличенное угловое поле.

Новым типом зеркальных систем с четырьмя отражениями являются двухзеркальные объективы с двойным отражением от каждого из зеркал. Получено несколько схемных решений таких систем.

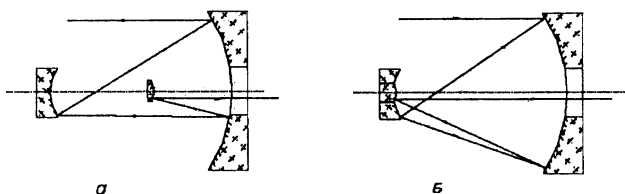


Рис.2. Трехзеркальные системы с двойным отражением от главного зеркала

Объектив (рис.3, а) можно рассматривать как усовершенствованную систему Боуэна – анастигмата, состоящего из двух concentrically расположенных поверхностей. Недостатком системы Боуэна является то, что диаметр вторичного зеркала более чем в 4 раза превосходит диаметр главного зеркала. Предлагаемый объектив состоит из двух сферических, concentrically расположенных поверхностей, оптическая схема которого обеспечивает процесс двойного отражения лучей от каждого из зеркал, что позволяет значительно уменьшить габариты вторичного зеркала. Рассчитанный объектив сочетает в себе высокую технологичность – поскольку состоит из двух сферических зеркал и высокие коррекционные возможности – вследствие concentricity поверхностей, в нем достигается возможность устранения четырех aberrations – сферической, комы, астигматизма и дисторсии. При этом объектив обеспечивает увеличенное поле зрения и является достаточно светосильным. Недостатком данного схемного решения является большая длина системы, вызванная большим удалением плоскости изображения.

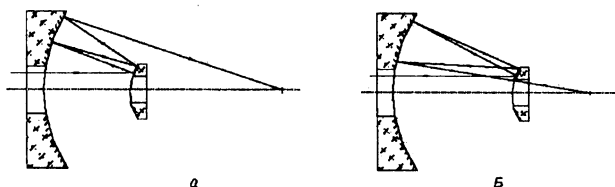


Рис.3. Двухзеркальные объективы с четырьмя отражениями

Один из рассчитанных вариантов имеет следующие оптические характеристики:

$$f' = 200 \text{ мм}, \quad D/f' = 1:4, \quad 2\omega = 6^\circ, \quad S' = 647 \text{ мм}.$$

Недостаток последнего объектива устранен в системе, показанной на рис.3, б. Данное схемное решение обеспечивает задний отрезок, а, следовательно, и длину объектива, в 2 раза меньше чем предыдущий объектив. Но вследствие того, что условие концентричности поверхностей в данном случае нарушается, коррекционные возможности этой системы будут ниже.

Было выполнено исследование и расчет объективов содержащих как асферические, так и сферические поверхности, с целью устранения трех aberrаций: сферической, комы и астигматизма. Исследование показало, что в данном схемном решении величина асферики зеркал возрастает с уменьшением коэффициента экранирования, и при допустимой величине экранирования остается достаточно большой, что сказывается на aberrации высших порядков. Так при устранении сферической aberrации, комы и астигматизма III порядка, aberrации высших порядков остаются велики и качество изображения – недостаточным.

Однако в ходе расчета был найден вариант объектива, состоящего из двух сферических зеркал с равными радиусами кривизны. Качество изображения, создаваемого этим объективом, значительно выше варианта с асферическими поверхностями. Кроме того, данное схемное решение отличается простотой и технологичностью конструкции.

Оптические характеристики объектива со сферическими поверхностями равного радиуса кривизны:

$$f' = 200 \text{ мм}, \quad D/f' = 1:4, \quad 2\omega = 6^\circ, \quad S' = 299 \text{ мм}.$$

Конструктивные параметры двухзеркальных систем с четырьмя отражениями определяются исходя из следующего квадратного уравнения:

$$d_1^2 - d_1(2\delta + \eta + 1) + (1 + \delta)(\delta - \eta^2) = 0,$$

где d_1 – расстояние, прошедшее лучом света после первого отражения от первичного зеркала до вторичного зеркала; δ – расстояние от последней зеркальной поверхности до фокальной плоскости; η – коэффициент экранирования.