

АНАЛИЗ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ДЕЦЕНТРИРОВАННЫХ ДВУХЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ

Канд. техн. наук, проф. АРТЮХИНА Н. К.

Белорусский национальный технический университет

Широкое применение в оптическом приборостроении, особенно в ультрафиолетовой и инфракрасной областях спектра, находят зеркальные системы. Они позволяют сократить габариты, уменьшить массу прибора при сохранении высокой входной апертуры, а также обладают рядом других преимуществ. Однако этим системам присущ и серьезный недостаток – центральное экранирование, которое приводит к уменьшению количества света в плоскости изображения, изменению распределения энергии в дифракционном пятне и увеличению рассеяния света, вызываемого дифракцией и сопровождаемого уменьшением контраста изображения [1–3].

Этот недостаток пытались устранить очень давно и довольно простым приемом за счет поворота зеркала (телескоп Ломоносова – Гершеля) [4].

Используя децентрировку входного зрачка, поля или центров вращения зеркальных поверхностей системы, можно значительно уменьшить центральное экранирование или совсем его исключить. Но тогда возникают неэлементарные аберрации четных порядков, требующие разработки приемов их устранения [5, 6].

В последние десятилетия начали разрабатываться зеркальные системы без центрального экранирования с высокими характеристиками и хорошим качеством изображения, но в основном с центрированными компонентами. В таких системах используются прием децентрировки входного зрачка (ДВЗ) и работа внеосевым полем (РВП), следствием чего является применение внеосевых частей зеркал [7]. Такие внеосевые зеркала называются брахита-

ми [8] и были предложены Р. Форстером и К. Фричем.

В децентрированных системах, имеющих децентрировку компонентов (ДК) и работающих без экранирования, центры вращения зеркальных поверхностей не лежат на одной прямой. Такие системы можно подразделить на два вида:

- использующие децентрировку смещения компонента (ДСК);
- использующие децентрировку поворота компонента (ДПК).

Для достижения наиболее высокого качества изображения целесообразно применять малые величины поворотов и смещений поверхностей. В связи с многообразием решаемых задач и различием в требованиях к оптическим характеристикам в реальных оптических системах для устранения центрального экранирования используется либо один из перечисленных способов, либо их комбинация в зависимости от схемного решения зеркальной системы и ее коррекционных возможностей.

Наибольшую известность среди двухзеркальных децентрированных систем получили внеосевая система Кассегрена с малым зеркалом эллипсоидальной формы [9], объектив Камишеля, состоящий из главного сферического зеркала и второго деформированного [10], дающие стигматическое изображение точки, а также двухзеркальные афокальные системы, составленные из параболических зеркал [11, 12].

В [13] рассмотрены варианты апланатических двухзеркальных анастигматов с неэкранированным входным зрачком, рассчитанных

в области Зейделя. Объективы выполнены по схемам Кассегрена и Даль-Кирхама (рис. 1а, б), имеют наклонные и децентрированные компоненты при асферической форме зеркал; для фокусного расстояния $f' = 25$ мм угол наклона зеркал не превышает величины 12° , а децентрировка – 1,25 мм.

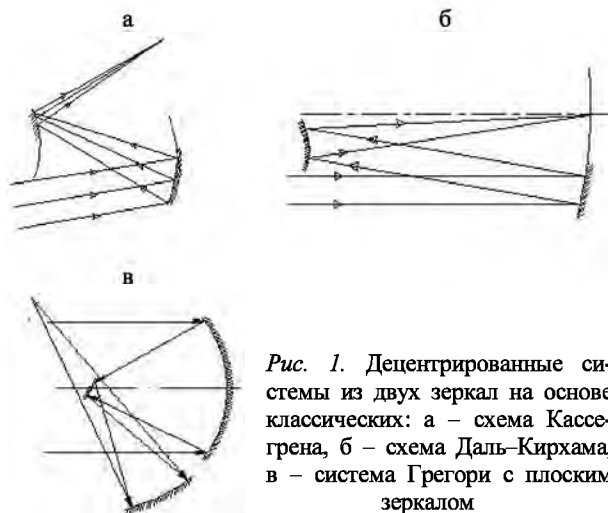


Рис. 1. Децентрированные системы из двух зеркал на основе классических: а – схема Кассегрена, б – схема Даль-Кирхама, в – система Грегори с плоским зеркалом

Для обеспечения малого центрального экранирования может быть использована схема Грегори (рис. 1в), состоящая из двух вогнутых асферических зеркал с дополнительным плоским зеркалом вблизи промежуточного изображения. На основе такой системы разработана оптическая схема [14], обеспечивающая прием изображения на шесть приемников (четыре зоны видимого и две – инфракрасного диапазона). Система обеспечивает близкое к дифракционному качество в пределах углового поля 1° на плоской поверхности изображения при относительном отверстии $A = 1:6$ в видимом и при $A = 1:2,5$ в ИК-диапазоне.

Объективы с planoидными зеркалами (рис. 2) целесообразно применять для увеличения поля до $2\omega = 5^\circ$ и получения изображений объектов малой яркости дифракционного качества в спектральном диапазоне от 100 \AA УФ до 100 мкм ИК [15–18]. Отметим, что planoиды – это элементы, которые требуют децентрировки [19], в объективах с planoидами обычно сферическая поверхность изображения. Схема объектива (рис. 2а) имеет центрированные элементы, но работает внеосевым полем, и осевой пучок в ней претерпевает полное экранирование.

Длина объектива $l = 2f'$, но с помощью дополнительного плоского зеркала (рис. 2б) возможно уменьшить длину объектива вдвое [20], что является также благоприятным с точки зрения размещения приемника. Однако при этом несколько возрастает значение минимального полевого угла, при котором отсутствует затенение пучка вторым компонентом. Для полного устранения центрального экранирования, кроме работы внеосевым полем, необходимо использовать децентрировку входного зрачка (рис. 2в).

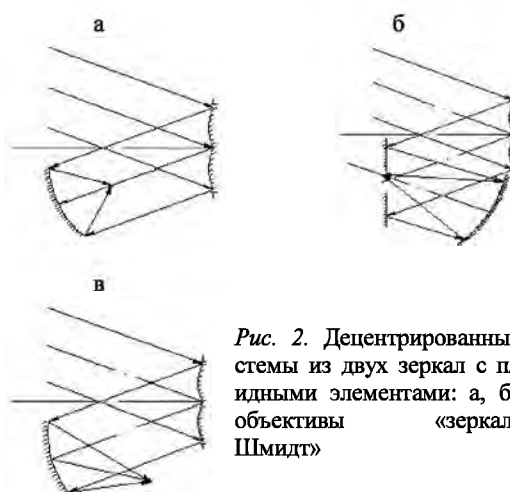


Рис. 2. Децентрированные системы из двух зеркал с planoидными элементами: а, б, в – объективы «зеркальный Шмидт»

Такая система будет работать при относительном отверстии $A = 1:1,5$. На базе данной схемы в ГОИ им. С. И. Вавилова (Россия, г. Санкт-Петербург) [14] разработаны длиннофокусные объективы с относительным отверстием $A = 1: 2,5-1:3$ («Линиар», «Легат», «Персей», «Алькес»). Planoидным главным зеркалом или planoидным зеркалом в паре с плоским «ломающим» зеркалом возможно осуществлять сканирование в пределах всего поля. В схеме «зеркальный Шмидт» можно перейти от полного экранирования к малому центральному экранированию с помощью децентрировки поворота первого компонента при условии использования узкого прямоугольного поля зрения. Однако для полного устранения центрального экранирования в данном случае необходимо дополнительно производить децентрировку входного зрачка. Зеркальный аналог системы Шмидта применяется в космических приборах – в космическом спутнике «ГИППАРКОС» (HIPPARCOS) и планируемом

за рубежом «космическом Шмидте» с входным отверстием, имеющем диаметр около 1 м. В этих приборах коррекционное зеркало (КЗ) наклонено к оси главного на значительный угол и не имеет оси вращения; их изготовление – сложная техническая задача. Подобные системы изучались проф. В. Н. Чуриловским [21].

Схема «зеркальный Райт» с наклонным planoидным зеркалом (угол наклона порядка 8°), рассчитанная С. А. Чупраковым [22], обеспечивает удобное расположение поверхности изображения. Система (рис. 3а) с эллиптическим главным зеркалом (квадрат эксцентриситета меридиональной кривой $e^2 = -1,2$) при фокусном расстоянии $f' = 800$ мм, относительном отверстии $A = 1 : 4$, угловом поле $2\omega = 1^\circ$ обеспечивает практически дифракционный предел разрешающей способности (при исследовании на ОСК-4 для расстояния между штрихами миры, соответствующими $0,91''$, контраст приблизительно 0,3). Расчет системы проведен в области aberrаций третьего порядка при минимизации неэлементарных aberrаций четных порядков [23].

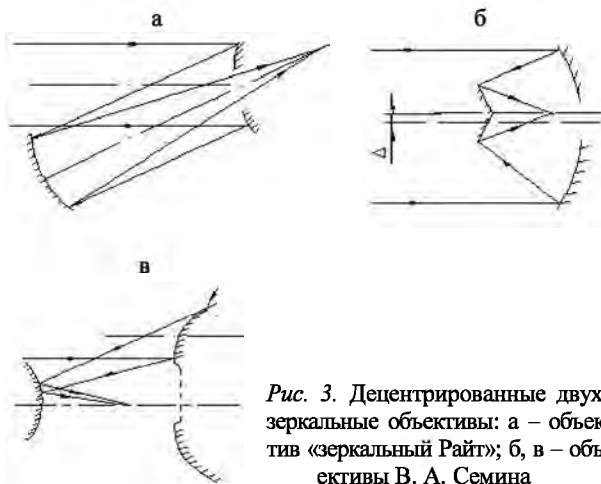


Рис. 3. Децентрированные двухзеркальные объективы: а – объектив «зеркальный Райт»; б, в – объективы В. А. Семина

В объективах В. А. Семина [24, 25] зеркальная поверхность главного зеркала получена вращением образующей со смещенной главной осью симметрии (децентрировка компонента ДСК) вокруг оптической оси системы. Патент [24] описывает объектив, в котором с целью увеличения поля зрения образующая выполнена в виде меридиональной кривой не ниже второго порядка, состоящей из двух ветвей (рис. 3б). В [25] показан объектив с главным параболо-

лическим зеркалом (рис. 3в) и вторым с поверхностью прямого кругового конуса. Объективы предназначены для исследования фотометрических характеристик пространства.

Рассчитаны и другие двухзеркальные децентрированные системы без экранирования, например проекционные схемы [26, 27], однако они не позволяют существенно увеличить поле зрения в силу ограниченного набора свободных конструктивных параметров для коррекции aberrаций.

ВЫВОД

Проектирование в области децентрированных систем значительно расширилось благодаря новым способам компьютерных расчетов и накопленному потенциалу в области опто-техники. За последние годы созданы системы без экранирования, которые обладают высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения. В трехзеркальных и более сложных схемах для устранения центрального экранирования обычно используют комбинацию простых способов децентрировки. Возможность реализации таких систем обусловлена применением осесимметричных и внеосевых зеркал с асферическими поверхностями высоких порядков.

Попытки избавиться от асферических поверхностей, что особенно актуально в связи с внеосевыми зонами зеркал, приводят к увеличению количества зеркальных поверхностей в децентрированных системах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Марешаль, А. Структура оптического изображения / А. Марешаль, М. Франсон. – М.: Мир, 1964. – 295 с.
2. Born, M. Principals of Optics / M. Born, E. Wolf. – 7th edition. – London: Cambridge University, 1999. – 561 с.
3. Игнатовский, В. С. Элементарные основы теории оптических приборов / В. С. Игнатовский. – СПб.: СПбГИТМО (ТУ). – Ива, 2001. – 202 с.
4. Максудов, Д. Д. Астрономическая оптика / Д. Д. Максудов. – Л.: Наука, 1979. – 395 с.
5. Cox, A. System of optical design / A. Cox. – London: The focal press, 1967. – 665 p.
6. Трубка, С. И. Методика расчета зеркальных телескопов без центрального экранирования / С. И. Трубка, Г. И. Лебедева, А. А. Гарбуль // Опτικο-механическая промышленность. – 1988. – № 2. – С. 21–23.
7. Губель, Н. Н. Аберрации децентрированных систем / Н. Н. Губель. – Л.: Машиностроение, 1975. – 272 с.

8. **Русинов, М. М.** Композиция нецентрированных оптических систем / М. М. Русинов. – СПб.: СПбГУ ИТМО. – Ива, 2004. – 252 с.
9. **Ingalls, A. G.** Two -mirror unobscured telescopes / A. G. Ingalls // *Scient American*. – 1954. – Vol. 190, No 2. – P. 100.
10. **Kingslake, R.** *Optical system design* / R. Kingslake. – New York: Academic Press, 1983. – 366 p.
11. **Wetherell, W. B.** Confocal Paraboloids. Some comments / W. B. Wetherell // *Appl. Opt.* – 1974. – Vol. 13, No 10. – P. 1783–1786.
12. **Rosin, S.** Afocal Parabolic Reflectors / S. Rosin, M. Amon // *Appl. Opt.* – 1974. – Vol. 13, No 4. – P. 1402–1404.
13. **Gelles, R.** Unobscured-aperture two-mirror systems / R. Gelles // *JOSA*. – 1975. – Vol. 65, No 10. – P. 1040–1043.
14. **Лебедева, Г. И.** Перспективные аэрокосмические зеркальные объективы / Г. И. Лебедева, А. А. Гарбуль // *Оптический журнал*. – 1994. – № 8. – С. 57–62.
15. **Bernacca, P.** Project HIPPARCOS / P. Bernacca // *Astrophysics and Space Science*. – 1985. – Vol. 110, No 110. – P. 21–45.
16. **Su Ding-Qiang.** Active Optics in LAMOST / Su Ding-Qiang, Xiang-Qun Cui. // *J. Astron. Astrophys.* – 2004. – Vol. 4, No 1. – P. 1–9.
17. **McGrath Andrew.** A large reflective Schmidt telescope for the Antarctic plateau / Andrew McGrath, W. Cui // *Proceedings of the SPIE*. – 2004. – Vol. 5489. – P. 462–469.
18. **Чупраков, С. А.** Зеркальные объективы, основанные на применении центрально-симметричных planoидных зеркал / С. А. Чупраков // *Оптический журнал*. – 2007. – Т. 74, № 9. – С. 45–49.
19. **Пейсахсон, И. В.** Применение planoидных дифракционных решеток в спектрографах / И. В. Пейсахсон // *Оптический журнал*. – 1994. – № 8. – С. 46–48.
20. **Wide-field reflective optical apparatus:** pat. 3963328 USA / I. R. Abel // *United States Patent*. – 15.06.76.
21. **Чуриловский, В. Н.** Зеркальные астрономические объективы, основанные на применении planoидных зеркал / В. Н. Чуриловский // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 1958. – № 2. – С. 102–113.
22. **Широкоугольный зеркальный объектив телескопа:** пат. 2215314 Рос. Фед. / А. Н. Бородин, С. А. Чупраков; заяв. Ин-т солнечно-земной физики СО РАН. – № 2001129186/28; заявл. 29.10.01; опубл. 27.10.03.
23. **Чупраков, С. А.** Зеркальные системы на основе децентрированных planoидных элементов / С. А. Чупраков // *Оптика – XXI век: материалы Междунар. конф., Санкт-Петербург, 16–20 окт. 2006 г.:* в 3 т. / ОО им. Д. С. Рождественского; редкол.: В. М. Арпишкин [и др.]. – СПб., 2006. – Т. 3. – С. 286–290.
24. **Широкоугольный зеркальный объектив кругового обзора:** пат. 1615661 РФ / В. Д. Бокий, В. А. Семин. – 1990.
25. **Двухзеркальный объектив:** пат. 1737394 РФ / В. А. Семин. – 1992.
26. **X-ray reduction exposure apparatus and device manufacturing method using the same:** pat. 5995582 USA, МКИ G02B 17/00 / Terashima [et al.] // *United States Patent*. – 30.11.1999.
27. **Off axis projection optical system and extreme ultraviolet lithography apparatus using the same:** pat. 7301694 USA, МКИ G02B 17/00 / Chang [et al.] // *United States Patent*. – 22.12.2007.