

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 535.317

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ДЕЦЕНТРИРОВАННЫХ ТРЕХЗЕРКАЛЬНЫХ СХЕМ

Артюхина Н. К., Марчик В. А.

*Белорусский национальный технический университет,
г. Минск, Республика Беларусь*

Представлен аналитический обзор трехзеркальных децентрированных оптических систем. Выполнена классификация по типу схемных решений; даны параметрические характеристики различных конструктивных вариантов. Разработана систематизация поиска новых композиций зеркальных систем, моделирование которых развивает расчетно-методическую базу оплотехники. Определена структура и содержание элементов, позволяющих повысить функциональные возможности и оптические характеристики новых оптических и оптико-электронных приборов, работающих в УФ и ИК областях спектра, космической и рентгеновской оптике.

Ключевые слова: *оплотехника, зеркальные системы, коррекция аберраций, оптимизация, обновление компьютерных программ, расчет оптических схем, анастигматический объектив, объектив, сводка основных параметров системы, качество изображения.*

Введение. Постановка проблемы

В последнее время накоплен значительный потенциал по зеркальным системам для решения широкого круга задач оптического приборостроения [1]. Они обладают возможностью увеличения входной апертуры при уменьшении габаритов и массы и могут работать в широком спектральном диапазоне. Серьезный недостаток зеркальных систем – центральное экранирование, которое приводит к уменьшению количества света в плоскости изображения, изменению распределения энергии в дифракционном пятне и увеличению рассеяния света, сопровождаемого уменьшением контраста изображения [2–3].

Центральное экранирование приводит к развитию такой части нецентрированных систем, как «кособокие» системы или системы с сохранением одной плоскости симметрии, где наклоны зеркал решают задачу разделения отраженных и падающих пучков лучей, причем центры кривизны всех поверхностей находятся в одной и той же плоскости. Отметим, что такое построение вызывает появление аберраций, присущих только нецентрированным системам.

Систематизация зеркальных схем с определенной областью оптических характеристик по типам и композициям позволяет проводить достаточно полный и глубокий анализ большого количества на первый взгляд довольно разнообразных систем и разрабатывать новые [4].

Цель работы. В работе [5] представлен аналитический обзор децентрированных двухзеркальных систем, способы их построения (ДСК, ДПК, РВП). Системы из двух зеркал не всегда удовлетворяют современным конструктив-

ным требованиям и возможностям по коррекции полевых аберраций. Двухзеркальные схемы эффективно и целесообразно использовать, как в качестве самостоятельных систем: внеосевых и децентрированных объективов, так и в составе сложных оптических систем (адаптивной оптики, панорамных систем, зеркальных систем для трансформирования лазерных пучков и т.д.). Трехзеркальные системы обладают по сравнению с двухзеркальными более широкими возможностями по коррекции сферической аберрации, комы и астигматизма за счет использования асферических зеркал.

Цель настоящей работы – представить аналитический обзор трехзеркальных децентрированных оптических систем. Выполнить классификацию по типу схемных решений, провести систематизацию поиска новых композиций, моделирование которых развивает расчетно-методическую базу оплотехники.

В трехзеркальных и более сложных схемах для устранения центрального экранирования обычно используют комбинацию простых способов децентрировки. В этой группе наибольший интерес вызывают

- системы, не имеющие промежуточного изображения;
- схемы с промежуточным изображением после базовой системы из первых двух зеркал.

Децентрированные системы без промежуточного изображения

Первые зеркальные системы создавались без децентрировки компонентов (ДСК) путем вырезания из обычных зеркал (рис. 1, а); конструктивные решения были подчинены требованиям качества изображения. В настоящее время конструктивные условия выдвигаются на передний план, что определено расширением коррекционных возможностей и ускорением моделирования и расчета оптических систем с применением различных компьютерных программ, когда можно разработать целый ряд усложненных схемных решений для выполнения одной и той же задачи.

В таких объективах откорректированы аберрации 2-го порядка: внеосевая кома и астигматизм, причем в качестве коррекционных параметров использован наклон зеркал, к примеру, система (рис. 1, б), работающая без экранирования [6]. В объективе все зеркала вогнутые асферические, причем второе зеркало асферический тороид. Объектив имеет следующие характеристики: фокусное расстояние $f' = 3600$ мм, относительное отверстие 1:12, дает размер кружка рассеяния около 0,5" на слабо искривленной, наклоненной на $1,5^\circ$ фокальной плоскости. Для сохранения хорошей коррекции поля в более светосильных системах необходимо вводить несимметричную асферичность на всех элементах.

Много децентрированных систем рассчитано Л. Куком (L. Cook). Одна из них [7] представлена на рис. 1, в, где использованы следующие способы децентрировки: входного зрачка, смещения одного компонента, поворота двух компонентов и работа внеосевым полем.

Систему «зеркальный аналог триплета Кука» (рис. 1, г), описанную в патенте Д. Корша (D. Korsh) [8], целесообразно использовать для увеличения углового

поля. На ее основе можно создавать длиннофокусные светосильные (1:3) широкоугольные объективы (протяженность поля в сагиттальном направлении до 18–20°) с плоским изображением и качеством близким к дифракционному в видимой и ближней ИК области спектра. Аналогичные системы (ГОИ, РФ – схемы «Легар») обычно работают внеосевым полем, их реализации препятствуют технологические возможности изготовления внеосевых асферических зеркал, однако в этом направлении уже достигнуты положительные результаты по развитию технологической базы изготовления и контроля асферических зеркал [9].

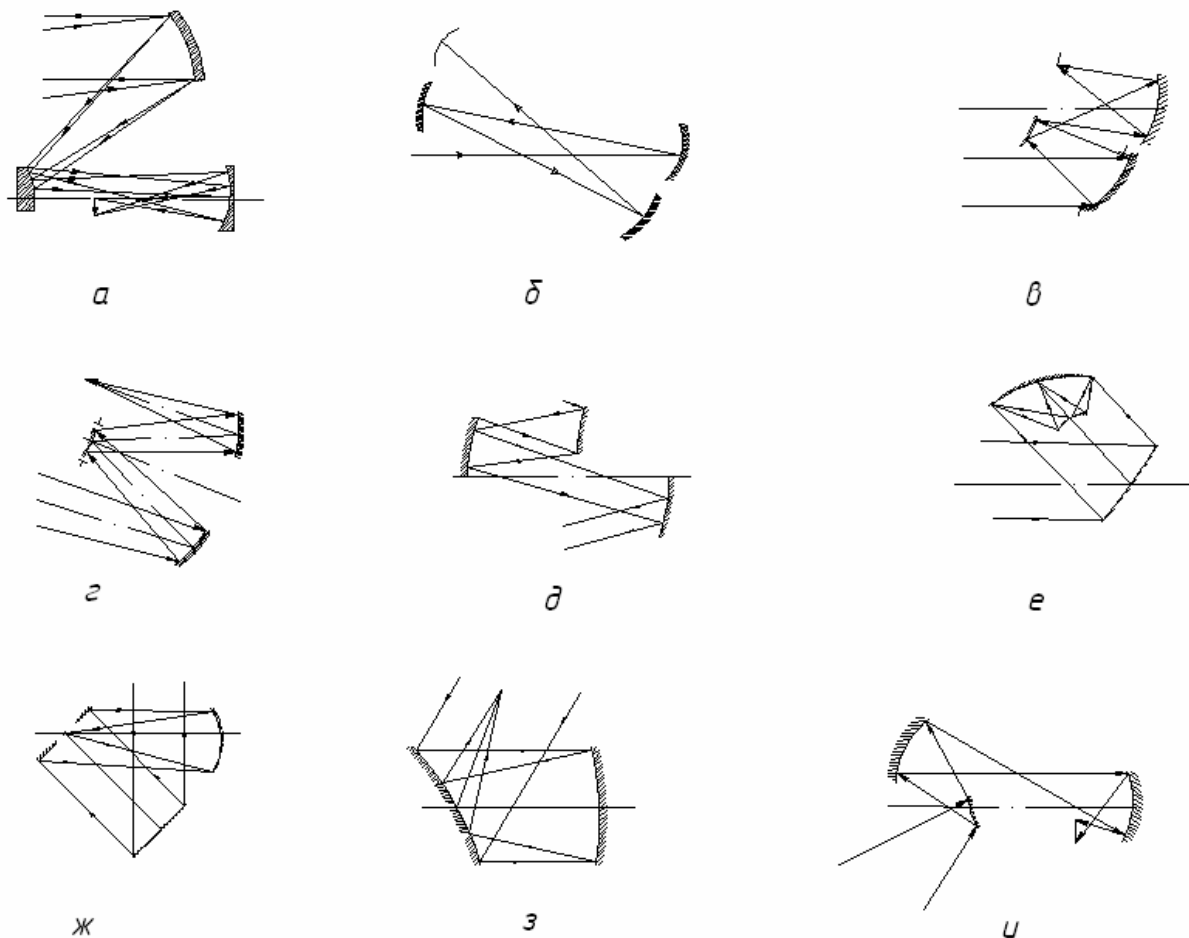


Рис. 1. Трехзеркальные децентрированные системы, где: *a* – система без децентрировки компонентов ДСК; *б* – система Р. Бухредера; *в, и* – системы Л. Кука; *г* – система Д. Корша; *д* – система без виньетирования с двумя сферическими зеркалами; *е, ж, з* – системы с planoидными зеркалами

В работе [10] описана трехзеркальная система без виньетирования с двумя сферическими и одним эллиптическим зеркалом (рис. 1, *д*) с плоским полем. Сегменты зеркал смещены от общей оптической оси в одном направлении и отъюстированы во втором направлении. Центры первого и второго сферических зер-

кал, фокус эллиптического зеркала и центр апертурной диафрагмы совпадают с оптической осью. Перед третьим вогнутым сферическим зеркалом в фокальной поверхности размещен приемник света.

Вариант схемы с фокусным расстоянием $f' = -37$ мм, относительным отверстием 1:4 имеет удовлетворительное качество изображения в пределах сравнительно поля наблюдения $20 \times 30^\circ$, но габариты в несколько раз превышают значение фокусного расстояния.

На рис. 1 *е, ж, з* представлены возможные варианты планоидных систем из трех компонентов, которые могут обеспечивать поля зрения порядка $2\omega = 6^\circ$ при хорошей светосиле. Планоид – зеркальный аналог деформированной стеклянной коррекционной пластины Шмидта. В системе СПП из сферического и двух планоидных зеркал (рис. 1, *ж*) осевая длина l значительно меньше, чем в зеркально-линзовом объективе Шмидта ($l = 0,75f'$), но поверхность изображения сильно искривлена и находится внутри системы. Система СПП, рассчитанная для $f' = 1000$ мм при 1: 2, имеет кружок рассеяния 0,027 мм в пределах поля $2\omega = 1^\circ$ на поверхности с радиусом $R = 0,024f'$, коэффициент линейного экранирования $\eta = 0,3$. В объективах ПСС из наклонного планоидного и двух сферических зеркал (рис. 1, *е*), поверхность изображения искривлена ($R = f'$), а осевая длина $l = 2f'$. Для характеристик: $f' = 1000$ мм, поля $2\omega = 6^\circ$, 1:4 фигуры рассеяния по полю порядка 0,05–0,15 мм; коэффициент $\eta = 0,33$. Форсирование по полю зрения в планоидных системах приводит к увеличению центрального экранирования, что ухудшает качество изображения.

Широкоугольная система, созданная по патенту [11], имеет поле зрения $20 \times 40^\circ$, относительное отверстие 1:4 и может быть применена для целей навигации. Все зеркала имеют асферику высшего порядка; второе и третье зеркала являются децентрированными (рис. 1, *и*).

В системах без промежуточного изображения достаточно хорошо изучены схемы, построенные на основе трех зеркал и имеющие ось симметрии вращения, полезное поле которых имеет форму дуги, центр которой расположен на оси системы (РВП). Примером систем может служить трехзеркальная система, выполненная по схеме Оффнера (A. Offner) [12, 13].

Децентрированные системы с промежуточным изображением

Универсальной в смысле решения различных задач является запатентованная схема Д. Корша [14], имеющая промежуточное изображение после второго зеркала и позволяющая удобно разводить каналы и различным образом компоновать схему. В ГОИ (РФ) такая система получила название «Асфар» (рис. 2, *а*) и была разработана для приемного оптического телескопа лидара космического базирования. В работе [15] даны ее характеристики: фокусное расстояние 30 м, световой диаметр 3 м, рабочее поле зрения до $20''$, причем зеркала имеют асферическую форму второго порядка. Все неплоские поверхности – центрированные. Плоский корректор, имеющий центральное отверстие диаметром 20 мм,

наклонен на 5° . Центральное экранирование по площади около 3%. Для точки на оси энергия сосредоточена в кружке диаметром менее 5 мкм, для внеосевых точек – в кружке диаметром 12 мкм. В схеме при $D/f' = 1:10$ допускается наклон третьего зеркала на $2-4^\circ$. На основе схемы можно строить объективы различного класса: светосильные и широкоугольные, сверхдлиннофокусные, а также многоканальные и с перенацеливанием оптической оси.

Выполненные расчеты объективов такого типа показали, что возможно создание длиннофокусных светосильных (относительные отверстия $1:2,5-1:3$) объективов с полем в сагиттальном направлении до $9,5^\circ$ и качеством изображения, близким к дифракционному, для ближней ИК области спектра. В этих системах первое и третье зеркала имеют асферический профиль высокого порядка, а второе зеркало – гиперболу второго порядка. В видимой области спектра возможно создание длиннофокусных объективов-телескопов с малой светосилой при полях около 1° с дифракционным качеством изображения на плоской поверхности в видимой области спектра.

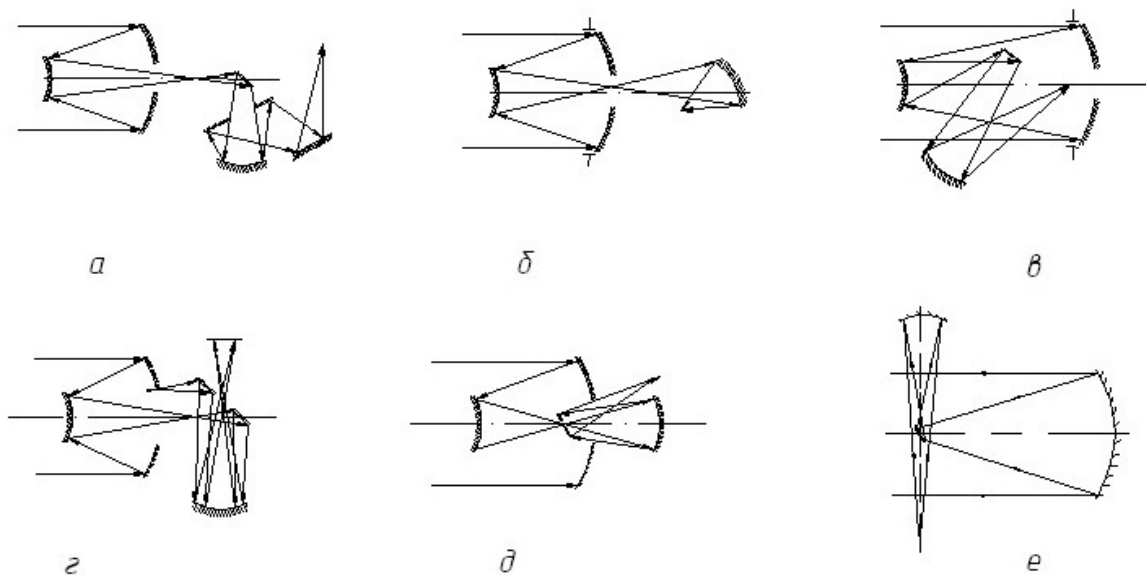


Рис.2. Схемы с промежуточным изображением после двух зеркал, где: а – «Асфар»; б, в, г – системы Д. Корша; д, е – объективы Ю. Пименова, Н. Кувшинова

На рис. 2, б, в, г представлены трехзеркальные схемы, имеющие малое центральное экранирование [14]. В системе с дополнительным плоским зеркалом (2, г) исправлены четыре аберрации: сферическая, кома, астигматизм и кривизна поля. Фокусное расстояние телескопа 1,5 м, поле зрения $1,5^\circ$. Объектив обеспечивает высокое качество изображения и имеет удобную конфигурацию, причем плоскость изображения повернута на 90° к входной оси зеркального объектива.

Трехзеркальные объективы (рис. 2, *д, е*) содержат главное и третье вогнутые эллиптические зеркала, наличие дополнительного зеркала обеспечивает удобное размещение плоскости изображений. Достоинством объектива [16] является сферическая форма выпуклого второго зеркала (рис. 2.2, *д*), причем аберрации объектива не превосходят сотой доли угловой секунды в поле зрения $50'$. Относительное отверстие 1:8. Диаметр кружка рассеяния в центре поля зрения $0,003''$. Изображение стабилизировано на фотопластинке при колебаниях оси телескопа; возможен вариант системы с плоским полем.

В объективе [17] вспомогательное вогнутое тороидальное зеркало установлено под углом и имеет различные радиусы кривизны для меридионального и сагиттального пучков для коррекции астигматизма. При фокусном расстоянии $f'=1$ м и относительном отверстии 1:33 в пределах углового поля $3,5'$ аберрации объектива в угловой мере не превышают $0,0005''$ (рис. 2.2, *е*).

Рассчитаны и другие трехзеркальные системы без экранирования, например схемы, состоящие из трех сферических зеркал, [18], однако они не позволяют существенно увеличить поле зрения в силу ограниченного набора свободных конструктивных параметров для коррекции аберраций.

Выводы

1. Представлен аналитический обзор трехзеркальных децентрированных оптических систем. Выполнена классификация по типу схемных решений; даны параметрические характеристики различных конструктивных вариантов. Разработана систематизация поиска новых композиций, обеспечивающих развитие расчетно-методической базы оплотехники.

2. Проектирование в области децентрированных систем значительно расширилось благодаря новым способам компьютерных расчетов и накопленному потенциалу в области оплотехники. Созданы системы без экранирования, которые обладают высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения.

3. Возможность реализации систем без экранирования с высокими оптическими характеристиками и хорошим качеством изображения обусловлена применением осесимметричных и внеосевых зеркал с асферическими поверхностями высоких порядков. Устранение асферических поверхностей является актуальной задачей моделирования, но приводит к увеличению количества зеркальных поверхностей в децентрированных схемах.

4. Определена структура и содержание элементов, позволяющих повысить функциональные возможности и технические характеристики новых оптических и оптико-электронных приборов, работающих в УФ и ИК областях спектра, космической и рентгеновской оптике.

Литература

1. Smith, W.J. Modern Optical Engineering, the Design of Optical Systems – 3rd ed . – New York: McGraw-Hill, 2000. – 617 p.

2. Born M., Wolf E. Principals of Optics. – 7-th edition. - London: Cambridge University, 1999. – 561 p.
3. Марешаль А. Структура оптического изображения / А. Марешаль, М. Франсон – М.: Мир, 1964. – 295 с.
4. Трубка С.И. Методика расчета зеркальных телескопов без центрального экранирования / С.И.Трубка, Г.И.Лебедева, А.А.Гарбуль // Оптико-механическая промышленность. – 1988. – № 2. – С. 21–23.
5. Артюхина, Н.К. Анализ схемных решений децентрированных двухзеркальных систем / Н.К. Артюхина // Вестник БНТУ. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
6. Buchroeder, R.A. Wide-field tilted component telescope, a Leonard extended Yolo all reflecting system / R.A. Buchroeder, A.S. Leonard // Appl. Opt. – 1972. – Vol. 11, № 7. – P. 2078–2080.
7. Three-mirror anastigmatic optical system: pat. 4265510 USA, МКИ G02B 17/00 / L.G. Cook; assignee Huges Aircraft Company. – № 039530; filed 16.05.79 // United States Patent. – 05.05.81.
8. Three-mirror anastigmatic optical system: pat. 4265510 USA, МКИ G02B 17/00 / L.G. Cook; assignee Huges Aircraft Company. – № 039530; filed 16.05.79 // United States Patent. – 05.05.81.
9. Горшков В.А. Автоматизированное формообразование высокоточных асферических поверхностей / В.А. Горшков [и др.] // Оптический журнал. – 2004. – Т. 71, № 12. – С. 5 – 9.
10. Wide-angle flat field telescope: pat. 4598981 USA, МКИ G02B 17/06 / K. L. Hallam [et al.]; assignee National Aeronautics and Space Center. – № 698641; filed 05.02.86 // United States Patent. – 08.07.86.
11. Wide-field of view focal three-mirror anastigmat: pat. 5170284 USA, МКИ G02B 17/06 / L.G. Cook; assignee Huges Aircraft Company. – № 745674; filed 16.08.91 // United States Patent. – 08.12.92.
12. Three-mirror system for lithographic projection and projection apparatus comprising such a mirror system: pat. 6081578 USA, МКИ G02B 17/00 / Braat, I.M Josephus // United States Patent. – 27.06.2000.
13. Состояние и перспективы развития оптики для рентгеновской литографии / Е.В. Гаврилов [и др.] // Прикладная оптика-2008: материалы 7-й междунар. конф., Санкт-Петербург, 16–20 октября 2008 г.: в 3 т. / ОО им. Д.С.Рожественского; редкол.: В.М. Арпишкин [и др.]. – СПб, 2008. – т. 3. – С. 30 – 38.
14. Anastigmatic three-mirror telescope: pat. 4101195 USA, МКИ G02B 17/00 / R. Frosch, D. Korsch; assignee National Aeronautics and Space Center. – № 820498; filed 29.07.77 // United States Patent. – 18.07.78.
15. Подоба В.И. Особенности приемного оптического телескопа для лидача космического базирования / В.И. Подоба, Г.И. Лебедева, Д.Н. Еськов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2002. – № 2. – С. 28 – 32.
16. Зеркальный длиннофокусный объектив: а.с. 498588 СССР, МКИ G02B 17/06 / Ю.Д. Пименов. – № 2018600/18-10; заявл. 24.04.74; опубл. 05.01.76 // Бюл. изобр. – 1976. – № 1.
17. Зеркальный объектив: а.с. 1254405 СССР, МКИ G02B 17/06 / Н.Г. Кувшинов. – № 3840692/24-10; заявл. 04.01.85; опубл. 30.08.86 // Бюл. изобр. – 1986. – № 32.
18. Howard, Josep M. Imaging with three spherical mirrors / Josep M. Howard, Bryan D. Stone // Appl. Opt. – 2000. – Vol. 39, № 19. – P. 3216 – 3231.

*Надійшла до редакції
11 лютого 2011 року*

©Артюхина Н. К., Марчик В. А., 2012