

**МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ  
ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

УДК 535.317

**ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОПТОТЕХНИКИ ЗЕРКАЛЬНЫХ  
АНАСТИГМАТОВ***Артюхина Н. К.**Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь**E-mail: [art4913@rambler.ru](mailto:art4913@rambler.ru)*

*В статье изложены результаты анализа особенностей проектирования зеркальных анастигматов. Системы позволяют исправить три аберрации третьего порядка; в них обеспечено удобное размещение плоскости изображения, защищенной от постороннего света специальными блендами. Выделена группа зеркальных анастигматов с увеличенным полем зрения, а также отмечены области схемных решений светосильных зеркальных объективов для регистрации объектов со слабым излучением. Установлены перспективные варианты с совмещенными вершинами четных и нечетных зеркал; системы из трех и четырех зеркал с промежуточным изображением, составленных из двух базовых модулей. Отмечены тенденции развития конструктивных компактных схем: схемы с двойным отражением от главного зеркала с тремя отражениями, а также четырехзеркальные системы с моноблоком из первого и четвертого зеркала. Полное отсутствие хроматических аберраций, высокая разрешающая способность, допустимые волновые критерии качества изображения обеспечивают отличные возможности использования зеркальных анастигматов. Они могут использоваться в оптических приборах, которые работают в различных областях спектра (от ультрафиолетовой до инфракрасной): в системах спутникового сканирования (фотографирования) земной поверхности, в геодезических приборах, военной и специальной технике и ряде других. Свойства приемников излучения и приемных устройств, спектральные характеристики отражающих покрытий могут ограничивать диапазон длин волн применения зеркальной оптики. Недостатками зеркальных анастигматов могут быть большие габариты и технологические трудности изготовления сложных асферических поверхностей, а также значительное экранирование и виньетирование при увеличении поля зрения. Работы последних лет по расчету зеркальных систем показали, что некоторые традиционные теоретические представления недостаточны для решения современных задач оптотехники, поэтому исследования в области зеркальных анастигматов различной степени сложности, позволяющих улучшить оптические характеристики, получили значительное место в вычислительной практике.*

**Ключевые слова:** *вычислительная оптика; оптические схемы; сферическая аберрация; кома; оптимизация; зеркальная система; анастигмат; объектив; коррекция аберраций; качество изображения; компьютерные программы.*

**Введение**

Оптическая промышленность в полной мере относится к технологичным отраслям с высокой составляющей интеллектуального труда. Удельный вес науки в приборостроении, в комплексе оборонных и других производств должен достаточно быстро возрастать в современном мире. Оптика и оптико-электронное приборостроение (ОЭП) во многом определяют прогресс в освоении приоритетных направлений развития науки и техники таких, как авиационная и ракетно-космическая, военная и специальная техника, лазерные, информационно-телекоммуникационные и нанотехнологии, опто- и радиоэлектроника, оптическая и сверхвысокочастотная связь, мониторинг окружающей среды, технологии высокоточной навигации и управления движением, а также ОЭП

обеспечения безопасности в обычных и чрезвычайных ситуациях, разведки природных ресурсов, оптическая информатика, оптико-электронная робототехника и ряд других [1]. Многие из перечисленных направлений и технологий постоянно развиваются. В последнее десятилетие наблюдается широчайшее развитие «двойных» технологий в области оптики и оптико-электронного приборостроения - одновременное внедрение новых зеркальных моделей в разработки военного и гражданского применения (экология, медицина, космос) [2].

В Республике Беларусь сегодня производством оптической продукции занимается около 30 предприятий, где разрабатывается оптоэлектронная продукция специального назначения, аэрокосмическая аппаратура, метеорологическое оборудо-

вание, медицинские оптические приборы и ряд другой техники [3]. Новые приемники излучения и приемные устройства, повышающие чувствительность ОЭП в двух или нескольких спектральных диапазонах, активно разрабатываются в настоящее время многими фирмами США, Франции, Англии, Японии, РФ и ряда других стран. Расширение области применения и создание новых ОЭП, решающих сложные научно-технические задачи, налагает определенные требования на выбор схемных решений оптических систем. В настоящее время зеркальные системы занимают важное место при проектировании оптических приборов из-за широкого разнообразия их возможных применений, т.к. возросли требования к расширению спектрального диапазона и снижению весовых характеристик оптических систем [4,5]. Представляется целесообразным провести анализ принципов проектирования и совершенствования элементной базы зеркальных систем для их практической реализации. Зеркальные системы интенсивно изучаются, и в этой области можно ожидать много новых перспективных решений.

**Цель статьи** – установить и проанализировать основные тенденции развития оплотехники зеркальных систем с анастигматической коррекцией для современного оптико-электронного приборостроения.

#### **Достоинства зеркальных систем**

Зеркальные системы не вносят хроматических aberrаций при любых апертурах и фокусных расстояниях. Ограничения по ширине спектральной полосы связаны с отражательной способностью зеркал, однако, эти ограничения гораздо менее существенны, чем ограничения по прозрачности в линзовых системах. В работе зеркала используется только его поверхность, а не весь объем, поэтому зеркало может иметь сотовую конструкцию, что существенно уменьшает вес объектива [6]; требования к стеклу для подложки зеркал значительно ниже требований к стеклу, предъявляемых для изготовления линз и, кроме того, при изготовлении крупногабаритных компонентов зеркальные поверхности имеют значительно большие величины радиусов кривизны по отношению к преломляющим поверхностям той же оптической силы. Зеркальные системы достаточно компактны (коэффициент телесокращения 0,25–0,3), светосильны.

Достоинства зеркальных систем: малая осевая длина; высокая апертура и разрешение; отсутствие хроматических aberrаций, выигрыш по габаритам и весу (особенно для зеркал размером больше 200 мм); а также экономичность материалов подтверждают актуальность проблемы проектирования и разработки зеркальных систем. Отметим актуальное использование зеркальных систем в аппаратуре ОЭП астрономической и космической

оптики, включая системы дистанционного зондирования Земли, а также создание объективов для УФ микроскопии, различных систем слежения, измерения и др.

#### **Поиск новых подходов**

Известны различные схемы и концепции создания зеркальных систем. Вопросами, связанными с проектированием зеркальных объективов, занимались многие ученые, начиная с основоположников оплотехники в России (Русинов М. М., Максудов Д. Д., Чуриловский В. Н.) и далее современных ученых: Попов Г. М., Пименов Ю. Д., Родионов С. А., Korsh D. G., Meinel A. B., Meinel M. P., Picht J., Ramsey N. Y. Schroder G., Sasian J. M. и др. Однако, целый ряд проблем габаритного параметрического и aberrационного моделирования зеркальных систем представляет интерес для дальнейшего исследования. Базовые модели, основанные на классических схемах, в основном, откорректированы на две основные aberrации, зависящие от апертуры (сферическую aberrацию и кому), поэтому поле зрения в них ограничено астigmatизмом. Можно создавать на их основе только апланаты.

Для современной аппаратуры ОЭП требуются оптические схемы с улучшенными оптическими характеристиками по полю зрения и эффективной светосиле, связанной с апертурой, имеющие малые остаточные aberrации. К примеру, современные зеркальные объективы, работающие в инфракрасной (ИК) области спектра и предназначенные для регистрации излучения слабых и протяженных объектов, должны быть светосильными и широкоугольными [5]. Увеличение углового поля зрения исключает применение сканирующих элементов, но делает необходимой разработку более сложных оптических систем [7]. Развитие производства линеек и ПЗС матриц ИК диапазона, улучшение их параметров вызывает необходимость в разработке ИК аппаратуры дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Актуальна проблема создания систем малых спутников ДЗЗ для мониторинга предвестников землетрясений и чрезвычайных ситуаций [8]. Все вышесказанное означает необходимость поиска новых подходов для моделирования зеркальной оптики с анастигматической коррекцией (анастигматов) и разработки новых оптических схем. Улучшение технических характеристик существующих зеркальных анастигматов и качества коррекции aberrаций может идти как по пути усложнения конструктивного решения, так и по пути создания оригинальных и освоения незаслуженно забытых оптических схем на основе нетрадиционных элементов. К новым подходам, развивающим расчетно-методическую базу оплотехники зеркальных анастигматических модулей различной степени сложности и позволяющим осуществлять моделирование технологически адаптированных

зеркальних систем отнесем создание многозеркальных систем; децентрированных зеркальных систем, а также зеркальных систем с изменяемыми оптическими характеристиками, добавим к этому обстоятельный анализ абберрационных свойств элементной базы и базовых схем, формирующих реальную основу синтеза зеркальных объективов, как предфокальных, так и зафокальных.

Проблема создания анастигматов, составленных только из зеркальных элементов, привлекает внимание ученых в странах СНГ и за рубежом. Количество зеркальных элементов в оптических системах варьируется в зависимости от задачи, которую они призваны решать. Их увеличение приводит к расширению диапазона коррекционных параметров, позволяющих наряду с коррекцией сферической абберрации и комы проводить коррекцию полевых абберраций при хороших габаритных соотношениях и удобном конструктивном расположении плоскости изображения. Основными недостатками многозеркальных центрированных систем могут быть большие габариты и технологические трудности изготовления сложных асферических поверхностей, а также экранирование и довольно большое виньетирование, которое не позволяет обеспечить значительное угловое поле зрения.

Решение вопросов, возникающих при расчетах и моделировании новых зеркальных композиций, удовлетворяющих современным запросам по качеству изображения, создание методик оценки центрального экранирования, виньетирования, защиты плоскости изображения от посторонней засветки, технологической адаптации элементов требует дальнейшего исследования и дает основу тенденциям развития оптоэлектронной техники зеркальных анастигматов.

Осуществлена каталогизация по разработкам и исследованию зеркальных систем. Выбор базовой схемы из архивов, библиотек оптических программных сред по расчету оптики определяет детальное сравнение схемных решений, исходя из светосилы, величины полезного поля изображения, контраста, волновых критериев качества изображения, массогабаритных характеристик, точностных требований к поверхностям и их взаимному расположению, сложности контрольных схем и т.д.

На данном этапе идеи классификации и каталогизации оптических систем целесообразно использовать для создания методик эффективного проектирования базовых и оптимизированных зеркальных модулей с данными для оценки качества изображения, полученными с помощью современных компьютерных пакетов прикладных программ.

#### **Направления развития**

*Двухзеркальные композиции.* Их эффективно использовать, как в качестве самостоятельных

систем, внеосевых и децентрированных объективов, так и в составе сложных (например, зеркальных лазерных систем для преобразования излучения) [9], при проектировании спектральных приборов [10]. Разработаны и реализованы методики расчета большого ряда двухзеркальных систем с использованием современных компьютерных пакетов [11]. Известные схемы с различными сочетаниями асферических профилей зеркал не дают полного представления возможностей моделирования двухзеркальных анастигматов, в области которых представляется возможным находить оригинальные решения. Этому способствуют наступающие в последние годы успехи в изготовлении и контроле асферических зеркальных поверхностей [12]. Целесообразно продолжить исследования и разработку двухзеркальных анастигматов.

Известен ряд *трехзеркальных анастигматов*

с угловым полем зрения до  $2\omega = 5^\circ$  [13, 14], дальнейшее увеличение углового поля теоретически ограничено требованиями по виньетированию и экранированию. Среди зеркальных анастигматов средних фокусных расстояний, где требования к габаритам не столь жесткие, перспективны плановидные системы [15], но поверхность изображения в них искривлена и находится в неудобном для исследования месте. Широко применяется в аппаратуре ДЗЗ объектив-анастигмат Корша (Korsh D.) [16]. В схемах трехзеркальных анастигматов для коррекции абберраций обычно используются поверхности, меридиональные кривые которых представляют уравнения высшего порядка на всех зеркалах, что ограничивает возможности технологической адаптации.

*Системы с четырьмя отражениями* в зависимости от коррекции абберраций могут быть анастигматами, план-объективами или ортоскопическими объективами.

В работе [17] представлена классификация автора по схемным решениям: системы с двухзеркальными компенсаторами, созданные на основе канонических систем; схемы из четырех зеркал с промежуточным изображением; схемы с двойным зеркалом. Конструктивный анализ по расположению зеркал в системе дает деление на три группы: системы с разнесенными вершинами из четырех зеркал; системы из трех зеркал с повторным отражением от первого зеркала или модуля из первого и третьего зеркал; системы из двух зеркал с повторным отражением от этих зеркал.

Четырехзеркальные анастигматы позволяют получать удачные схемные решения и обладают большим числом коррекционных параметров [18]. Эти системы светосильны и широкоугольны, обеспечивают коррекцию кривизны изображения и перспективны для использования в спектральных приборах [10], системах теплового сканирования, приборах радиометрического и пеленгационного типов [19]. Отметим, что в план-анастигматах из

четырёх зеркал с промежуточным изображением создается более технологичная форма асферических поверхностей зеркал, к тому же легче решаются проблемы защиты плоскости изображения и построения бленд. Преимущества таких схем: в плоскости промежуточного изображения возможно размещать оптические фильтры, а также другие необходимые оптические элементы, включая сканирующие.

Интересны исследования в области создания конфигураций четырехзеркальных систем с корректором полевых аберраций (ПК), использующих концепцию двухступенчатой оптики [40, 41]. Схемы длиннофокусных объективов в концепции двухступенчатой оптики (ДО), в основном, имеют небольшие поля и светосилу, вынос ПК за пределы базового модуля может способствовать развитию поля зрения.

В связи с расширением коррекционных возможностей многозеркальных систем и эффективным проектированием за счет использования пакетов прикладных компьютерных программ для оптических расчетов очевиден приоритет конструктивности и технологичности перед аберрационной коррекцией. Актуальна задача создания компактных схем для зеркальной оптики, в первую очередь, длиннофокусной; в связи с этим перспективна разработка композиций с совмещенными вершинами четных и нечетных зеркал.

### Выводы

1. Проведен анализ зеркальных анастигматов и план-анастигматов, которые позволяют исправить четыре аберрации третьего порядка. В них обеспечено удобное размещение плоскости изображения, защищенной от постороннего света специальными блендами. Зеркальные анастигматы позволяют находить области схемных решений, обладающих увеличенным углом поля зрения и высокой светосилой, требуемых при регистрации излучения слабых и достаточно протяженных объектов.

2. Установлены перспективные варианты компактных систем с совмещенными вершинами четных и нечетных зеркал, систем из трех и четырех зеркал с промежуточным изображением, составленных из двух базовых модулей, систем с двойным зеркалом.

3. Четырехзеркальные анастигматы могут использоваться в оптических приборах, работающих в широкой области спектра (от ультрафиолетовой до инфракрасной): в системах спутникового сканирования (фотографирования) земной поверхности, в геодезических приборах, военной и специальной технике и ряде других. Свойства приемников излучения и приемных устройств, спектральные характеристики отражающих покрытий могут ограничивать диапазон длин волн применения зеркальной оптики.

4. Недостатками зеркальных анастигматов являются большие габариты и технологические трудности изготовления сложных асферических поверхностей, а также значительное экранирование и виньетирование при увеличении поля зрения.

5. Работы последних лет по расчету систем показали, что некоторые традиционные теоретические представления недостаточны для решения современных задач оптоэлектроники, поэтому исследование в области четырехзеркальных анастигматов, позволяющих улучшать оптические характеристики, получили значительное место в вычислительной практике.

### Література

- [1] В. А. Бурский, “Электронно-оптическое приборостроение Беларуси – пример высокотехнологичного наукоемкого производства”, *Доклады НАН Беларуси. Спецвыпуск*, с. 94–96, 2007.
- [2] И. П. Торшина, *Компьютерное моделирование оптико-электронных систем первичной обработки информации*. Москва, РФ: Университетская книга; Логос, 2009.
- [3] В. И. Покрышкин, А. В. Илюхин, “Создание высокотехнологичной наукоемкой оптоэлектронной продукции специального назначения”, *Вести НАН Беларуси. Спецвыпуск*, с. 144–148, 2007.
- [4] М. М. Мирошников, и др., “Современные оптико-электронные комплексы как результат внедрения достижений в области оптики”, на 6-й *Межд. оптический конгресс. Оптика XXI век*, Санкт-Петербург, 2010, Ч.1, с. 2–6.
- [5] В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков, “Тенденции развития инфракрасных систем «смотрящего типа»”, *Специальная техника*, №1, с. 24–37, 2004.
- [6] А. М. Савицкий, И. М. Соколов, “Вопросы конструирования облегченных главных зеркал космических телескопов”, *Оптический журнал*, Т.76, №10, с. 94–98, 2009.
- [7] Ю. А. Гоголев, М. А. Ганн, “Работы государственного оптического института им. С.И. Вавилова в области создания космических объективов”, *Оптический журнал*, Т. 74, № 10, с. 16–33, 2007.
- [8] А. М. Савицкий, М. Н. Сокольский, “Оптические системы объективов для малых космических аппаратов”, *Оптический журнал*, Т. 76, №10, с. 83–88, 2009.
- [9] D. T. Puryayev, A. V. Gontcharov, “Compact two-mirror schemes for telescopes with a fast spherical primary”, *Optical Engineering*, Vol. 39, No 6, pp. 1692–1696, 2000.
- [10] И. В. Пейсахсон, “Оптика спектральных приборов на рубеже столетий”, *Оптический журнал*, Т. 69, № 1, с. 21–35, 2002.
- [11] Н. К. Хиеп, Т. И. Якушенкова, “Расчет и исследование двухзеркальных композиций оп-

- тических систем”, *Изв. вузов. Приборостроение*, Т. 52, №3, с.60–66, 2009.
- [12] В. А. Горшков, и др., “Автоматизированное формообразование высокоточных асферических поверхностей”, *Оптический журнал*, Т. 71, № 12, с. 5–9, 2004.
- [13] S. Kilston, D. L. Begley, “Next-generation space telescope and space-based optical SETI”, *Proc. SPIE* – 8, Vol. 4273, pp. 136–143, 2008.
- [14] В. М. Григорьев, и др., “Межпланетная солнечная стереоскопическая обсерватория”, *Оптический журнал*, Т. 73, № 4, с. 43–48, 2006.
- [15] С. А. Чупраков, “Оптические системы с децентрированными центрально-симметричными planoидными поверхностями”, автореф. дис. канд. техн. наук, ГУИТМО, Санкт-Петербург, 2008.
- [16] Национальный интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.lomotech.ru/photos/lomo\\_kosm\\_otkr.pdf](http://www.lomotech.ru/photos/lomo_kosm_otkr.pdf).
- [17] Н. К. Артюхина, “Классификация и абберационный анализ зеркальных анастигматов с монолитом из двух зеркал”, *Вестник НТУУ «КПИ»» Серия Приборостроение*, Вып. №55, с. 30–34, 2016.
- [18] Н. К. Артюхина, *Теория, методы проектирования и расчет оптики зеркальных систем.* // Минск, Республика Беларусь: Белорус. нац. техн. ун-т., 2009.
- [19] М. С. Гуревич, “Малогабаритная оптическая головка самонаведения, адаптивная к условиям сближения”, *Оптический журнал*, Т.76, №10, с. 58–62, 2009.

УДК 535.317

**Н. К. Артюхина***Білоруський національний технічний університет, Мінськ, Республіка Білорусь***ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ОПТОТЕХНІКИ ДЗЕРКАЛЬНИХ АНАСТИГМАТИВ**

У статті наведено результати аналізу особливостей проектування дзеркальних анастигматів. Системи дозволяють виправити три аберації третього порядку; в них забезпечено зручне розміщення площини зображення, захищеної від стороннього світла спеціальними блендами. Виділено групу дзеркальних анастигматів із збільшеним полем зору, а також відмічено області схемних рішень світлосильних дзеркальних об'єктивів для реєстрації об'єктів із слабким випромінюванням. Встановлено перспективні варіанти із суміщеними вершинами парних та непарних дзеркал; системи з трьох та чотирьох дзеркал із проміжним зображенням, складених з двох базових модулів.

Виокремлені тенденції розвитку конструктивних компактних схем: схеми з подвійним відбиттям від головного дзеркала з трьома відбиттями, а також чотиридзеркальні системи з моноблоком із першого та четвертого дзеркала. Повна відсутність хроматичних аберацій, висока роздільна здатність, допустимі хвильові критерії якості зображення забезпечують відмінні можливості застосування дзеркальних анастигматів.

Вони можуть застосовуватись в оптичних приладах, які працюють у різних областях спектру (від ультрафіолетової до інфрачервоної): у системах супутникового сканування (фотографування) земної поверхні, у геодезичних приладах, військовій і спеціальній техніці та низці інших галузей. Властивості приймачів випромінювання, прийомних пристроїв і спектральні характеристики відбиваючих покриттів можуть обмежувати діапазон довжин хвиль застосування дзеркальної оптики.

Недоліками дзеркальних анастигматів можуть бути великі габарити і технологічні складності та проблеми виготовлення складних асферичних поверхонь, а також значне екранування та він'єтування при збільшенні поля зору.

Роботи останніх років із розрахунку дзеркальних систем показали, що деякі традиційні теоретичні уявлення не є достатніми для розв'язання сучасних задач оптотехніки, тому дослідження в частині дзеркальних анастигматів різного ступеня складності, що дозволяють вдосконалювати оптичні характеристики, отримали широке розповсюдження в обчислювальній практиці.

**Ключові слова:** обчислювальна оптика; оптичні схеми; сферична аберація; кома; оптимізація; дзеркальна система; анастигмат; об'єктив; корекція аберацій; якість зображення; комп'ютерні програми; основні параметри оптичної системи.

**N. K. Artiukhina***Belarussian National Technical University, Minsk, Republic Belarus***DEVELOPMENT TRENDS IN OPTICAL TECHNOLOGY OF MIRROR ANASTIGMATIC SYSTEMS**

The results of the analysis of the design features of mirror anastigmatic systems were given in this article. Such systems can correct three third-order aberrations; they provide a convenient placement of the image plane, protected from stray light by special hoods. Mirror anastigmatic systems make it possible to find research areas of schematic solutions, archiving systems with an increased field of view and a high luminosity, qualities required for registering the radiation of

weak and rather extended objects. We established perspective options, with aligned vertices of even and odd mirrors; additionally, identified a group of systems based on the two-stage optic principle.

We notice the development trends of compact systems, with a monoblock of two mirrors, including three-mirror schemes with double reflection from the first mirror, and schemes with a monolith of the first and fourth mirrors, they are more technologically advanced than staggered vertex designs. The small aberration values obtained and the presence of high resolution opens up wide possibilities for the use of mirror anastigmatic systems. They can be used in optical devices operating in a wide range of the spectrum: in satellite scanning systems (photographing) of the earth's surface and thermal scanning systems.

The variety of application is limited by the range sensitivity of the photodetector and the operation range, of reflective optical coatings. The disadvantages of anastigmatic mirror systems can be large dimensions and technological difficulties in complex aspherical surface manufacturing, besides a significant central obstruction and vignetting when increasing the field of view. The recent works on the calculation of mirror systems show that some traditional theoretical concepts are insufficient for solving modern optical engineering problems.

Therefore, research in the mirror anastigmatic systems field of varying degrees of complexity; in the first place, systems with more than three mirrors, the search for original off-axis schemes that improve optical characteristics have received a significant place in the computational optics.

**Key words:** calculation optics; optical schemes; spherical aberration; coma; optimization; mirror system; anastigmat; objective; aberration correction; image quality; computer programs; the main optical system parameters.

*Надійшла до редакції  
30 жовтня 2020 року*

*Рецензовано  
08 листопада 2020 року*