

# СХЕМОТЕХНИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗЕРКАЛЬНЫХ СИСТЕМ С ПЕРЕМЕННЫМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

УДК 535.317:681.7(047)(476)

Представлен аналитический обзор зеркальных оптических систем с переменными характеристиками по типу схемных решений; даны параметрические характеристики различных конструктивных вариантов. Разработана систематизация поиска новых композиций зеркальных систем, моделирование которых развивает расчетно-методическую базу оплотехники. Определены структура и содержание элементов, позволяющих повысить функциональные возможности и оптические характеристики новых оптических и оптико-электронных приборов, работающих в УФ и ИК областях спектра, включая космическую оптику.

*The analytical scheme decision review of mirror optical systems with variable performance data is given; the performance data of different design variants are given. Systematization of searching for composition is designed for modeling new mirror systems and development of calculation optics accounting-methodical base. Structure and contents of elements that allows improving the functional possibilities and optical data of new optical and optoelectronic instruments is determined. Such systems can be used for development new optical devices: for space, UV and IR optics.*

## Введение

Проектирование оптического прибора, призванного решать возникшую проблему, начинается с поиска научно-технической идеи, которая закладывается в оптическую принципиальную систему. Расчет ее, в сущности, представляет собой точное математическое моделирование работы прибора, ревизию этой идеи. В настоящее время расширение области оптико-электронного приборостроения, создание новых (3-го поколения)

оптико-электронных приборов (ОЭП), основой которых являются матричные многоэлементные приемники излучения, чувствительные в двух или нескольких спектральных диапазонах [1], налагает определенные требования на выбор схемных решений оптики. Специфичным для многих оптических систем, к примеру, инфракрасных систем (ИКС) 3-го поколения, является изменение величины их углового поля, тогда оптимальной системой является такая, в которой каждому значению

изменяющегося углового поля соответствует свое диафрагменное число при постоянстве диаметра входного зрачка объектива, т.е. система с переменными оптическими характеристиками [2, 3]. Основными оптическими характеристиками ОЭП являются эквивалентное фокусное расстояние системы, а также линейное или видимое увеличение.

Целью статьи является систематизация сведений, необходимых для моделирования зеркальных систем с переменными оптическими характеристиками. Систематизация позволяет проводить достаточно полный анализ большого количества, на первый взгляд, довольно разнообразных схем и разрабатывать новые.

Для схемотехнического анализа установим две основные группы систем с переменными характеристиками:

- системы с дискретной переменной, где переменная фокусного расстояния или увеличения совершается скачком (смена или перемещение одного из компонентов, поворот афокальной насадки и пр.);
- панкратические системы, в которых изменение фокусного расстояния осуществляется плавно в пределах от некоторого минимального фокусного расстояния до максимального, имеющие в своем составе оптические компоненты со сложными законами движения.

В настоящее время в ОЭП на передовые позиции выходит зеркальная оптика в связи с возросшими требованиями к расширению рабочего спектрального диапазона и снижению весовых характеристик прибора [4–6]. Использование зеркальных и зеркально-линзовых объективов позволяет иметь единый входной зрачок при работе в различных спектральных диапазонах, включая и видимый; это позволяет избежать применения нескольких апертурных диафрагм (АД). Отметим также другие достоинства зеркальных систем: высокое разрешение в широкой спектральной области; отсутствие ограничений на апертуры, связанных с размерами заготовок, небольшие габариты, меньшая длина и экономичность материалов.

Улучшение технических характеристик существующих зеркальных систем и качества коррекции aberrаций может идти как по пути усложнения схемного решения, так и по пути создания оригинальных и освоения незаслуженно забытых оптических схем.

### Афокальные центрированные системы

Одним из способов создания зеркальной системы с дискретной переменной оптических характеристик является построение схемы по принципу двухступенчатой оптики (ДО), состоящей из двух основных узлов – афокальной (телескопической) системы и объектива, строящего изображение на матричном приемнике излучения. Оптические характеристики схемы: видимое увеличение  $\Gamma_{Т.С.}$  афокальной системы и фокусное расстояние объектива  $f_{\text{фок.об.}}$ . Меняя один из компонентов при

другом фиксированном, осуществляют дискретную переменную эквивалентных оптических характеристик. Каждую ступень обычно корректируют в отношении сферической aberrации, комы, астigmatизма. Задачи создания систем с дискретной переменной увеличения  $\Gamma$  требуют расчета телескопических систем различной кратности. В ИК области спектра желательно, чтобы афокальная система имела небольшое число элементов [7]. Анастигматическая афокальная оптическая система из трех зеркал переменного увеличения, работающая одновременно в видимом и ИК диапазонах спектра [8] и размещаемая перед ИК объективом, позволяет подключать другие датчики, например, телевизионную камеру видимого диапазона.

Отметим, что афокальные системы нашли широкое применение при проектировании схем составных телескопов с синтезированной апертурой, состоящих из нескольких телескопических секций и фокусирующего объектива [9, 10]. При малых полях используются системы Мерсенна с параболическими зеркалами [11], но в них не исправлена кривизна изображения.

Двухзеркальная афокальная система [12] с первым сферическим зеркалом представлена на рисунке 1 (а); отражающая поверхность второго образована вращением вокруг оси кривой, параллельной меридиональной кривой параболоида. В трехзеркальной системе, показанной на рисунке 1 (б), все зеркала сферические; центры кривизны поверхностей совмещены с центром АД, в системе уменьшены астigmatизм, кривизна поля, дисторсия и кома.

Телескопические системы, показанные на рисунке 1 (в, г), используют классические объективы Кассегрена или Грегори [13], а третье параболическое вогнутое зеркало (окуляр), расположенное перпендикулярно оптической оси объектива, переносит промежуточное изображение в бесконечность и является коррекционным элементом для устранения комы и астigmatизма объектива без нарушения коррекции сферической aberrации; кривизна изображения исправляется подбором конструктивных параметров. В схеме с промежуточным изображением после первого зеркала (рис. 1, в) третье зеркало имеет выпуклую поверхность, фокус которой совмещен с задним геометрическим фокусом эллиптического зеркала, центральное отверстие которого дает возможность устранить паразитные лучи. Квартпараболическая схема Мерсенна [14] – комбинация двух классических базовых моделей; в ней используется двойное отражение от главного зеркала и, наряду с исправленными сферической aberrацией, комой и астigmatизмом, откорректирована кривизна изображения.

В системе со схемой Мерсенна кеплеровского типа (рис. 1, д) выпуклое третье зеркало, расположенное между первым и вторым зеркалами,

вызывает затруднения при креплении, а из-за небольшого отверстия в первом зеркале возникает значительное виньетирование. Схема, в которой выпуклое зеркало выведено из промежутка между вогнутыми зеркалами и расположено вблизи малого вогнутого зеркала [16], имеет увеличенное угловое поле (рис. 1, е). Первое зеркало здесь эллиптическое, второе и третье – гиперболические; в схеме между вторым и третьим зеркалами не параллельный ход лучей, а расходящийся: за счет этого отверстие в первом зеркале увеличивается, а виньетирование уменьшается. В базовой модели с видимым увеличением  $\Gamma = 13,28^x$ , диаметром входного зрачка  $D = 1500$  мм, угловым полем зрения  $2\omega = 1^\circ$  волновые aberrации по всему полю – не более  $0,12\lambda$ .

Возможна модификация со схемой Мерсена галилеевского типа (рис. 1, ж) с промежуточным изображением после трех отражений от двух зеркал [17]. Схема становится компактной (рис. 1, з) при введении плоского зеркала для излома оптической оси; для оптических характеристик  $\Gamma = 8^x$ ,  $D = 1500$  мм,  $2\omega = 45'$  волновые aberrации – менее  $0,1\lambda$ . Квартпараболические системы могут быть успешно применены для телескопов с синтезированной апертурой с увеличенными угловыми полями. В схеме длиннофокусного составного телескопа [17] в качестве фокусирующего компонента применено сферическое зеркало (рис. 1, и), у которого центр кривизны располо-

жен в плоскости, проходящей через выходные зрачки всех секций. Сферическая aberrация не исправлена, но качество изображения удовлетворительное для  $f' = 30800$  мм, 1:11. Поле мало ( $2\omega = 14'$ ) из-за дополнительного экранирования деформированным приемником изображения.

### Афокальные децентрированные системы

Используя децентрировку входного зрачка (ДЗ), поля (РВП) или центров вращения зеркальных поверхностей системы [18], можно исключить или значительно уменьшить центральное экранирование, которое приводит к увеличению рассеяния света, вызываемого дифракцией, сопровождаемого изменением распределения энергии в дифракционном пятне и уменьшением контраста изображения [19]. Внеосевое расположение зеркал позволяет избежать перекрытия пучков лучей; афокальные внеосевые зеркала не затеяют входной зрачок, благодаря чему не происходит ухудшения функции передачи модуляции (ФПМ).

Схема В. Кинга (W. King) (рис. 2, а) состоит из трех сферических зеркал, наклон которых соответственно  $28, 7, 24^\circ$ , чем обеспечивается коррекция в области aberrаций 3-го и 5-го порядков. Базовая модель разработана для параметрических характеристик  $1/\Gamma = -3,5^x$ ,  $D' = 200$  мм при осевых габаритах 2500 мм [20].

А. Оффнером (A. Offner) предложена трехзеркальная афокальная анастигматическая систе-

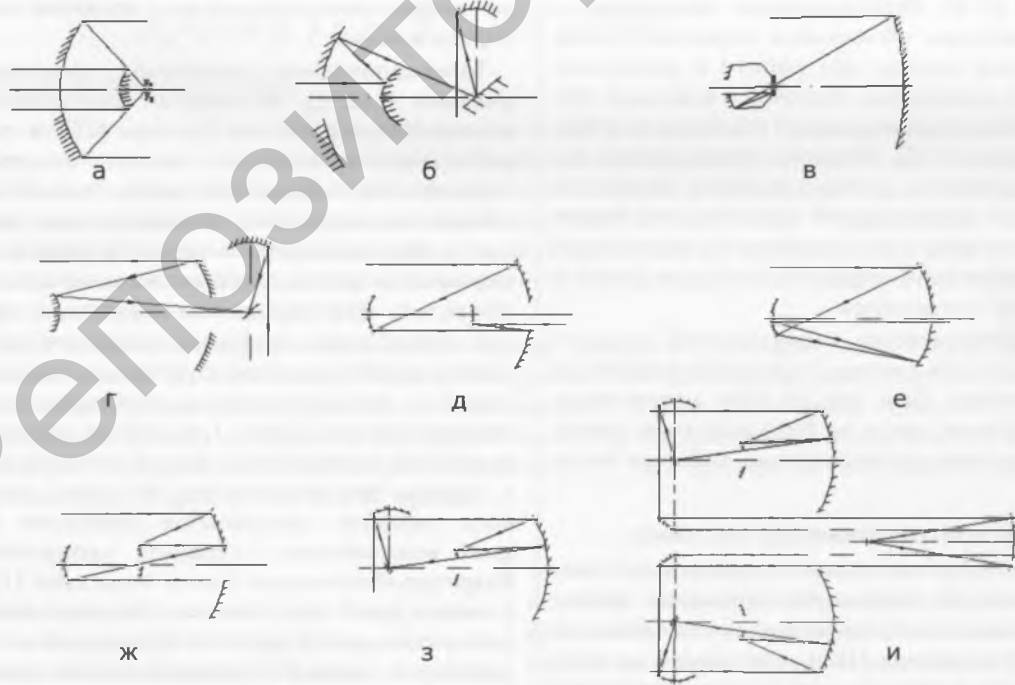


Рис. 1. Афокальные центрированные системы: а – система Д. Пуряева; б – трехзеркальная система со сферическими зеркалами; в, г – анастигматы с третьим параболическим зеркалом; д, ж, з – квартпараболические системы; е – система с совмещенными зеркалами; и – система составного телескопа

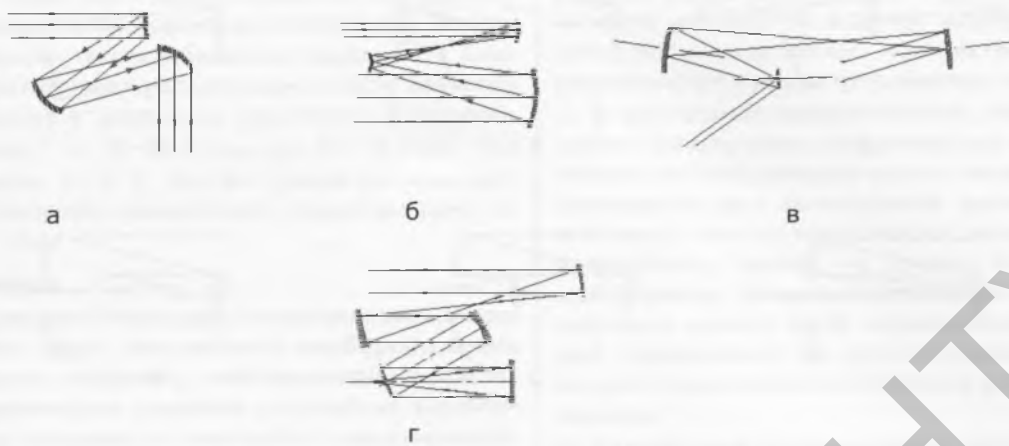


Рис. 2. Афокальные децентрированные системы: а – система В. Кинга; б – система А. Оффнера; в – система Л. Кука; г – широкоугольная система с planoидом

ма, состоящая из двух вогнутых параболических зеркал и выпуклого гиперболического зеркала. Система обладает короткой осевой длиной и обеспечивает хорошую коррекцию аберраций для больших значений видимого увеличения. На рисунке 2 (б) показан модуль с незранированным входным зрачком, рассчитанный для поля  $2\omega = 2^\circ 30'$  при увеличении  $\Gamma = -4^x$  [21].

Фирмой Karl Zeiss предложена система [22] для оптической связи. Система содержит два основных зеркала: нижнее – выпуклое гиперболическое и верхнее – вогнутое эллиптическое. Для сокращения теневой зоны между основными зеркалами добавлены два сферических зеркала (выпуклое и вогнутое), которые расположены наклонно к оптической оси основного зеркала и могут поворачиваться и центрироваться. В результате формируется четырехзеркальная система с десятикратным увеличением при условии, что оптические силы зеркал находятся в соотношении 1:2,39:1,7:1,84.

Широкоугольная трехзеркальная афокальная система Л.Кука (L.G. Cook) [23] может быть применена для целей навигации, пилотажа и др. Система (рис. 2, в) использует базовый модуль В. Кинга и обеспечивает широкое поле зрения при малом входном зрачке 0,25 дюйма и малом увеличении (поле зрения  $20 \times 40^\circ$ , видимое увеличение  $\Gamma = 0,5^x$ ). Зеркала могут иметь асферические поверхности высшего порядка, в отдельных случаях – сферические или конические.

В работе [17] описана широкоугольная зеркальная система с корректором в виде planoида (П), имеющего асферику 10-го порядка, в концепции ДО (рис. 1, г): афокальная схема Мерсенна из двух внеосевых зеркал с фокусным расстоянием  $f' = 20$  дюймов и зеркального объектива (сферическое зеркало  $f' = 20$  дюймов). Относительное

отверстие  $D/f' = 1:2,5$  при эффективной апертуре 8 дюймов, поле  $10 \times 0^\circ 22'$ , размеры полевой диафрагмы  $3,5 \times 1/8$  дюйма.

### Зеркальные панкратические системы

Линзовые панкратические объективы очень сложны по своей конструкции, имеют много компонентов, особенно при больших кратностях изменения фокусного расстояния [24]. Для зеркальных систем, обладающих простотой в конструктивном плане, известны лишь единичные варианты композиций и методик расчета схем с переменными характеристиками. В работе [25] описаны теоретические положения для зеркальных компонентов, перемещающихся вдоль оптической оси.

В двухзеркальном панкратическом объективе [26] обеспечивается  $5^x$  перепад увеличения изображения за счет перемещения первого зеркала вдоль оптической оси по линейному закону; подвижным является один компонент, поэтому плоскость изображения смещается при перемене увеличения. Объектив содержит первое сферическое вогнутое зеркало с центральным отверстием и второе – выпуклое с асферической поверхностью 2-го порядка (рис. 3, а); он может использоваться в фотографии, киносъёмке, телевидении, спектрофотометрии.

Трехзеркальный панкратический объектив [27] имеет неподвижную плоскость изображения (рис. 3, б). В объективе базовый модуль – классическая схема Кассегрена (два первых неподвижных зеркала), третье зеркало подвижно. Все зеркала асферические: первое и третье имеют форму эллипсоида, а второе – гиперboloида. Объектив относится к анастигматам и обеспечивает высокое качество изображения при изменении фокусного расстояния в пределах 1056–672 мм для  $D = 48$  мм и поля  $2\omega = 0,15-0,5^\circ$ .

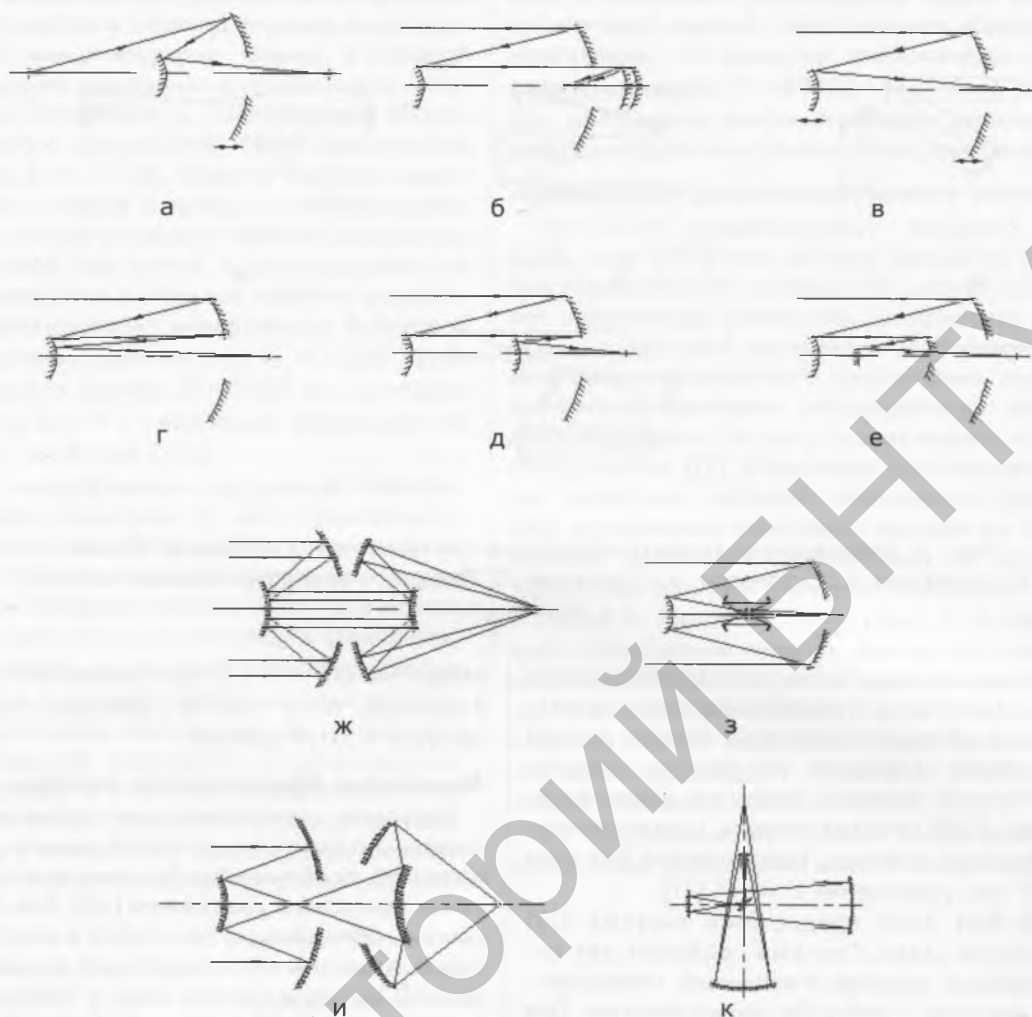


Рис. 3. Панхроматические системы: а, б — зеркальные объективы с одним подвижным зеркалом; в — объектив с двумя подвижными зеркалами; г, д, е, ж — четырехзеркальные объективы с переменным фокусным расстоянием; з — шестизеркальная композиция; и, к — базовый объектив из четырех зеркал и его конфигурация для  $f' = 66,8$  мм

Различные модели панхроматических объективов от двухзеркального до шестизеркального представлены в патенте Дж. Пинсона [28] (компания «Боинг») и предназначены для работы в УФ и ИК спектральных диапазонов. Принцип моделирования заключается в том, что увеличение изображения производится при селективном изменении фокусного расстояния отражателя, который содержит набор расположенных вдоль оптической оси зеркал с фиксированным  $f'$  каждого. Путем подбора различных типов зеркал в различных моделях определяются эффективное увеличение, вызванное осевым перемещением зеркал, и фокусировка при относительном осевом перемещении отражателя и приемника. При построении системы из двух компонентов использованы различные профили зеркальных поверхностей; одна из моделей использует классический объектив Кассегрена (рис. 3, в) и имеет неподвижную плос-

кость изображения, обеспечиваемую перемещением двух зеркал, что является достоинством. Схема (рис. 3, г) состоит из двух зеркал, но обеспечивает четыре отражения — на каждом зеркале двухкратное. В трехзеркальном объективе (рис. 3, д) лучи попадают дважды на главное зеркало. Четырехзеркальная схема (рис. 3, е) соответствует концепции ДО: классические схемы Мерсенна и Кассегрена. Рассмотрена также композиция с объективом Боузена (рис. 3, ж), в котором три зеркала имеют перемещения, а плоскость изображения неподвижна.

Создаются многозеркальные системы с переменной фокусного расстояния или линейного увеличения. На рисунке 3(з) дана композиция панхроматического объектива [29], использующая четырехзеркальный план-анастигмат с моноблоком. В работах [30–33] описаны зеркальные панхроматические объективы, предназначенные для

работы в ИК области спектра. Одна из моделей, составленная из четырех сферических зеркал по базовой схеме (рис. 3, к) [34], рассчитана из условия апланатической коррекции аберраций, но осевые габариты такого объектива порядка  $2f'$ . Система обеспечивает удовлетворительное качество изображения в диапазоне изменения фокусного расстояния  $f' = 20-66,8$  мм для  $D/f' = 1:2$ , угла поля зрения  $2\omega = 2^\circ$ . Конфигурация системы для крайней позиции трехкратного перепада дана на рисунке 3(к).

### Заключение

1. Для решения некоторых нетрадиционных современных задач оптического приборостроения необходимо создавать многозеркальные системы, позволяющие изменять оптические характеристики в пределах от некоторого минимального значения до максимального (масштаб изображения, фокусное расстояние); в том числе системы с дискретной переменной с использованием четырехзеркальных модулей.

2. Задачи создания систем с дискретной переменной увеличения требуют разработки моделей телескопических систем различной кратности. При малых полях используются классические системы Мерсенна, но в них не исправлена кривизна изображения. Установлены корректные оптические характеристики афокальных композиций: телескопические системы с вогнутым третьим зеркалом рационально рассчитывать для увеличений  $\Gamma = (-6)-(-10^X)$ , поля зрения  $2\omega = 1-2^\circ$  при экранировании по диаметру  $\varepsilon = 0,2-0,35$ . Компонировка с третьим зеркалом, ось которого перпендикулярна оптической оси объектива, обеспечивает малые увеличения ( $\Gamma = -4^X$ ), угловой размер максимальной фигуры рассеяния при этом не превышает  $\Delta\sigma' = 10''$  по полю.

3. В результате анализа принципов моделирования установлена необходимость поиска новых решений афокальных схем с промежуточным изображением для обеспечения хорошей защиты плоскости изображения от постороннего света. Одним из основных аспектов моделирования трехзеркальных анастигматических афокальных систем с промежуточным изображением является модульный подход в концепции ДО: двухзеркальный объектив и третье зеркало (окуляр), переносящее промежуточное изображение в бесконечность и устраняющее кому и астигматизм базового модуля. В зафокальной анаберрационной системе с базовым модулем (схемой Грегори) защита обеспечивается с помощью диафрагмы, роль которой выполняет центральное отверстие в третьем компоненте.

4. Проектирование в области децентрированных систем значительно расширилось благодаря новым способам компьютерной оптимизации; 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.

5. В зеркальных панкратических объективах возможно использовать механическую компенсацию плоскости изображения путем независимого перемещения двух компонентов вдоль оптической оси, когда один из компонентов перемещается по нелинейному закону, но сложно получить большой перепад фокусных расстояний или увеличений из-за малого числа коррекционных параметров, ограничений на конструктивные элементы каждого компонента и проблемы выбора базовой модели.

6. Разработана систематизация поиска новых моделей, обеспечивающих развитие расчетно-методической базы оптоэлектроники зеркальных систем с изменяемыми оптическими характеристиками. Определены структура и содержание элементов, позволяющих повысить функциональные возможности и технические характеристики новых оптических и оптико-электронных приборов с переменными оптическими элементами для УФ и ИК областей спектра, включая космическую оптику.

### Список использованной литературы

1. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения. – М.: Логос, 2007. – 192 с.
2. Тарасов В.В., Торшина И.П., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы 3-го поколения. – М.: Логос, 2011. – 242 с.
3. Тарасов В.В. Многоспектральные оптико-электронные системы / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков / Режим доступа: <http://dlib.eastview.com/browse/>
4. /doc/13113060\ 2505.11 afqks\ mht.
5. Гоголев Ю.А. Работы государственного оптического института им. С.И. Вавилова в области создания космических объективов / Ю.А. Гоголев, М.А. Ган // Оптический журнал – 2007. – Т. 74, № 10. – С. 16–33.
6. Тарасов В.В. Тенденции развития инфракрасных систем «смотрящего типа» / В.В. Тарасов, Ю.Г. Якушенков // Специальная техника. – 2004. – №1 – С. 24–37.
7. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Инфракрасные системы «смотрящего» типа. – М.: Логос, 2004. – 480 с.
8. Ллойд Д. Системы тепловидения / Д. Ллойд; пер. с англ.; под ред. А.И. Горячева. – М., 1978. – 414 с.
9. Morrison R., Stack R., Athale R. et al. An alternative approach to infrared optics. - SPIE Proc., V.7660 (2010), P.76601Y-1...11.

10. Puryayev D.T. Concept for a telescope optical system with a 10-m-diam spherical primary mirror / D.T. Puryayev // Optical Engineering. – 1996. – Vol. 35, No. 7. – P. 2017 – 2020.
11. Сычев В.В. Оптическая система адаптивного 25-метрового телескопа с составным главным зеркалом из сферических сегментов / В.В. Сычев, В.Б. Касперский, М.Л. Машинина // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 2. – С. 19–22.
12. Батышев В.И. Геометрические и оптические свойства афокальной двухзеркальной системы / В.И. Батышев, Д.Т. Пуряев // Оптический журнал. – 2009. – Т. 76. – № 1. – С. 13–19.
13. Puryayev D.T. Afocal two-mirror system / Daniil T. Puryayev // Optical Engineering. – 1993. – Vol. 32, No 6. – P. 1325–1327.
14. Артюхина Н.К. Расчет и исследование анастигматической зеркальной системы / Н.К. Артюхина, С.Я. Прислопский // Вестник БНТУ. – 2007. – № 1. – С. 42–46.
15. Русинов М.М. Несферические поверхности в оптике. Расчет, изготовление, контроль / М.М. Русинов. – М.: Недра, 1992. – 256 с.
16. Чуриловский В.Н. Теория хроматизма и аббераций третьего порядка / В.Н. Чуриловский. – Л.: Машиностроение, 1968. – 312 с.
17. Цуканова Г.И. Оптические системы телескопов с синтезированной апертурой / Г.И. Цуканова // Оптический журнал. – 1994. – № 9. – С. 28–31.
18. Артюхина Н.К. Теория, методы проектирования и расчет зеркальных систем: монография / Н.К. Артюхина, БНТУ. – Минск, 2009. – 309 с.
19. Артюхина Н.К. Анализ схемных решений децентрированных двухзеркальных систем / Н.К. Артюхина // Вестник БНТУ. – 2010. – № 4. – С. 36–39.
20. Born M., Wolf E. Principals of Optics. – 7th edition. – London: Cambridge University, 1999. – 561 с.
21. Vizgaitis J. 3rd Generation FLIR demonstrator. – SPIE Proc., V.6940 (2008), P.6940U-1...10.
22. Тарасов В.В., Якушенков Ю.Г. Современные проблемы инфракрасной техники 2011 М.: Изд. МИИГА и К, 2011. – 84 с.
23. Афокальная четырехзеркальная система для оптической связи: пат. 10038794, Германия, МКИ G02B 17/06 / заявитель Carl Zeiss SMT AG. – № 10038794; заявл. 09.08.00; опублик. 08.03.01.
24. Wide-field of view afocal three-mirror anastigmat: pat. 5173801 USA, МКИ G02B 17/06, 23/02 / L.G. Cook; assignee Huges Aircraft Company. – № 745678; filed 16.08.91 // United States Patent. – 22.12.92.
25. Объективы с непрерывно изменяющимся фокусным расстоянием для работы в инфракрасной области спектра / В.П. Иванов [и др.] // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 1. – С. 70–75.
26. Кудрина Н.К. Некоторые положения теории зеркального компонента, перемещающегося вдоль оптической оси / Н.К. Кудрина // Известия вузов СССР. Приборостроение. – 1977. – Т. 20, № 2. – С. 125 – 128.
27. Двухзеркальный объектив: а.с. 334535 СССР, МКИ G02B 17/02 / И.И. Пахомов, А.В. Шикуть; заявитель МВТУ им. Н.Э. Баумана. – № 1323400/18-10 // Бюл. изобр. – 1972. – № 15.
28. Multi-focal length, multi-field of view three mirror anastigmat: pat. 4964706 USA, МКИ G02B 5/10, 7/18 / L.G. Cook; assignee Huges Aircraft Company. – № 259012; filed 17.10.88 // United States Patent. – 23.10.90.
29. Catoptric zoom optical device: pat. 4812030 USA, МКИ G02B 5/10, 17/06, 7/18, 15/16 / G.T. Pinson; assignee Boeing Company. – № 929356; filed 12.11.86 // United States Patent. – 14.03.89.
30. Plural-zone mirror focusing system: pat. 4695139 USA, G02B 17/06, 17/08 / J.P. Bagby, R.L. Hedden; assignee Huges Aircraft Company. – № 686334; filed 26.12.84 // United States Patent. – 22.09.87.
31. Mann, A. Infrared Zoom Lens System for Target Defection / A. Mann // Optical Engineering. – 1982. – Vol. 21, No 4. – P. 786–793.
32. Woehl, W.E. An All-Reflective Zoom Optical System for the Infrared / W.E. Woehl // Optical Engineering. – 1981. – Vol. 25, No 3. – P. 450–459.
33. Desrochers, A.A. On the Analysis of an All-Reflective Zoom Optical System for the Infrared / A.A. Desrochers // Optical Engineering. – 1982. – Vol. 21, No 5. – P. 868–871.
34. Lee, S.S. Four Spherical Mirror Zoom System Continuously satisfying the Aplanatic Condition / S.S. Lee, S.Y. Rah // New Physica (Korea Physical Society). – 1988. – Vol. 28. – P. 241–247.
35. Chung, H.B. Aplanatic four mirror system / H.B. Chung, S.S. Lee // Opt. Eng.– 1985. – Vol. 24, No 2. – P. 317–321.

**Нина Константиновна Артюхина**, доктор технических наук, доцент приборостроительного факультета, профессор кафедры «Лазерная техника и технологии» Белорусского национального технического университета

Дата поступления 14.12.2012 г.