

МЕТОДИ І СИСТЕМИ ОПТИЧНО-ЕЛЕКТРОННОЇ ТА ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ

УДК 535.317.6

СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЧЕТЫРЕХЗЕРКАЛЬНЫХ АНАСТИГМАТОВ

*Артюхина Н.К., Белорусский национальный технический университет, г. Минск,
Республика Беларусь*

Представлен аналитический обзор четырехзеркальных анастигматов и план-анастигматов. Выполнена классификация таких систем по типу схемных решений. Рассмотрены перспективные варианты с совмещенными вершинами четных и нечетных зеркал, а также с моноблоком из двух зеркал, дополнительно выделена группа систем, построенных по принципу двухступенчатой оптики

Введение

В последние десятилетия зеркальные системы нашли широкое применение во многих областях науки и техники, что обусловлено рядом существенных преимуществ, которыми обладают зеркальные системы:

- возможностью работы в широкой области спектра (УФ, ИК, в рентгеновской области) и при отсутствии оптических материалов линз;
- потенциальной возможностью увеличения входной апертуры;
- сокращением габаритов, что обусловлено выбором схемного решения, а также рациональным применением плоских «ломающих» зеркал;
- уменьшением массы за счет снижения количества оптических элементов и использования облегченных конструкций зеркал;
- возможностью использования внутренних элементов зеркальной схемы для сканирования по полю.

Зеркальные системы исследуются и применяются в астрономической оптике, в приборах и комплексах аэрокосмического мониторинга Земли и околоземного пространства, в УФ микроскопии, в различных установках слежения, измерения, в системах, работающих в условиях высокой температуры или при требовании высокого пропускания. Количество зеркальных элементов в таких системах варьируется в зависимости от задачи, которую они решают. Применение четырех зеркал значительно расширяет абберрационные коррекционные возможности и обеспечивает удобное положение приемника изображения при высоких оптических характеристиках системы.

Системы с разнесенными вершинами зеркал

Впервые для построения схем из четырех зеркал в качестве базовых элементов были использованы классические системы с двухзеркальным компенсатором комы и астигматизма. Известно использование базовой системы Мерсенна

(рис. 1, а, б) и объектива Боуэна из концентрично расположенных сферических зеркал [1, 2]; возможное угловое поле в системе ограничено конструктивными габаритами и виньетированием (для коэффициента линейного экранирования $\eta = 0,32$ и виньетирования 36% поле $2\omega = 2^\circ$).

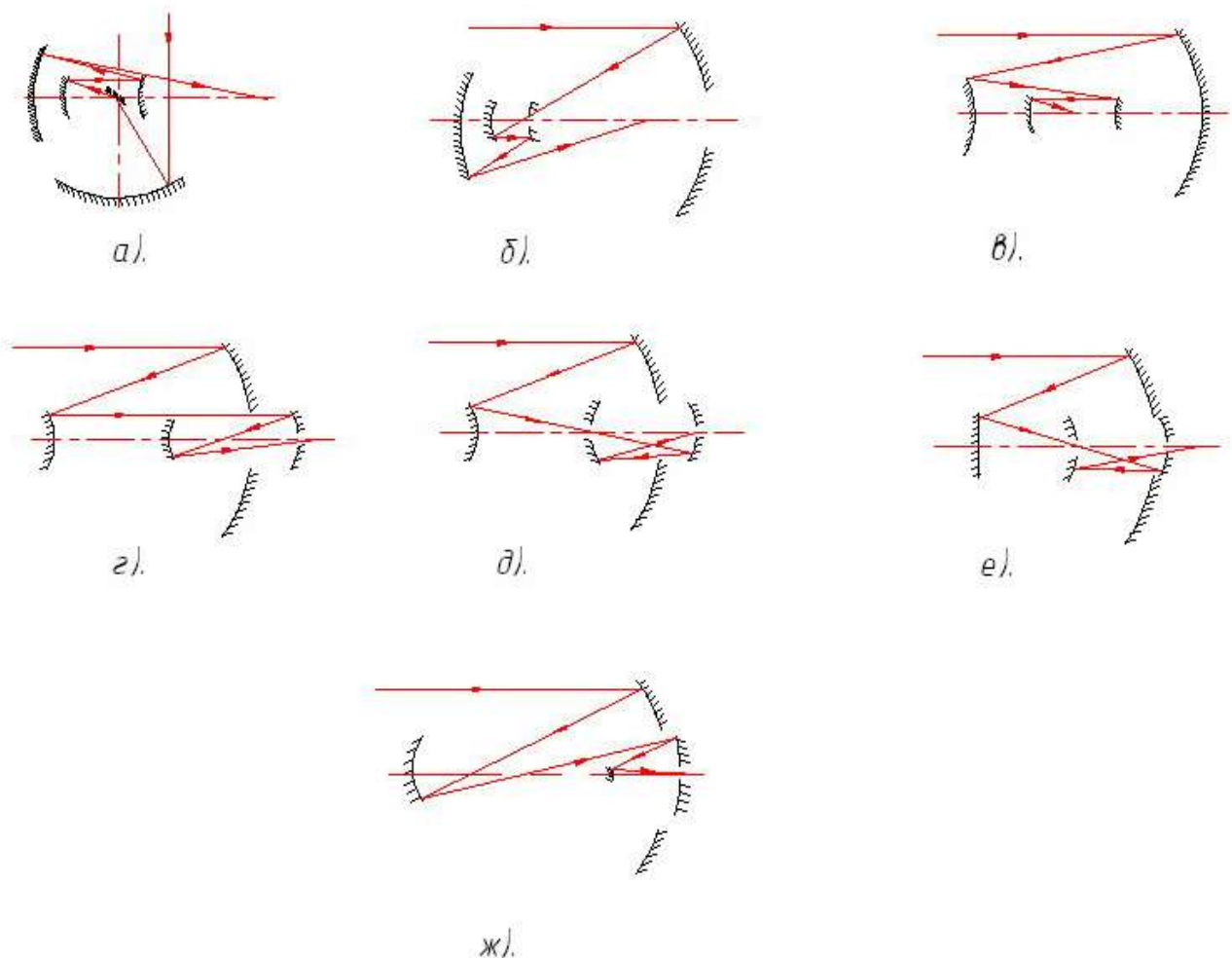


Рис. 1. Четырехзеркальные центрированные системы с разнесенными вершинами зеркал: а – система Маккарти Е.; б, в – объективы Чуриловского В., Тульевой Н.; г – система Роджерса; д, е, ж – системы, построенные по концепции ДО

Объектив (рис. 1, в) построен на основе классической системы Кассегрена и использует компенсатор из сферических зеркал с равными радиусами поверхностей [3], обладающий различными коррекционными возможностями в зависимости от его расположения. Недостатками схемы являются неудобное положение плоскости изображения и большое виньетирование наклонных пучков: в рассчитанном объективе с относительным отверстием 1: 2 и полем $2\omega = 40'$ виньетирование на краю поля около 40 % по площади зрачка. Объективы обеспечивают хорошее качество изображения (кружок рассеяния 0,04–0,07 мм).

Идея комбинации двухзеркальных блоков: афокальной насадки и фокусирующего объектива была использована З. Роджерсом при создании большого космического инфракрасного апланатического телескопа [4]. Достоинством данной системы является сферическая форма главного зеркала (но с высоким относительным отверстием 1: 0,7); три малых зеркала имеют сложную асферическую форму. Схема Мейнела–Роджерса [5] представлена на рис. 1, г.

А. Мейнел, развив идеи построения сбалансированных конфигураций многозеркальных телескопов, сформулировал концепцию двухступенчатой зеркальной системы [6–8], образующей промежуточное изображение. Схема двухступенчатой оптики (ДО) дает много преимуществ: позволяет обеспечивать радиусы выпуклых поверхностей меньшей кривизны и более технологичную форму асферических зеркал, упрощает систему бленд; дает эффективную и удобную точку в схеме для размещения таких элементов, как светофильтры, фокальные корректоры, сканирующие элементы, поляризаторы, преобразователи изображения и т.д. [9, 10].

Схема четырехзеркального объектива построена на основе известного телескопа Ричи–Кретьена с гиперболическими зеркалами при добавлении двух малых и смещении выпуклого зеркала (рис. 1, д): его относительное отверстие 1: 2,5, поле 30', длина 7,7 м [11]. Зеркала имеют асферичность высшего порядка, что вызывает технологические трудности при изготовлении.

Зеркальный объектив с малой осевой длиной $l = 0,1f'$ [12] содержит работающий с увеличением $\beta = 6.9^x$ корректор полевых аберраций (ПК) из третьего эллиптического и четвертого сферического зеркала, расположенного в плоскости промежуточного изображения (рис. 1, е). Такие объективы с угловым полем $2\omega = 1,3^\circ$, относительным отверстием 1: 10 и диаметрами главного эллиптического зеркала, равными 0,7, 1 и 1,5 м разработаны на ОАО «Ломо». Недостатком является сложная асферическая форма высшего порядка второго зеркала. Аналогичная схема, но с базовой схемой типа Грегори и зеркального ПК из выпуклого и вогнутого зеркал [13] представлена на рис. 1, ж.

Системы с монолитом из двух зеркал

Вынос зеркального корректора из двух последних зеркал за пределы базовой системы дает возможность увеличивать их диаметры, тем самым развивать поле зрения при допустимых значениях виньетирования и экранирования. Группа из двух первых зеркал строит промежуточное изображение вблизи вершины первого зеркала, имеющего центральное отверстие, а ПК переносит его с некоторым увеличением в эквивалентную фокальную плоскость. Схема объективов получается компактной, а конструкция интересна тем, что первое и четвертое зеркала можно выполнить в виде монолита.

Такой объектив с промежуточным изображением после второго зеркала впервые был рассмотрен в работе автора [14]. В системе первое зеркало эллиптическое, а третье гиперболическое, но асферичность зеркальных поверхностей

0,01–0,015мм, что соответствует технологическим стандартам. При экранировании по площади 25 % возможен анастигмат с плоским полем для $f' = 200\text{мм}$ при характеристиках 1: 1,2 и $2\omega = 6^\circ$ [5], причем волновые aberrации не превышают $0,8\lambda$ по всему полю зрения. Анастигмат, рассчитанный по принципу ДО [13], из афокальной насадки (системы Мерсенна) с видимым увеличением $\Gamma_{\text{т.с.}}$ и объектива Боуэна (рис. 2, б), откорректированных в отношении сферической aberrации, комы и астигматизма. Эквивалентное фокусное расстояние $f'_{\text{сист}} = \Gamma_{\text{т.с.}} \cdot f'_{\text{фок.об.}}$. Объективы представлены на рис. 2, а, б.

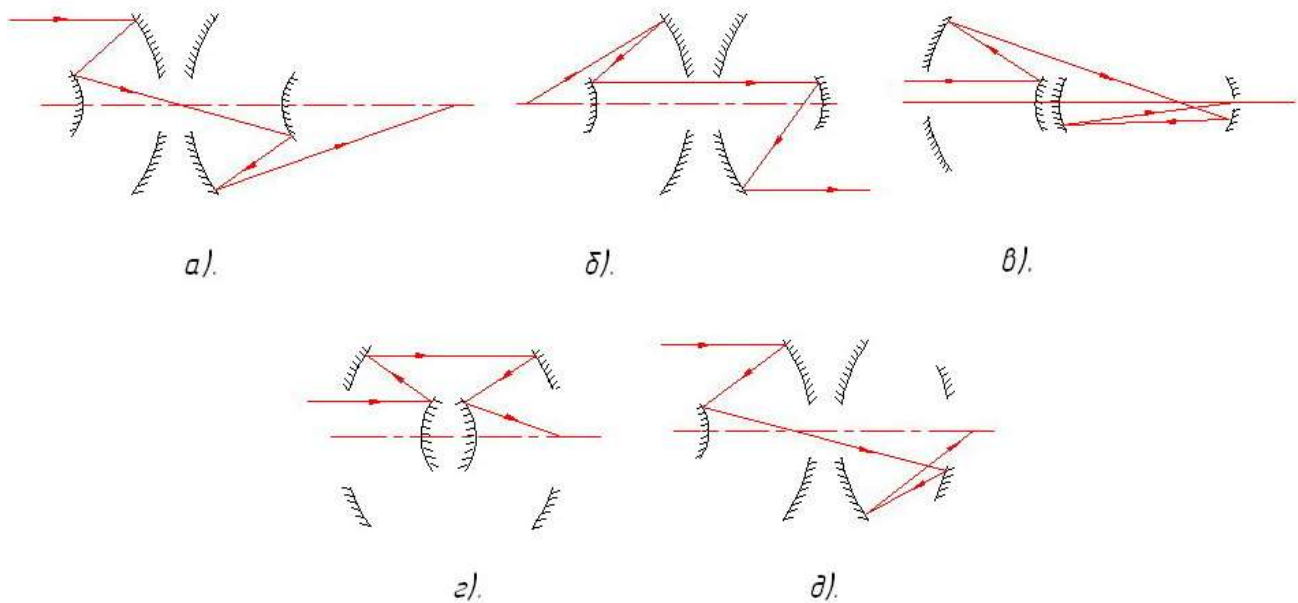


Рис. 2. Четырехзеркальные анастигматы с монолитом из двух зеркал: а, б, в – объективы Чуриловского В., Кудриной Н.; г – объектив Берча Г.; з – объектив «Рефлектар» (ГОИ им. С.И.Вавилова)

Модификацией этого анастигмата (при рассмотрении схемы в обратном ходе лучей) является апланатическая схема Чанга–Ли [5, 15], содержащая только сферические зеркала. Система с осевой длиной $l = f'$ рассчитана для характеристик $f' = 100\text{ мм}$, 1: 2 и $2\omega = 2^\circ$.

На рис. 2, в, г представлены анастигматы с осевой длиной $l = (1,25–1,5) f'$, содержащие асферические поверхности различного профиля [5, 16–18]. В этих объективах первое и четвертое зеркала – моноблок, но диаметр второго зеркала больше диаметра входного зрачка. В работах [19–21] рассмотрен ряд других светосильных анастигматов с хорошим исправлением aberrаций, развивающих эти схемные решения, классификация которых описана в [22].

Объективы «Рефлектар» [21] с промежуточным изображением (рис. 2, д), рассчитанные в ГОИ им. С.И. Вавилова, получили довольно широкое распространение. Объективы обеспечивают следующие характеристики: $f' = 800–1500$

мм, относительное отверстие 1: 1,5–1 : 2, поле зрения до 10° при качестве изображения, близком к дифракционному для дальней ИК области спектра. Форма всех четырех зеркал является асферикой высшего порядка. Известна модификация объектива с плоской формой третьего зеркала, что упрощает конструкцию и технологию [23].

Компактные четырехзеркальные схемы

Компактные системы из четырех зеркал представлены на рис.3.

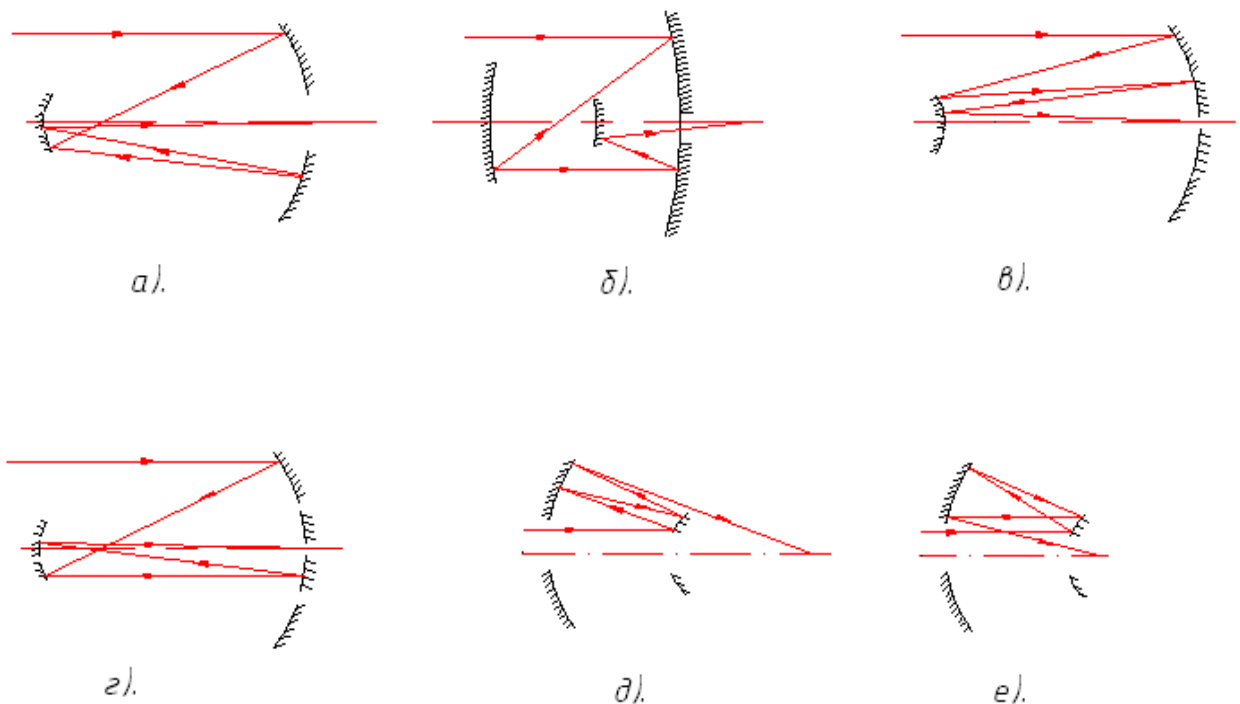


Рис. 3. Компактные четырехзеркальные системы: а, б – объективы Русинова М. М., Цукановой Г.; в – объектив Корша Д.; г – объектив Гашкина И., Янушко Н.; д, е – объективы Артюхиной Н.

Среди них выделим две группы компактных зеркальных систем,

– в которых первое и третье зеркала имеют приблизительно равные радиусы кривизны поверхностей и изготавливаются из одного блока стекла (трехзеркальные схемы с двойным отражением от первого зеркала);

– вершины поверхностей четных и нечетных зеркал совмещены (двухзеркальные системы с двойным отражением от зеркал).

Они более технологичны, чем системы с разнесенными вершинами зеркальных поверхностей, в которых дополнительное крепление малых зеркал приводит к увеличению центрального экранирования.

Первая группа включает объективы–анастигматы [24, 25], имеющие чрезвычайно короткую длину ($0,1 f'$ и менее) и удобное положение неискривленной

поверхности изображения. На рис. 3, а показана система, в которой главное и второе зеркала, имеющие поверхности зеркал четвертого и пятого порядка соответственно, образуют рассеивающую систему (третье зеркало – гиперболоид второго порядка). В другом объективе (рис. 3, б) зеркала по форме такие же, как и в первом, но профиль их поверхностей менее сложный, а первые два зеркала образуют афокальную систему.

Вторую группу представляют объективы с попарно совмещенными вершинами зеркал. В работе [26] рассмотрен объектив с базовой схемой Кассегрена (рис. 3, в), в котором исправлены четыре aberrации: сферическая, кома, астигматизм и дисторсия. В системе с характеристиками $1: 13,2$, $f' = 13200$ мм пятно рассеяния имеет угловой размер менее $0',026$ по размеру невиньетированного поля $30'$. Длина системы 147 см, диаметр главного зеркала 100 см, в ней присутствуют кривизна изображения и виньетирование. Зеркала 3 и 4 имеют большую асферичность. В этой же работе описан другой вариант схемы, состоящей из трех компонентов (с двухкратным отражением от главного зеркала). Зеркала 1 и 3 в этом случае являются монолитом, при этом в системе исправлены три aberrации: сферическая, кома и астигматизм.

Объектив, показанный на рис. 3, г, использует базовую систему Грегори, все четыре вогнутых зеркала выполнены асферическими [27]. Расстояние между вершинами попарно совмещенных зеркал составляет $0,99-1,09$ суммы фокусных расстояний этих зеркал. Осевая длина объектива порядка $0,1 f'$.

Два объектива, предложенные автором и представленные на рис. 3, д, е, имеют схемы, обеспечивающие процесс повторного отражения пучка световых лучей от двух сферических зеркал. Оба объектива – анастигматы с апланатической коррекцией aberrаций; они могут найти применение в астрофизике и в спектроскопии; а также в рентгеновской технике. Объектив (рис. 3, д) [28, 29] усовершенствует известную схему Боуэна из двух концентрических зеркал: поперечные размеры в ней уменьшены в 1,5; а продольные – в 2,5 раза при одинаковом значении фокусного расстояния. Осевая длина $l = 0,8 f'$, плоскость изображения вынесена ($\delta = 2,5 f'$), что дает возможность размещения сканирующих элементов, фильтров и т.д. Объектив достаточно светосилен, в нем отсутствует дисторсия, поле зрения системы ограничивается кривизной поверхности и может достигать 15° , потери света возникают из-за экранирования (50 % по площади). Второй объектив [30, 31] имеет два схемных решения: в одном – изображение располагается у вершины первого зеркала, причем $l = 1,4 f'$, и квадраты эксцентриситетов зеркальных поверхностей отрицательны, во втором изображение вынесено (рис.3, е), $l = 0,82 f'$, а квадраты эксцентриситетов положительны. Кривизна изображения исправлена в варианте со сферическими поверхностями, радиусы кривизны которых $r_1 = r_3$, $r_2 = r_4$. Система отличается малым влиянием aberrаций высших порядков, лучшим качеством изображения в пределах поля $2\omega = 6^\circ$ и простотой конструкции при малых габаритах. При

фокусном расстоянии $f' = 200$ мм, относительном отверстии $D/f' = 1:4$ на оси частота 100 л/мм передаётся с контрастом 0,77.

Выводы

1. Проведен аналитический обзор четырехзеркальных анастигматов и план-анастигматов. Системы позволяют исправить четыре аберрации третьего порядка; в них обеспечено удобное размещение плоскости изображения, защищенной от постороннего света специальными блендами. Классифицированные 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. Рассмотрены перспективные варианты с совмещенными вершинами четных и нечетных зеркал, а также с моноблоком из двух зеркал, дополнительно выделена группа систем, построенных по принципу двухступенчатой оптики.

3. Малые остаточные аберрации и наличие высокой разрешающей способности открывают широкие возможности по применению четырехзеркальных анастигматов. Они могут использоваться в оптических приборах, работающих в широкой области спектра: в системах спутникового сканирования (фотографирования) земной поверхности и в системах теплового сканирования. Спектральный диапазон применения ограничивается областью спектральной чувствительности фотоприемника и областью работы отражающих покрытий.

4. Недостатками систем могут быть 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 оплотехники, поэтому исследования в области четырехзеркальных анастигматов, позволяющих улучшать оптические характеристики, получили значительное место в вычислительной практике.

Литература

1. McCarthy E. L. Anastigmatic catoptric system. //Patent USA №3062101, 1962.
2. Чуриловский В.Н., Тульева Н.Н. Четырехзеркальный объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 425155, 1974.
3. Чуриловский В.Н., Тульева Н.Н. Четырехзеркальный объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 428341, 1974.
4. J. Rodgers J. Nonstandard representations of aspheric surfaces in a telescope design.// Applied Optics. -1984, v. 23, № 4. P.520-522.
5. Попов Г.М. Современная астрономическая оптика.-Л.: Наука, Гл.ред.физ.-мат.лит., 1988.-192с.
6. Рябова Н.В. Концепция двухступенчатой оптики для крупных телескопов. // Оптический журнал. - 1995, №10. С.4-12.
7. Meinel A., Meinel M. Two-stage optics.//Optical Engineering.– 1992, v.31, № 11. P.2271–2279.

8. Еськов Б.Э., Бонштедт Б.Э., Лебедева Г.И. и др. Внеатмосферные адаптивные телескопы (направления развития). // Оптический журнал. - 1995, №10. С.12-15.
9. Подоба В.И., Лебедева Г.И., Еськов Д.Н. Особенности приемного оптического телескопа для лидара космического базирования. // Известия вузов. Приборостроение. – 2002, т. 45, №2. С.28-23.
10. Ю.А. Гоголев, М.А. Ган. Работы ГОИ им. С.И. Вавилова в области создания космических объективов.// Оптический журнал. - 2007, т.74, №10. С.3-11.
11. Su Ding – Qing Shao Lian- Zhen and Liang Ming. A configuration of optical system for a 5 m telescope. // Optica Acta. – 1982, v.29, № 9. P. 1237-1242.
12. Лысенко А.И., Маламед Е.Р., Сокольский М.Н. и др. Оптические схемы объективов космических телескопов. // Оптический журнал. - 1999, т.69, №9. С.21-25.
13. Burch C.R. Application of the plate diagram to reflecting telescope design.// Optica Acta. – 1979, v.26, № 4. P. 493 – 504.
14. Кудрина Н.К. Зеркальный светосильный объектив с увеличенным полем зрения. // Вопросы исследования и разработки точных систем приборостроения. Труды ЛИТМО. – 1977. - № 89. – С.27-30.
15. Chung H. B., Lee S.S. Aplanatic four mirror system. // Optical Engineering.– 1985, v. 24, №2. P. 317 – 321.
16. Кудрина Н.К., Чуриловский В.Н.Зеркальный объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 645112, 1979.
17. Кудрина Н.К., Чуриловский В.Н.Зеркальный объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 593173, 1978.
18. Artyukhina N.K. , Shkadarevich A.P. Mirror Recording system with a Large Field of View. // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2005, v. 78, № 6. P. 1231 - 1236.
19. Кудрина Н.К., Чуриловский В.Н.Объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 579592, 1977.
20. Кудрина Н.К., Чуриловский В.Н.Объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 605188, 1978.
21. Лебедева Г.И., Гарбуль А.А. Перспективные аэрокосмические зеркальные объективы. // Оптический журнал. – 1994, № 8. С. 57 - 62.
22. Артюхина Н.К., Шкадаревич А.П. Классификация четырехзеркальных анастигматов с двойным зеркалом. //Доклады НАН РБ. - 2005, т. 49, № 1. С. 43 - 46.
23. Артюхина Н.К. Зеркальный объектив. //Патент РБ на полезную модель № 4518, 2008.
24. Цуканова Г.И., Русинов М.М. Длиннофокусный зеркальный объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 337749, 1972.
25. Цуканова Г.И., Русинов М.М. Объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 297021, 1972.
26. Korsh Dietrich. Two well-corrected four-mirror telescopes. // Applied Optics. – 1974, v.13, № 8. P. 1767 .
27. Гашкин И.С., Янушко Н.М. Зеркальный объектив. //Авторское свидетельство СССР на изобретение № 648931, 1979.
28. Artyukhina N.K.. System of two spherical mirrors with double reflection. // Journal of Optical Technology. – 2005, v. 72, № 10. P. 781 - 783.
29. Артюхина Н.К., Константинов Д.В. Зеркальный объектив с четырьмя отражениями. //Патент РБ на изобретение № 4111, 2001.
30. Артюхина Н.К., Богатко А.В., Толстик Н.А. Зеркальный объектив.// Патент РБ на изобретение № 9022, 2007.

31. Артюхина Н.К., Шкадаревич А.П. Коррегированные зеркальные системы с двойным отражением. //Журнал прикладной спектроскопии.- 2007, т. 74, № 2. С. 267 - 271.

<p>Артюхина Н.К. Стан і перспективи розвитку чотиридзеркальних анастигматів Представлено аналітичний огляд і класифікацію чотиридзеркальних анастигматів та план-анастигматів. Розглянуто перспективні варіанти з суміщеними верхівками парних та непарних дзеркал, а також з моноблоком з двох дзеркал, додатково визначена група систем, що побудовані за принципом двоступеневої оптики. Об'єктиви можуть використовуватися в космічній оптиці та оптичних приладах, які працюють в УФ та ІЧ діапазонах спектру.</p>	<p>Artioukhina N.K. The state and progress perspectives of four- mirrors anastigmats The analytical review and classification of four- mirrors anastigmats were given. The plane-field anastigmats were discussed. Different variants of designs are described. The perspective four mirrors plane - anastigmats consisting the first and fourth surfaces be combined and compact ones are considered. The problem of two stage optics was investigated. The objectives are useful for space optics and optical devices using UV and IR spectral range research.</p>
--	---

Надійшла до редакції
5 березня 2009 року

УДК 621.383

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАТИВНОСТИ ТЕПЛОВИЗИОННЫХ СИСТЕМ ВИДЕНИЯ

Сизов Ф.Ф., Шевчик-Шекера А.В., Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины, г. Киев, Украина

На основе разработанного ранее тепловизора с 128-элементной ИК (инфракрасной) фотодиодной линейкой HgCdTe, рассмотрены вопросы повышение информативности тепловизионных приборов за счет добавления видимого канала, обеспеченного наличием CCD камеры STS-104/16

Введение

Обширный спектр задач, решаемый с помощью тепловизионных систем, в помощь человеку, стимулировал поиск путей их дальнейшего развития и усовершенствования.

Тепловизионные приборы, воспринимая ИК-излучение, обеспечивают видимость окружающих нас предметов без дневной подсветки (пассивные) или с помощью искусственных подсветок (активные), позволяют видеть объекты даже при наличии неблагоприятных погодных условий: туман, дождь, град, задымленность и т.д. К недостатками относят специфический характер термограмм: нечеткую детализацию объектов, малую контрастность, необходимость расшифровки цветопередачи наблюдаемых температур и др. Для устранения этих недостатков, разработчики тепловизионных систем, объединяют несколько спектральных диапазонов, каждый из которых несет свою, отличаю-