

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 $2\omega = 2^\circ$).

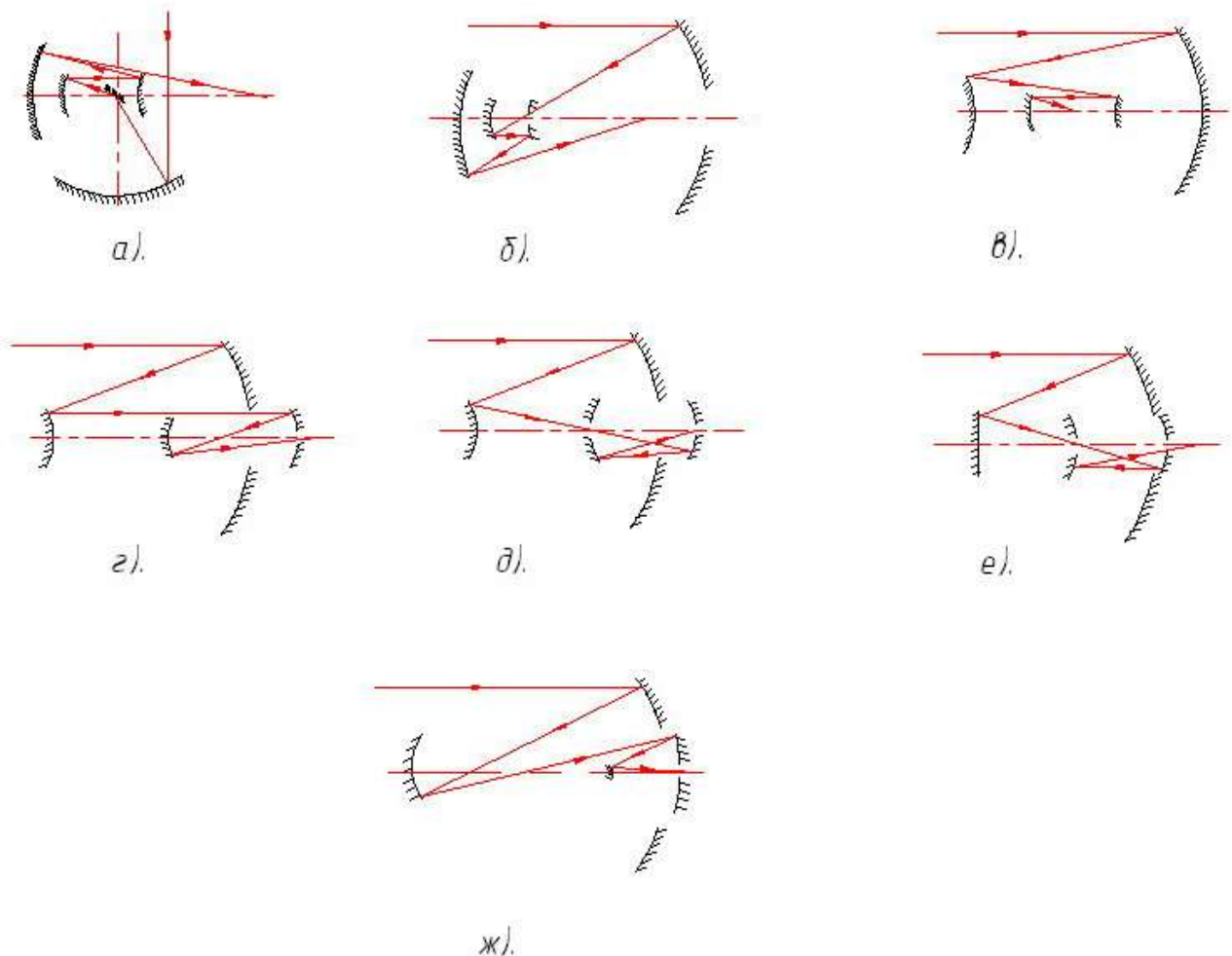


Рис. 1. Четырехзеркальные центрированные системы с разнесенными вершинами зеркал: а – система Маккарти Е.; б, в – объективы Чуриловского В., Тульевой Н.; г – система Роджерса; д, е, ж – системы, построенные по концепции ДО

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.

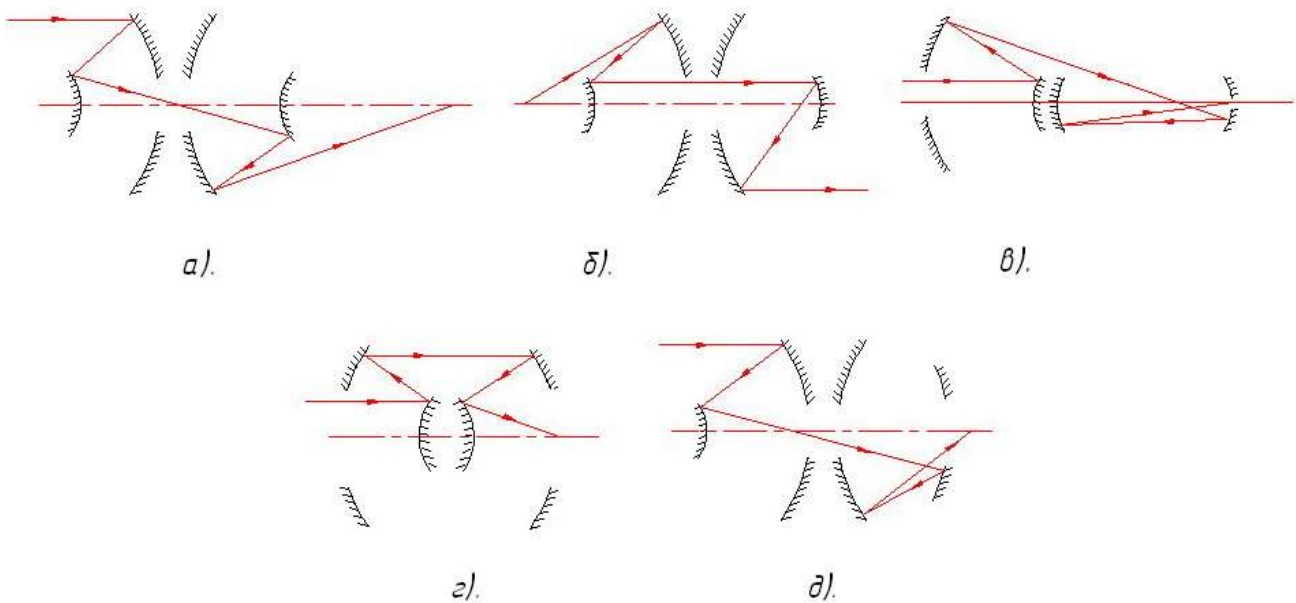


Рис. 2. Четырехзеркальные анастигматы с монолитом из двух зеркал: а, б, в – объективы Чуриловского В., Кудриной Н.; г – объектив Берча Г.; з – объектив «Рефлектар» (ГОИ им. С.И.Вавилова)

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.

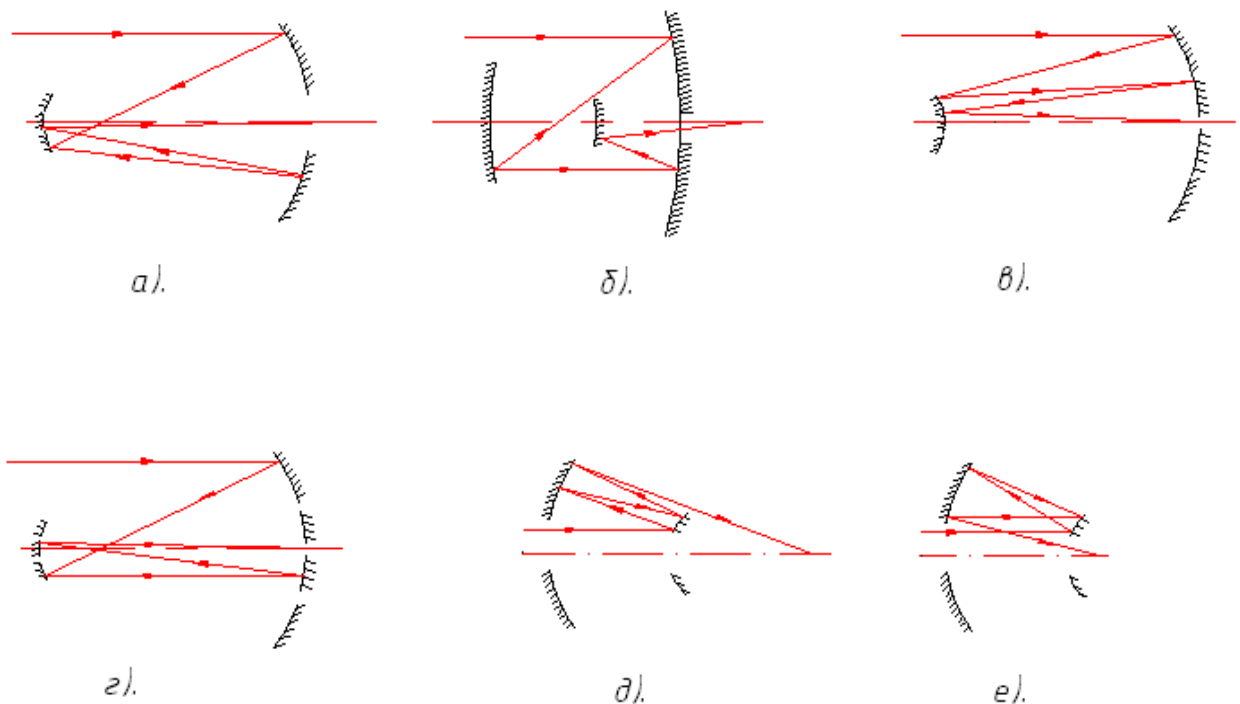


Рис. 3. Компактные четырехзеркальные системы: а, б – объективы Русинова М. М., Цукановой Г.; в – объектив Корша Д.; г – объектив Гашкина И., Янушко Н.; д, е – объективы Артюхиной Н.

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-

шуюся от другого, інформацію об об'єкті спостереження, що дозволяє підвищити інформативність отриманого зображення [1–4].

Постановка задачі

Повищити інформативність раніше розробленого тепловизора з 128-елементної ІК фотодіодної лінійкою HgCdTe за рахунок додавання каналу реєстрації видимого випромінювання. Показати зв'язок кількості чутливих елементів технічних систем бачення та інформативної ємності.

Інформативна ємність технічних систем бачення

Для технічних систем бачення, головним критерієм, що характеризує їх потенціал, є можлива гранична інформативна ємність таких систем, обмежена тільки флуктуаціями потоків випромінювання в них.

В даному випадку мірою інформативності будемо вважати відношення кількості інформації, сприйнятої цією системою, до кількості інформації, що міститься в потоці випромінювання, що потрапляє в систему.

Для чутливого елемента площею A_d , при умові освітлення його джерелом випромінювання ламбертового типу, кількість фотонів n_s , що викликають сигнал, за час τ_n , від повної густоти потоку N з урахуванням квантової ефективності η та кута зору θ , становитиме [5]

$$n_s = \eta \cdot \tau_n \cdot A_d \cdot N \cdot \sin^2\left(\frac{\theta}{2}\right). \quad (1)$$

Шум, пов'язаний з флуктуаціями потоку фотонів у випадку пуассонівського розподілу, становитиме $n_n = (n_s)^{1/2}$.

Тоді кількість градаций сигналу Q , яку можна буде розрізнити, з урахуванням величини коефіцієнта порогового відношення сигнал/шум k , визначається виразом

$$Q = \frac{n_s}{k \cdot n_n} = \frac{1}{k} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sqrt{\eta \cdot A_d \cdot \tau_n \cdot N}, \quad (2)$$

де k – порогове відношення сигнал/шум. Для забезпечення достовірності виявлення сигналу $D > 98\%$, $k > 2$ [6].

Для кожного чутливого елемента інформативна ємність, виражена в битах інформації, є бінарним логарифмом кількості градаций сигналу. В двоичній системі кількість градаций $Q = 2^b$. Тоді, кількість байтів становитиме виразом

$$\frac{b}{8} = \frac{\log_2 Q}{8}. \quad (3)$$

Для одного елемента зображення (одного оптичного каналу) інформативна ємність [7]

$$C = \frac{\log_2 Q}{8} = \frac{1}{8} \cdot \log_2 \left[\frac{1}{k} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sqrt{\eta \cdot A_d \cdot \tau_n \cdot N} \right], \text{ [байт]}. \quad (4)$$

Для числа M каналов (например, матрица из M элементов или M – число элементов разложения изображения) информативная емкость

$$C_M = \frac{M}{8} \cdot \log_2 \left[\frac{1}{k} \cdot \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) \cdot \sqrt{\eta \cdot A_d \cdot \tau_n \cdot N} \right], \text{ [байт]}. \quad (5)$$

Это выражение определяет предельную информативную емкость кадра системы видения при наличии только шумов, связанных с флуктуациями потока фотонов. Из формулы (5) видно, что для увеличения информативной емкости изображения в данной области спектра, необходимо увеличивать число элементов изображения (число элементов разложения), т.к. все остальные параметры входят под знак логарифма и в значительно меньшей степени влияют на информативную емкость систем видения. Поэтому на сегодняшний день глаз по своим возможностям с этой точки зрения остается непревзойденной системой (более 10^8 рецепторов). В используемом тепловизионном приборе со 128-элементной линейкой ИК приемников излучения, получаемое число элементов разложения в изображении $M \cong 2 \cdot 10^4$.

В случае многоспектральных систем технического зрения информативная емкость пропорциональна числу независимых спектральных каналов [8].

Таким образом, одним из возможных путей повышения информативности получаемых изображений в различных участках спектра является добавление спектральных каналов регистрации изображения.

Двухспектральный тепловизионный прибор. Обсуждение путей повышения информативности

На базе тепловизионного прибора с приемником, 128-элементной линейкой фотодиодных приемников излучения на основе кадмий-ртуть-теллур (КРТ), охлаждаемым жидким азотом (78 К), был сконструирован второй канал приема информации в видимой области спектра (рис.1.). В качестве приемника видимого излучения использовалась кремниевая CCD STS–104/16 камера с параметрами: 1/3" LG CCD, 420TVL, $f = 16\text{мм}$, 0,1Lux, DC12V, 32x32мм.

На сегодняшний день, существует определенная классификация многоканальных приборов, в зависимости от конструкции прибора и способа вывода изображения на экран дисплея. Существуют комплексированные, комбинированные и интегрированные многоканальные приборы ночного видения, к которым также относят и тепловизионные приборы [4].

Реализованная конструкция относится к комплексированной, в которой объединено в одной конструкции два канала, обеспечивающие работу прибора в дальнем ИК-спектре (8-11,2 мкм) и в видимом спектре излучения (0,4-1,1 мкм). Каждый канал имеет свое входное окно и функционирует отдельно друг от друга, изображение выводится на общий ЖК-монитор, методом последующего переключения тумблера или на дисплей ноутбука, в режиме одновременного наблюдения в 2 отдельных окнах. Главным условием получения одного и того же изображения двумя спектральными каналами, является совместимость

их оптических осей визирования. Для данной конструкции CCD камера установлена непосредственно над входным окном канала приема ИК-излучения.



Рис. 1. Двухканальный тепловизор на основе 128 элементной HgCdTe линейки фотоприемников

Учитывая незначительное рассогласование между оптическими осями двух каналов, связанного с наличием отдельных входных окон для регистрации излучения, на рис.2. представлены зависимости угла расхождения от расстояния до объекта наблюдения. Расчеты показали, что для объектов наблюдения свыше $L = 5\text{ м}$, рассогласование между оптическими осями двух каналов не превышает $\omega = 50'$, что является различимым для человека с остротой зрения 100% или $\omega = 1'$, но является незначительным для сопоставления наблюдаемых объектов видимым и тепловизионным каналами. С увеличением расстояния до наблюдаемых объектов угол уменьшается обратно пропорционально расстоянию $\omega \sim \frac{1}{L}$.

В связи с тем, что информативная емкость слабо зависит от количества фотонов (см. формулу 5), падающих на приемную площадку, зависимость S_m от спектрального диапазона системы видения не является определяющей. Это хорошо заметно по данным из таблицы 1. В таблице 1 представлены значения потока фотонов N_e , для разных типов системы, регистрируемых приемником излучения в области его спектральной чувствительности $\lambda_s - \lambda_{co}$. N – плотность потоков фотонов приходящиеся на видимую область спектра ($N = 2,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$) и ИК область спектра ($N = 3,8 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$).

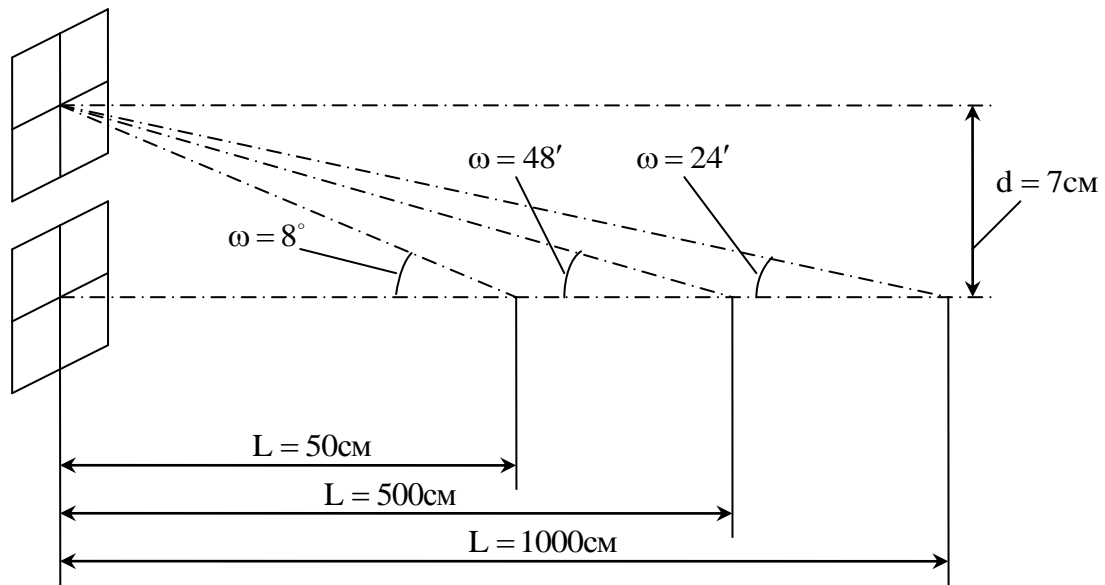


Рис. 2. Зависимость угла рассогласования оптического и ИК каналов, в зависимости от расстояния между оптическими осями этих каналов и расстояния до объекта наблюдения

При интегрировании распределения Планка получаем значение N_e , затем $\log(N/N_e)$, а затем – коэффициент использования информационной емкости $C(\lambda_c - \lambda_{co})/C(0 - \infty)$. Значения N превышают величины N_e от 10 до 100 раз в разных спектральных диапазонах. Однако вследствие логарифмической зависимости C от плотности потока фотонов информационная емкость сильнее всего уменьшается для диапазона (3 – 5) мкм, но это уменьшение составляет лишь $\cong 30\%$.

Таблица 1 – Информационная емкость систем видения в разных спектральных диапазонах чувствительности приемников излучения [6] при квантовой эффективности $\eta = 1$

Параметр	Тип системы					
	Дневного наблюдения			Тепловизионные		
$\lambda_c - \lambda_{co}$, мкм	0 – ∞	0,45 – 0,95, (Si фотопр.)	Глаз	0 – ∞	8 – 14, HgCdTe	3 – 5, InSb, PtSi
N, N_e , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{17}$	$7,6 \cdot 10^{16}$	$2,3 \cdot 10^{16}$	$3,8 \cdot 10^{18}$	$8,5 \cdot 10^{17}$	10^{16}
C , байт/кадр	$1,83 \cdot M$	$1,73 \cdot M$	$2,10 \cdot M$	$2,09 \cdot M$	$1,95 \cdot M$	$1,55 \cdot M$
$C(\lambda_c - \lambda_{co})/C(0 - \infty)$	1	0,95	1	1	0,93	0,74

Для оценок информационной емкости технических систем видения площади чувствительных элементов выбирались $A_s = (30 \times 30) \text{ мкм}^2 = 9 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2$, времена накопления брались обратные телевизионной частоте кадра: $\tau_n = 4 \cdot 10^{-2} \text{ с}$. Диафрагменное число принималось равным $F/\# = F/1$, что соответствует $\sin(\theta/2) \approx 0,45$. Коэффициент порогового отношения сигнал/шум $k = 5$. Для глаза время накопления $\tau_n = 0,1 \text{ с}$, площадь чувствительного элемента $A_{\text{гве}} = \frac{\pi D^2}{4} \approx 7 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$, где $D \approx 3 \text{ мкм}$ - поперечное сечение колбочек в центральной ямке глазного дна человека.

Таким образом, формат матрицы является главным в определении информативной емкости приемников излучения. В табл.2. приведены для сравнения некоторые значения форматов матриц тепловизионных приборов и видеосистем. Очевидно, при современном развитии этой техники, учитывая сложность изготовления приемников ИК-излучения, приемники для регистрации видимого спектра излучения превосходят по количеству чувствительных элементов системы ИК видения и имеют меньшие размеры.

Таблица 2 – Типичные форматы матриц приемников видимого и ИК спектров излучения

ПЗС (CCD), КМОП (CMOS) матрицы	640 × 480	1280 × 960	1024 × 1024	1280 × 1024
Антимонид индия (InSb), КРТ (кадмий-ртуть-теллур), АЗВ5 (квантовые ямы – КЯ), микроболлометры и ферроэлектрики	128 × 128	320 × 240	384 × 288	640 × 480

В используемой CCD камере формат – 640 × 480, что составляет 307200 чувствительных элементов в кадре, с размером чувствительного элемента $A_d \approx 10 \times 10 \text{ мкм}$. ИК-приемник имеет формат кадра 120 × 160, соответственно 19200 чувствительных элементов в кадре, с размерами $A_d \approx 30 \times 30 \text{ мкм}$. Минимально допустимые размеры чувствительных площадок определяются дифракцией, обусловленной волновой природой излучения. Минимальный диаметр дифракционного пятна, называемый кружком Эйри (Airy disk) определяется выражением [9]

$$A_{\text{диф}} = (2,44 \cdot \lambda \cdot f) / D = 2,44 \cdot \lambda \cdot (F/\#),$$

где λ - длина волны, мкм; $F/\# = f/D$ - диафрагменное число.

Для видимой части спектра максимум чувствительности глаза человека приходится на длину волны $\lambda = 0,5 \text{ мкм}$ и для диафрагменного числа $F/\# = 2$ диаметр кружка Эйри составляет $A_{\text{диф}} \approx 2,7 \text{ мкм}$, что соответствует поперечному сече-

нию колбочек в центральной ямке глазного дна человека. Для области спектра $\lambda \cong 10\text{мкм}$ длина волны, на которую приходится пик излучения предметов имеющих температуру близкую к температуре поверхности Земли) и $F/\# = 1$ диаметр кружка Эйри составляет $A_{\text{диф}} \approx 25\text{мкм}$, что и определяет размер чувствительных элементов в линейке. Это намного больше по сравнению с видимой областью спектра. Таким образом, учитывая, что минимально различимые объекты определяются размерами двух чувствительных площадок, приемники излучения видимого спектра (0,4 – 0,8 мкм) имеют в 9 раз большее разрешение наблюдаемых объектов, чем дальний ИК диапазон (8-14 мкм).

Для определения уровня восприятия информации получаемого изображения, существуют классические критерии Джонсона [10], позволяющие определить возможность обнаружения, распознавания и идентификации объектов наблюдения. В основе критериев Джонсона лежит разрешение штриховых мир, эквивалентных объекту. Согласно принятым критериям обнаружение объекта происходит, если его изображение проецируется на 1–3 телевизионные линии приемника (ТВЛ), а распознавание – на 6–9 ТВЛ [10]. Принимая во внимание возможность создания матриц больших форматов и небольших размеров чувствительных элементов для приемников видимого излучения, наличие второго канала регистрации видимого спектра излучения, существенно повышает вероятность обнаружения и распознавания наблюдаемых объектов для тепловизора.

Ниже представлены примеры термограмм и соответствующие им изображения в видимом спектре. На рис. 3. слева на термограмме различимы два предмета с температурой, отличающейся от окружающей среды, а именно от комнатной температуры. Проведя простой эксперимент, опросив 10 человек на предмет идентификации объектов на термограмме, было установлено, что предмет слева отождествляется с масляным нагревателем (что соответствует действительности) с вероятностью 100%, происхождение же предмета справа не удалось однозначно определить. Наличие канала регистрации видимого излучения, позволило классифицировать предмет, расположенный справа на термограмме, и отнести его к классу электрочайников.

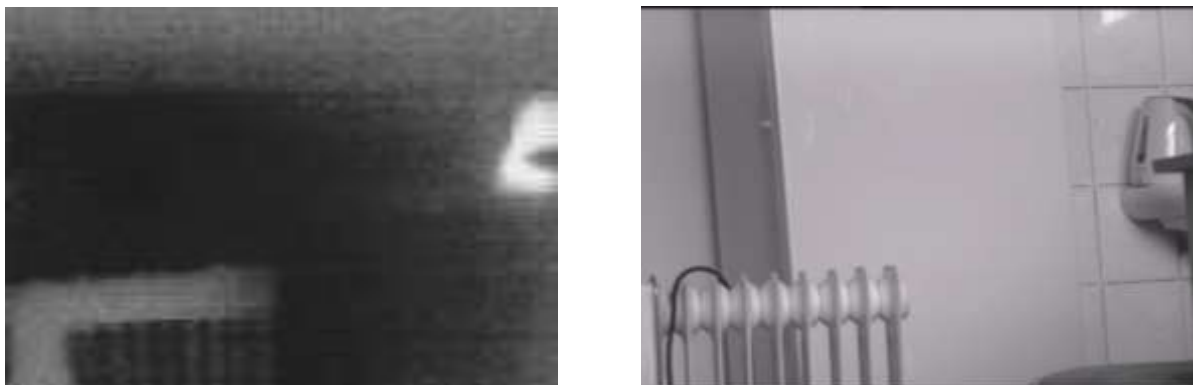


Рис. 3. Слева термограмма объектов для спектра 8-14 мкм, справа изображение для тех же наблюдаемых объектов, но в видимой части спектра

Примеры других термограмм и соответствующие им изображения в видимом спектре излучения представлены на рис.2.

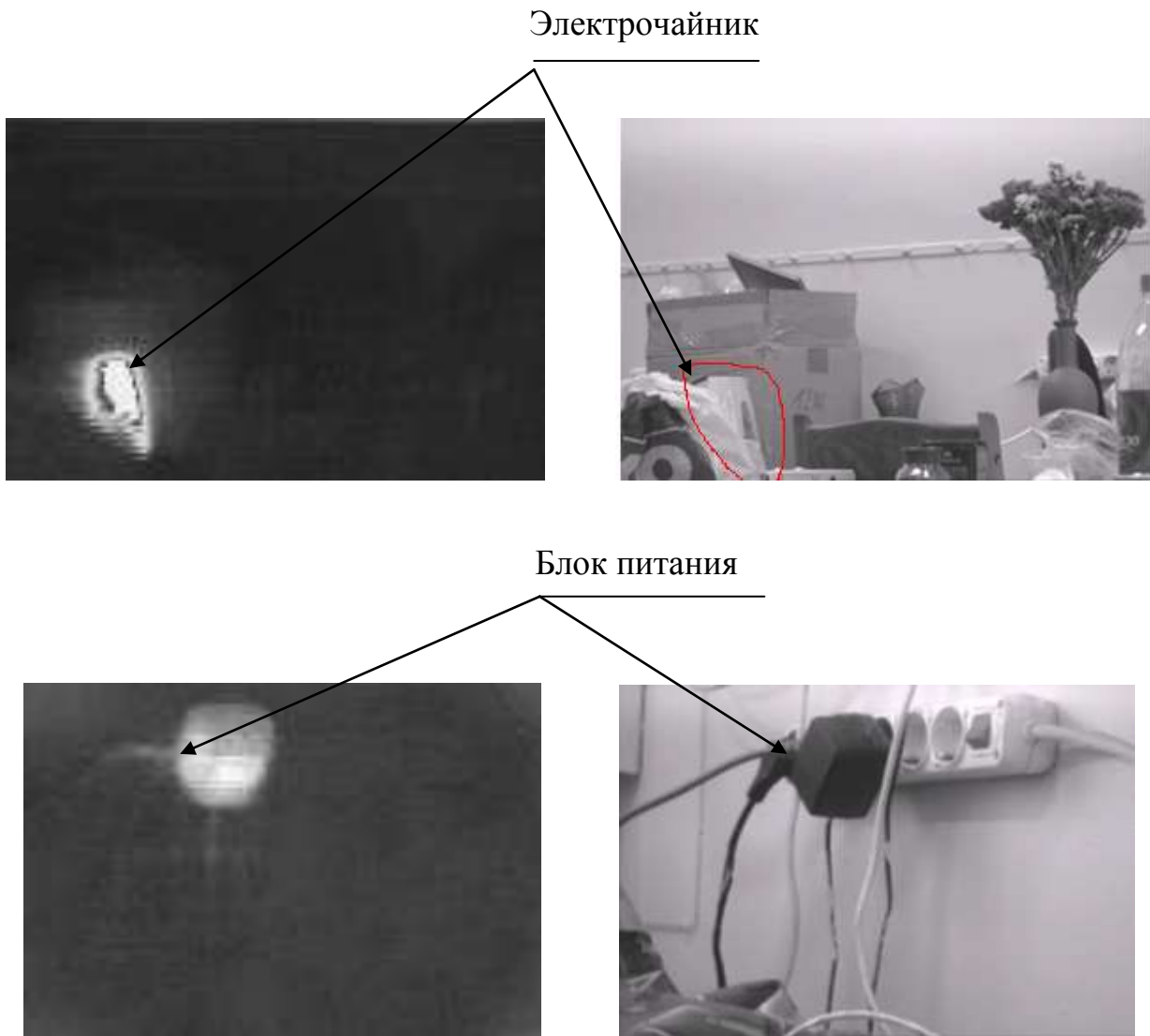


Рис. 4. Термограммы распределений температур предметов при комнатной температуре и соответствующие им изображения встроенной CCD камерой

Выводы

Из изложенного выше видно, что основным направлением увеличения информативности емкостей технических систем зрения является увеличение количества чувствительных элементов в матрицах приемников излучения. Такое увеличение числа чувствительных элементов может быть обусловлено как увеличением размеров матриц или линеек, так и при заданной площади, ограниченной техническими возможностями, уменьшением размеров чувствительных элементов. Это возможно лишь уменьшением размеров пикселей вплоть до дифракционного предела, который для спектрального диапазона $\lambda = (8-14)\mu\text{м}$ для оптики $F/\# = 1$ составляет $d \cong 25\mu\text{м}$. Для ПЗС и КМОП матриц видимого

диапазона спектра достигаемое сегодня число чувствительных пикселей в этом случае (10^8) [5] уже соответствует числу чувствительных рецепторов человеческого глаза ($\approx 1,3 \cdot 10^8$).

Литература

1. Glen Francisco. Integrating thermal imaging into surveillance systems // SPIE Newsroom. 2007. DOI: 10.1117/2.1200710.0903.
2. Robert McDaniel. New sensors enhance border security // SPIE Newsroom. 2006. DOI: 10.1117/2.1200609.0300.
3. Christian Minor, Daniel Steinhurst, Susan Rose-Pehrsson, Kevin Johnson, Jeffrey Owrutsky, Stephen Wales, and Daniel Gottuk. A data-fusion-based real-time detection system offers automated damage control on board US Navy vessels // SPIE Newsroom. 2007. DOI: 10.1117/2.1200702.0786.
4. Волков В.Г. Многоканальные приборы ночного видения наземного применения // Специальная техника. – 2001. – № 2.
5. Сизов Ф.Ф. Фотоэлектроника для систем видения в «невидимых участках спектра». – К.: Академперіодика, 2008. – 460 с.
6. Филачев А. М., Таубкин И. И., Трищенко М. А. Твердотельная фотоэлектроника. Физические основы. – М.: Физматкнига, 2005. – 381 с.
7. Taubkin I.I., Trishenkov M.A. Information capacity of electronic vision systems // Infrared Physics and Technology. – 1996. – 37. – P. 675 – 693.
8. Утенков А.Б., Белоусов Ю.И., Смирнов А.А. Влияние коэффициента заполнения матричного фотоприемника на качество тепловизионного изображения // Оптический журнал. – 2001. – 68. – С. 75 – 80.
9. Борн М, Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 855 с.
10. Дж. Ллойд. Системы тепловидения. – М.: Мир, 1978. – 407 с.

Сизов Ф.Ф., Шевчик-Шекера А.В. **Шляхи підвищення інформативності тепловізійних систем бачення**

На основі раніше розробленого тепловізора з 128-елементною інфрачервоною (ІЧ) фотодіодною лінійкою HgCdTe, розглянуто питання підвищення інформативності тепловізійних приладів за рахунок додавання додаткових спектральних діапазонів. Вбудований канал реєстрації видимого спектра випромінювання забезпечено роботою камери CCD STS-104/16.

Показано зв'язок кількості чутливих елементів технічних систем бачення та інформаційної місткості. Обговорено вплив розмірів чутливої площини приймача на ймовірність розпізнавання об'єктів спостереження.

Sizov F.F., Shevchik-Shekera A.V. **Ways of increasing the informativity of thermal imaging systems**

Based on a previously developed the 128-element HgCdTe photodetector array is considered increasing the informativity of thermal devices by adding additional spectral bands. Built-channel registration of the visible-light spectrum is provided by the camera CCD STS-104/16.

A connection number of sensitive elements and informative capacity are demonstrated. The influence of the size of sensitive areas of the receiver on the possibility of recognition of object under observation is discussed.

*Надійшла до редакції
14 березня 2008 року*

УДК 535

СПЕКТРАЛЬНІ ЗМІНИ БІЛОГО СВІТЛА, ЗУМОВЛЕНІ РОЗСІЯННЯМ НА ШОРСТКІЙ ПОВЕРХНІ

¹⁾Чернишов О.О., ¹⁾Фельде Х.В., ²⁾Богатирьова Г.В., ²⁾Полянський П.В.; ¹⁾Кафедра кореляційної оптики, Чернівецький національний університет, м. Чернівці, Україна;
²⁾Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут", м. Київ, Україна

Для пояснення забарвлення регулярної компоненти білого світла, розсіяного вперед безбарвною діелектричною шорсткою поверхнею, запропоновано модель шорсткої поверхні з помірними параметрами шорсткості як специфічного антивідбиваючого шару. Показано, що така модель дозволяє пояснити спостережувану на практиці послідовність кольорів розсіяної вперед компоненти білого світла по мірі збільшення шорсткості поверхні. Представлено експериментальні підтвердження на користь цього підходу

Вступ

Ця стаття присвячена явищу забарвлення розсіяної вперед (регулярної) компоненти білого світла, що пройшло крізь безбарвну діелектричну платівку із шорсткою поверхнею, поверхневі неоднорідності якої є співрозмірними з деякою довжиною хвилі зондуючого випромінювання. Вперше це явище було спостережено й пояснено на початку 70-х років ХХ століття [1, 2].

Спостерігаючи джерело білого світла крізь шорстку поверхню, отриману одностороннім шліфуванням скляної платівки електрокорундом із середнім розміром зерна від 7 мкм до 10 мкм, можна помітити несподівано інтенсивне забарвлення зображення джерела, яке змінюється від бірюзового до пурпурового. Даний ефект не може бути поясненим як результат селективного поглинання. Спостережувані перетворення нормованого спектру розсіяної вперед (регулярної) компоненти поліхроматичного пучка і, як наслідок, забарвлення зображення джерела мають, безумовно, інтерференційне походження. Наявність регулярної компоненти у розсіяному випромінюванні означає, що висоти поверхневих неоднорідностей, h , або, більш точно, середньоквадратичне відхилення рельєфу від базової лінії поверхні, σ_h , є співрозмірними із деякою довжиною хвилі поліхроматичного зондуючого пучка. Залежно від висот поверхневих неоднорідностей, спостерігається блакитне або червоне забарвлення, відповідно для менших та більших значень σ_h [3].

При поясненні цього ефекту виникають дві головні проблеми. Перша проблема полягає у поясненні забарвлення розсіяної вперед компоненти. Даючи якісне пояснення спектральному ефекту Вольфа (ефект кореляційно-індукованих спектральних зсувів [4, 5]), В. Татарський [6] порівнює кутовий розподіл поліхроматичного випромінювання від теплового джерела і від просторово частково когерентного джерела (див. Рис. 2). В першому випадку полярні діаграми для червоної та синьої компонент є однаковими, й початковий спектр джерела відтворюється у будь-якому напрямку спостереження. Однак,

коли поліхроматичне випромінювання (наприклад, від квазару) опромінює віддалену хмару космічного пилу, тоді, згідно теореми Ван-Циттерта – Церніке, така хмара діє як частково просторово когерентний вторинний випромінювач із різними полярними діаграмами для червоної та синьої компонент. Тому у різних напрямках спостерігається червоний або синій спектральні зсуви відносно початкового спектру, виключаючи напрямок вперед, де початковий спектр зберігається. Зрозуміло, що спектральні зміни найвиразніші, коли у певному напрямку спостереження зникає деяка спектральна компонента; тоді домінує доповнювальна компонента. Як можна бачити, головна особливість спектральних змін, зумовлених розсіянням на шорсткій поверхні, полягає у забарвленні саме розсіяної вперед компоненти пучка білого світла.

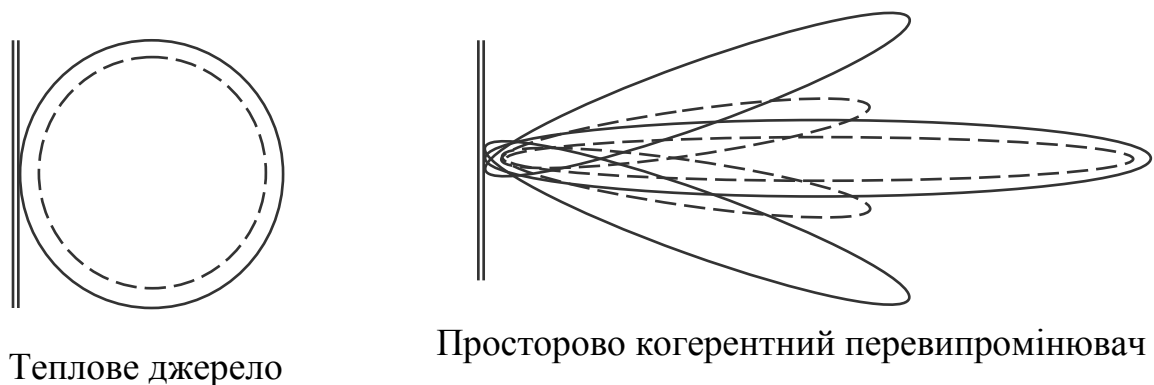


Рис. 2. Пояснення Татарського спектрального ефекту Вольфа. Суцільна і пунктирна лінії відповідають червоній та блакитній компонентам поліхроматичного випромінювання.

Друга проблема полягає у поясненні порядку чергування кольорів по мірі збільшення величини поверхневих неоднорідностей. Найближчим детермінованим аналогом спостережуваного ефекту є кільця Ньютона у проходячому поліхроматичному світлі. Можна було б очікувати такої ж послідовності кольорів, відповідно до зростання глибини рельєфу, як і для кілець Ньютона зі збільшенням радіусу, тобто, білий - коричнево-білий – коричневий – темно-фіолетовий – блакитний – сіро-блакитний – блакитно-зелений – жовто-зелений (для першого порядку) [7]. Проте на практиці послідовність кольорів відрізняється у цих двох випадках. А саме, при розсіянні на шорсткій поверхні послідовність кольорів виявляється близькою до випадку кілець Ньютона, спостережуваних на відбивання – від блакитного до червоного. Причиною є те, що у кільцях Ньютона реалізується чистий ефект інтерференції без будь-якого матеріального посередника. На відміну від цього, у досліджуваному нами випадку інтерференція – лише одна з компонент набагато складнішого явища, такого як світлорозсіяння на неоднорідностях шорсткої поверхні.

Ця стаття продовжує дослідження [8, 9], які стосуються явища спектральних змін регулярної складової поліхроматичного випромінювання, зумовлених розсіянням на шорсткій поверхні.

Підхід

Для пояснення спостережуваної послідовності кольорів по мірі збільшення шорсткості ми застосовуємо модель шорсткої поверхні як перехідного шару з «проміжним» показником заломлення, чим узагальнюємо добре відому аналогію між світлорозсіюючою частинкою та шаром [10, 11].

Реальна функція розподілу неоднорідностей по висотах, що характеризує дану шорстку поверхню, в загальному випадку невідома. Однак, задаючись конкретною формою такої функції розподілу, можна розглядати шорстку поверхню як нерегулярний перехідний шар з «перехідним» показником заломлення, значення якого дорівнює середньому геометричному показників заломлення скла і повітря, $n_2 = \sqrt{n_1 n_3}$, див. Рис. 3. Якщо оптична товщина перехідного шару, $n_2 H$, дорівнює $\lambda/4$ для деякої спектральної компоненти поліхроматичного зондуючого пучка, цей шар діє подібно до антивідбиваючого (просвітлюючого) покриття для даної компоненти. Хвилі, відбиті від двох «границь» перехідного шару, є протифазними, будучи практично рівноінтенсивними, й інтерферують деструктивно. Це неодмінно має місце для тієї чи іншої довжини хвилі через те, що $\lambda < H$ для усіх спектральних компонент зондуючого пучка. В результаті, ця спектральна компонента та її спектральний окіл домінуватимуть у розсіяному вперед світлі. Цей підхід легко формалізується із використанням відомих формул для антивідбиваючих покриттів.

Така інтерпретація забарвлення регулярної компоненти поліхроматичного пучка, розсіяного вперед на шорсткій поверхні, узгоджується з розглядом детермінованого аналогу, представленим у роботах [12, 13]. Автори цих робіт досліджують випадок проходження пучка білого світла крізь рельєфно-фазову ґратку із прямокутним профілем з глибиною H та з однаковими ширинами верхньої та нижньої частин періоду. Спостерігаючи нульовий дифракційний порядок, вони приходять до висновку, що кожного разу, коли оптична різниця ходу між вершинами і впадинами рельєфу дорівнює $m\lambda$ ($m = 1, 2, 3, \dots$) для довжини хвилі, зв'язаної з певною спектральною компонентою, ця компонента переважає у розсіяному вперед випромінюванні. Дійсно, у цьому випадку відповідна різниця фаз, $2\pi(n-1)H/\lambda$, де n - показник заломлення скла, дорівнює $m2\pi$, і парціальні дифраговані вперед хвилі інтерферують з підсиленням. Переходячи від глибини рельєфу, H , до середнього квадратичного відхилення рельєфу від базової лінії, яка знаходиться на рівні $H/2$, можна визначити дисперсію висот $\sigma_h^2 = \lambda^2/16$, і $\sigma_h = \lambda/4$; така ґратка діє для дифрагованої вперед компоненти пучка даної довжини хвилі подібно до чвертьхвильового шару. Зазначимо, що наведений розгляд передбачає таку ж послідовність кольорів для нульового дифракційного порядку при зростанні глибини рельєфу (від блакитного до черво-

ного), яка спостерігається для шорсткої поверхні із помірними параметрами шорсткості. Беручи до уваги те, що шорстка поверхня може розглядатись як набір розупорядкованих фазових ґраток, можна бачити, що цей результат цілком узгоджується із запропонованою моделлю шорсткої поверхні. Відмінність між двома підходами полягає у тому, що для регулярних ґраток спостерігаються вищі порядки послідовності кольорів, тоді як збільшення середнього квадратичного відхилення рельєфу випадкової шорсткої поверхні від базової лінії до $\sigma_h \gg \lambda$ призводить до руйнування розсіяної вперед компоненти для усіх спектральних компонент зондуючого пучка білого світла.

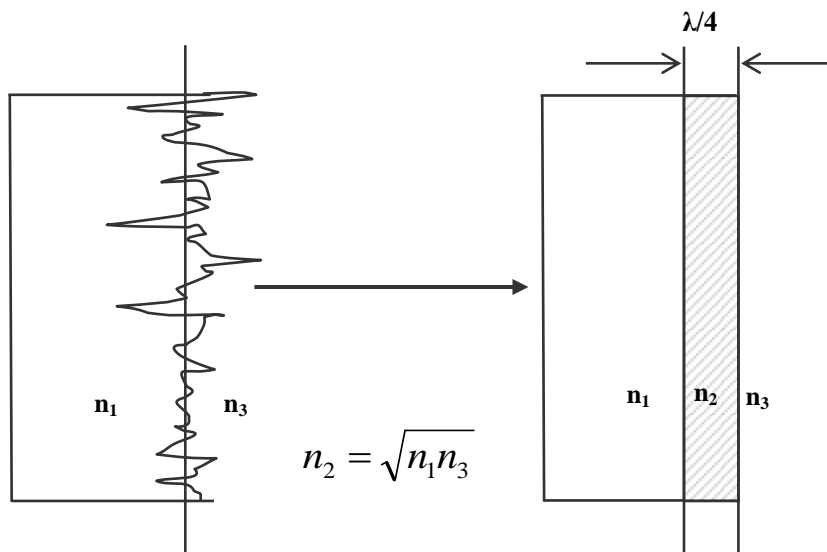


Рис. 3. Аналогія між шорсткою поверхнею та перехідним шаром з «проміжним» показником заломлення.

Згідно цієї моделі, для визначення кольору розсіяної вперед компоненти білого світла, найперше потрібно визначити відношення інтенсивностей розсіяного назад світла у функції довжини хвилі [14]:

$$\frac{I_r}{I_i} = 4 \left[\frac{1 - \sqrt{n_1}}{1 + \sqrt{n_1}} \right]^2 \sin^2 \left[\frac{\pi}{2} \left(\frac{\lambda_i}{\lambda_0} - 1 \right) \right], \quad (1)$$

де I_r та I_i – інтенсивності падаючого і відбитого пучків, відповідно, λ_i – поточна довжина хвилі зондуючого пучка, λ_0 – довжина хвилі, амплітуда якої зануляється у відбитому випромінюванні, й потім знайти відносну інтенсивність розсіяної вперед компоненти для λ_i як різницю:

$$\frac{I_f}{I_i} = 1 - \frac{I_r}{I_i}. \quad (2)$$

В рівнянні (2) ми нехтуємо розсіянням світла в усіх інших напрямках. Зауважимо, що таке наближення є прийнятним лише для відносно малих висот

неоднорідностей (див. зокрема оцінки ефективної товщини перехідного шару, наведені нижче).

Для ілюстрації послідовності кольорів, яка впливає з моделі перехідного рівня, ми залучили метод хромаскопічної обробки забарвлених оптичних полів, впроваджений М. Беррі [15] для спостереження хроматичних ефектів поблизу ізольованих вихорів білого світла. Особливість досліджуваного нами випадку полягає у тому, що дана модель застосовується нами для регулярної компоненти розсіяного поля, яка є аналогом нульової інтерференційної смуги. Для визначення кольорів, RGB-величини тестованого поля масштабуються до постійної інтенсивності перетворенням:

$$\begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix}_{CR} \Rightarrow \begin{pmatrix} R \\ G \\ B \end{pmatrix} / \max\{R, G, B\}. \quad (3)$$

Ця процедура зберігає співвідношення між трьома RGB-величинами шляхом нормування їх значень до одиниці. Ми застосовували хромаскопічну обробку для розсіяної вперед компоненти зондуючого пучка білого світла. Найголовніша відмінність нашого підходу від підходу, реалізованого в [15] полягає в тому, що хромаскопічна обробка застосовується для однорідного за кольором зображення, а не для неоднорідного “ізолюваного” нуля спектральної комплексної амплітуди, що лінійно змінюється зі зміною позиції точки спостереження та з номером хвилі видимого діапазону [15]. Ми застосовували хромаскопічну обробку виходячи з рівняння (3) для дзеркально відбитої та вперед-розсіяної компонент пробного пучка білого світла.

Рис. 4 ілюструє нормовані спектральні розподіли вперед-розсіяної компоненти (фрагменти *a*, *b*, *c*) та розсіяної назад (дзеркально відбитої) компоненти (фрагменти *d*, *e*, *f*) для випадків занулення блакитної $\lambda_b = 435,8 \text{ нм}$ (Рис. 4, фрагменти *a* і *d*), або зеленої $\lambda_g = 546,1 \text{ нм}$ (Рис. 4, фрагменти *b* і *e*), або червоної $\lambda_r = 700 \text{ нм}$ (Рис. 4, фрагменти *c* і *f*) компоненти [8]. Пари фрагментів *a* і *d*, *b* і *e*, та *c* і *f* відповідають ефективним глибинам перехідного рівня 88,36 нм, 110,73 нм і 141,93 нм, відповідно, що є близьким до 0.1 середнього діаметру корунду, використовуваного для отримання ефектів забарвлення (~10 мкм). Як видно з Рис. 4, насичений зелений колір не спостерігається у розсіяній вперед компоненті поліхроматичного випромінювання навіть у випадку, коли умови антивідбиваючого шару задовольняються саме для зеленого і зелений домінує у напрямку вперед. Кольори змінюються від синього до червоного, оминаючи зелений, у відповідності з теорією хромаскопу [15]. Для отримання насиченого зеленого кольору необхідно забезпечити нульове відбивання одночасно для синього і червоного й виділити вузький спектральний інтервал в околі зеленого (приблизно 555 нм). Але такій умові практично неможливо задовольнити. Спектральний інтервал, що пропускається перехідним шаром у випадку, коли зелений зникає у відбитій і переважає у розсіяній вперед компоненті, виявляється

надто широким, так що спостерігається практично те саме, що і за відсутності неоднорідностей, див. Рис. 4 **b**. Ситуація, подібна до цієї, реалізується у випадку, коли звичайне антивідбиваюче покриття для зеленого використовується у лінзах для забезпечення правильної передачі кольорів.

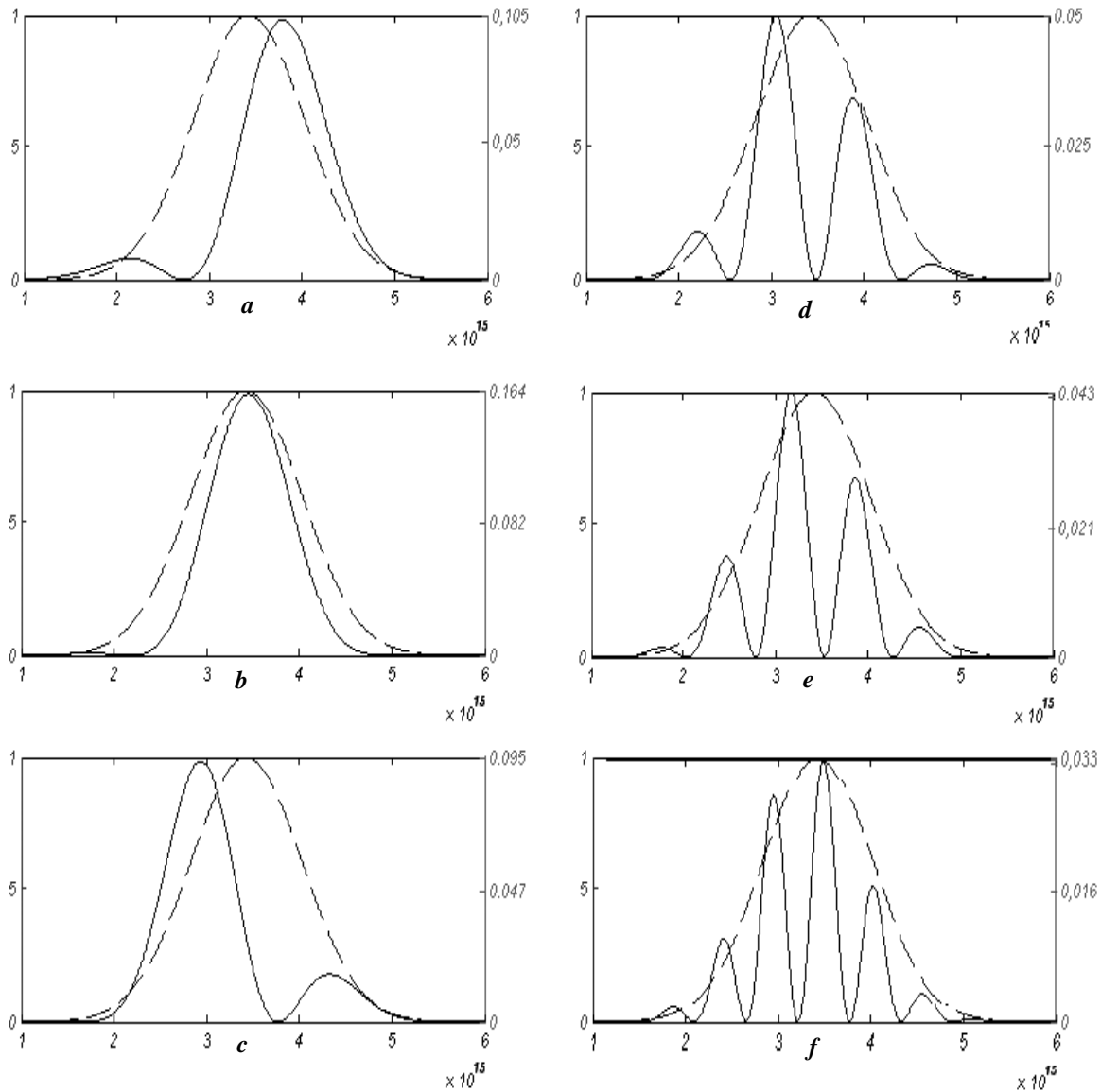


Рис. 4. Нормовані спектральні розподіли інтенсивності вперед-розсіяної компоненти (**a**, **b**, **c**) та дзеркально відбитої компоненти (**d**, **e**, **f**) для випадків занулення компонент $\lambda_b = 435,8 \text{ нм}$ (**a**, **d**), $\lambda_g = 546,1 \text{ нм}$ (**b**, **e**) та $\lambda_r = 700 \text{ нм}$ (**c**, **f**), відповідно.

Експеримент

Як відомо, звичайне мікроскопічне спостереження шорсткої поверхні не дає вичерпної інформації щодо топографії поверхні. Попри те, мікроскопічне дослідження шорстких поверхонь з різним ступенем механічної обробки надає можливість аргументувати зазначену послідовність кольорів вперед розсіяної компоненти пучка білого світла. Ідею експерименту ілюструє Рис. 5. Обираєть-

ся зразок скла з сильно хвилястою поверхнею (якість віконного скла). Використовуючи такий зразок скла зі значними відхиленнями макроповерхні від базової лінії, можна спостерігати у динаміці зміни кольору, індуковані розсіянням на шорсткій поверхні. А саме, джерело білого світла спостерігається крізь різні частини шорсткої поверхні й фіксуються ділянки, що забезпечують блакитне або червоне забарвлення. При цьому отримуються мікроскопічні зображення відповідних ділянок шорсткої поверхні для визначення їх топографії.

На початковому етапі механічної обробки поверхні шорсткості найперше виникають на «пагорбах», де утворюється найбільша кількість розсіюючих центрів. На «схилах» отримується усе менше і менше таких центрів. І зрештою, «впадини» є практично не обробленими, і розсіюючі центри тут майже відсутні. На Рис. 5 показано мікрофотографії (з помірним збільшенням $\times 40$) відповідних ділянок на зразку шліфованого скла, виготовленого шліфуванням електрокорундом з середнім діаметром зерна 10 мкм. Середній поперечний розмір ізольованої неоднорідності складає приблизно 15-20 мкм.

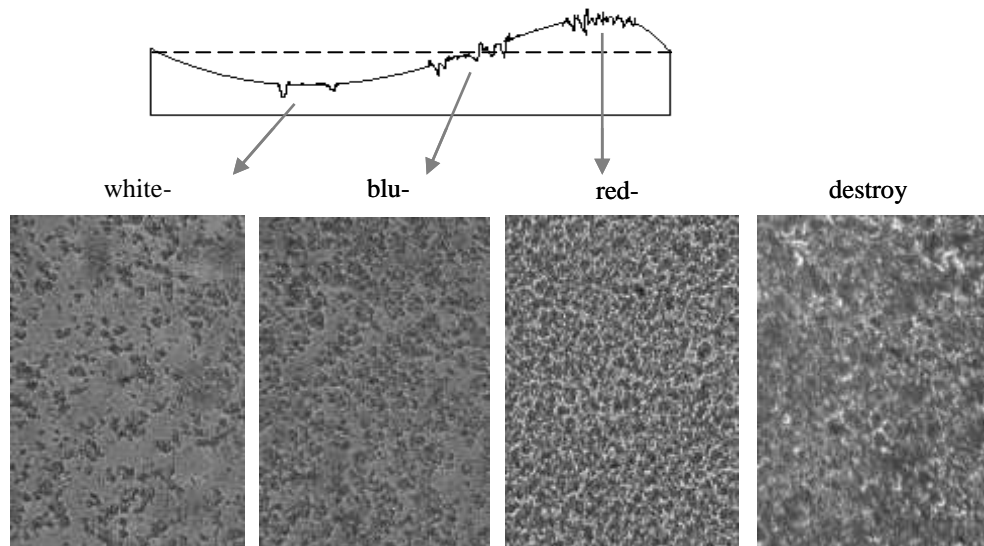


Рис. 5. Топографія перехідної шорсткої поверхні, яка зумовлює забарвлення розсіяної вперед компоненти пучка білого світла; правий фрагмент показує глибоко шорстку поверхню, на якій розсіяна вперед компонента повністю руйнується

Крізь ділянку шліфованого скла, що відповідає лівому рисунку, спостерігається незабарвлене джерело білого світла. Крізь другу ділянку з помірною кількістю неоднорідностей спостерігається джерело блакитного кольору. Крізь третю ділянку, де необроблені площі дуже малі, спостерігається джерело світла червоного кольору. Остання ділянка відповідає глибоким неоднорідностям, які руйнують розсіяну вперед компоненту. Природа індукованого розсіянням забарвлення регулярної компоненти є найбільш очевидною з другого фрагменту Рис. 5. Зрозуміло, що забарвлення є результатом інтерференції світла, що пройшло крізь необроблені ділянки скла, з світлом, розсіяним вперед на окре-

мих неоднорідностях. Кількість неоднорідностей має бути достатньо великою, щоб оброблені й необроблені ділянки були приблизно однаковими.

Внаслідок даного спостереження (проходження світла крізь фрагменти шорсткої поверхні від першого фрагменту Рис. 5 до третього) стає зрозумілою винятковість, з якою спостерігається блакитний зсув для розсіяної вперед компоненти пучка білого світла у порівнянні із червоним зсувом (процитуємо з цього приводу загальновідомий вислів: “Одного разу під блакитним Місяцем” [16]). Синій зсув спостерігається лише у дуже вузькому інтервалі величин дисперсії фаз граничного поля, тобто, в інтервалі між екстремально малими висотами поверхневих неоднорідностей, за яких забарвлення ще відсутнє, та дещо більшими висотами неоднорідностей, що є необхідними для забезпечення блакитного зсуву. Потім синій зсув замінюється червоним, який і спостерігається аж до повного руйнування регулярної компоненти. За нашою оцінкою, середнє квадратичне відхилення профілю шорсткої поверхні від базової лінії для спостереження блакитного зсуву становить від 0,05 λ до 0,1 λ . Відповідна дисперсія фази у граничному полі об’єкта становить приблизно 0,6. Як відомо, блакитний Місяць спостерігався за подібних умов: блакитний зсув передбачає розсіяння на хмарі дуже малих монодисперсійних частинок [16].

Послідовне чергування кольорів, а саме, виникнення синього знову після червоного, мало б місце лише для певних специфічних функцій розподілу висот поверхневих неоднорідностей, наприклад, для рівномірної функції розподілу висот. Для такого розподілу спектральний модифікатор [4] описується як квадрат *sinc* – функції з послідовними максимумами [1]. Реалізація такого розподілу на практиці є проблематичною. У той самий час, послідовні спектральні зміни зображення джерела білого світла можуть спостерігатись в нульовому порядку дифракції чисто фазової (відбіленої) голографічної ґратки, для якої спектральним модифікатором є квадрат функції Бесселя першого роду нульового порядку [17].

Висновки

Представлені у даній роботі результати підтверджують адекватність запропонованої моделі спектральних перетворень, зумовлених розсіянням світла на шорсткій поверхні, а саме, модель перехідного шару, що відповідає чвертьхвильовому антивідбиваючому покриттю і забезпечує переважне пропускання випромінювання у напрямку вперед для деякого спектрального інтервалу. Особливість дослідженого явища полягає у незвичному порядку кольорів, що супроводжує зростання глибини поверхневого рельєфу. Цей порядок є протилежним порядку чергування кольорів у кільцях Ньютонa в поліхроматичному («білому») світлі, що спостерігаються на пропускання. На відміну від попередніх моделей, що пояснюють спектральні зміни, зумовлені розсіянням, нами запропоновано визначення спектральної складової, для якої переважає розсіяна вперед компонента, а не складової, для якої ця компонента зникає. Ми також продемонстрували топографію неоднорідностей, яка відповідає блакитному і червоному забарвленню для розсіяної вперед компоненти пучка білого світла.

Представлені результати підтверджують аналогію між світлорозсіюючою частинкою, шаром та шорсткою поверхнею із «перехідним» показником заломлення та можуть бути використані у подальшому для розробки приладів експрес-контролю шорсткості поверхні.

Література

1. В.К. Полянский, Спектральные характеристики бесцветного стекла с шероховатой поверхностью // Журн. Прикл. Спектр. – 1970. – Т. 13. – С. 1039-1042.
2. В.К. Полянский, И.Б. Котлярова, Кооперативные эффекты на шероховатой поверхности в проходящем излучении // Опт. Спектр. – 1971. – Т. 30, № 6. – С. 1142-1145.
3. A.A. Chernyshov, Ch.V. Felde, H.V. Bogatyryova, P.V. Polyanskii. Scattering-induced spectral changes // Proc. SPIE. – 2008. – V. 7008 OE. – P. 1-6.
4. E. Wolf. Non-cosmological redshifts of spectral lines // Nature. – 1987. – V. 326. – P. 363-365.
5. E. Wolf and D.F.V. James. Correlation-induced spectral changes // Rep. Prog. Phys. – 1996. – V. 59. – P. 771-818.
6. V.I. Tatarskii. An intuitive introduction to the Wolf effect. // Pure and Applied Optics. – 1998. – V. 7. – P. 953-957.
7. Г.С. Ландсберг. Опика. -М.: Наука, 1976. – 928 с.
8. O.V. Angelsky, P.V. Polyanskii, S.G. Hanson. Singular-optical coloring of regularly scattered white light // Optics Express. – 2006. – V. 14, No. 17. – P. 7579-7586.
9. P.V. Polyanskii. *Optical Correlation Applications and Techniques*, Chapter 2 (O. Angelsky, Ed.) // SPIE Press, Bellingham. – A168 - 2007.
10. Г.Ван де Хюлст. Рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. -М.: ИИЛ, 1961. – 536 с.
11. К. Борен, Д. Хафмен. Поглощение и рассеяние света малыми частицами: Пер. с англ. -М.: Мир, 1986. – 664 с.
12. К. Кноп. Color pictures using the zew diffraction order of phase grating structures // Opt. Commun. – 1976. – V. 18. – P. 3-10.
13. H.J. Caulfield. Handbook of Optical Holography (Section 10.2) // Academic Press, New York. - 1979.
14. F.S. Grawford, Jr. Waves. Berkley Physics Course Vol. 3. McGraw-Hill, New York. – 1968.
15. V. Berry. Exploring the colours of dark light // New J. Phys. – 2002. – V. 4, № 74.1.
16. S.R. Wilk. Once in a blue Moon // Opt. Phot. News. – 2006. – V. 17, №3. – P. 20-21.
17. Дж. Гудмен. Статистическая оптика: Пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 528 с.

Чернышов А.А., Фельде К.В., Богатырева Г.В., Полянский П.В. **Спектральные изменения белого света, обусловленные рассеянием на шероховатой поверхности**
Для объяснения окрашивания регулярной составляющей белого света, рассеянного вперед бесцветной диэлектрической шероховатой поверхностью, предложена модель шероховатой поверхности с умеренными параметрами шероховатости как специфического просветляющего слоя. Показано, что такая модель позволяет объяснить наблюдаемую на практике последовательность цветов рассеянной вперед компоненты белого света по мере увеличения шероховатости поверхности. Представлено экспериментальное подтверждение в пользу такого подхода.

Chernyshov A.A., Felde H.F., Bogatyryova, H.V. Polyanskii P.V. **Spectral changes white light scattered by rough surface**
To explain coloring of the regular component of a white light scattered by a colorless dielectric slab with a rough surface, we apply the model of rough surface with rough's moderate parameters associated with absorption surface. It is shown that such model permits to explain component's sequence of colors of a scattered white light according to roughness surface grow. Experimental confirmation of this model is presented.

*Надійшла до редакції
25 лютого 2009 року*