

ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Под редакцией доктора технических наук, профессора В. В. Коротаяева

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	5
ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ	
Зверева Е. Н., Лебедько Е. Г., Фи Хуан Тунг. Потери информации при преобразовании поля в оптическом тракте оптико-электронного прибора.....	7
Смехов А. А., Коняхин И. А. Исследование облученности виньетированного изображения в автоколлимационной системе с помощью компьютерного моделирования.....	11
Алёхин А. А., Горбунова Е. В., Коротаяев В. В., Ольховский А. М., Петухова Д. Б., Чертов А. Н. Оптико-электронная систем экспресс-анализа руд твердых полезных ископаемых оптическим методом.....	15
Коняхин А. И., Молев Ф. В., Тимофеев А. Н. Синтез отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем.....	21
Васильев А. С., Краснящих А. В., Лашманов О. Ю. Алгоритмы фильтрации задымленного изображения.....	26
Горбачёв А. А., Коротаяев В. В., Пантюшина Е. Н. Оптико-электронная система контроля положения поршня в клапане.....	29
Андреев А. Л., Вараткова А. П. Эффективность алгоритмов формирования и обработки межкадрового разностного сигнала при обнаружении объектов в сложных условиях наблюдения.....	33
ПРИКЛАДНАЯ И КОМПЬЮТЕРНАЯ ОПТИКА	
Зверев В. А., Карпова Г. В., Тимошук И. Н. Телеобъектив с афокальной двухзеркальной насадкой.....	39
Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Тимошук И. Н. Волновая абберация изображения точки при центральном экранировании входного зрачка.....	47
Ермолаева Е. В., Зверев В. А., Подгорных Ю. А. Варианты зеркальных оптических систем с главным зеркалом сферической формы.....	50

Ковалева А. С. Метод расчета концентрических зеркальных, зеркально-линзовых и линзовых систем	55
Малютин В. Е., Толстоба Н. Д., Емельянов Э. В., Якопов Г. В. Автоматизация обработки данных при контроле оптических систем методом Гартмана	62
КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ	
Латыев С. М., Буй Динь Бао. Методы центрировки линз в оптических системах	66
Леонов М. Б., Разумовский И. Т. Концептуальная модель трехкоординатного оптико-электронного целеуказателя	73
Иванов А. Н., Киреев В. Е., Носова М. Д. Дифракционные методы контроля пространственного положения объектов	78
СВЕТОДИОДНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ	
Ивукин И. Н., Белов А. Ю., Бугров В. Е., Ковш А. Р., Одноблюдов М. А., Романов А. Е. Оптимизация радиатора ретрофитной светодиодной лампы	83
Виноградова К. А., Бугров В. Е., Ковш А. Р., Одноблюдов М. А., Николаев В. И., Романов А. Е. Деградация белых и синих светодиодов при длительном времени работы	87
ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И МОНИТОРИНГ	
Беднова М. В., Конопелько Л. А. Аттестация стандартных образцов поверочных газовых смесей с помощью лазерного интерференционного рефрактометра	92
Беднова М. В., Конопелько Л. А. Применение новых стандартных образцов наркотических газов при проверке медицинской аппаратуры	95
SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича)	97

THEMATIC ISSUE

OPTICAL INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGIES

By Edition of V. V. Korotaev, Doctor of Technical Science, Professor

CONTENTS

PREFACE.....	6
OPTICAL-ELECTRONIC DEVICES AND SYSTEMS	
Zvereva E. N., Lebedko E. G., Phi Huang Tung. Information Losses under Field Transformation in Optical Path of an Optoelectronic Instrument.....	7
Smekhov A. A., Konyakhin I. A. Investigation of Irradiance of Vignetted Image in Autocollimation System with the Use of Computer Modeling.....	11
Alekhin A. A., Gorbunova E. V., Korotaev V. V., Olkhovskiy A. M., Petukhova D. B., Chertov A. N. Optical-Electronic System for Rapid Analysis of Mineral Raw Materials by Color Sorting Method.....	15
Konyakhin A. I., Molev F. V., Timofeev A. N. Synthesis of Reflectors for Three-Dimensional Angular Autocollimators with Superposed Matrix Detectors.....	21
Vasilyev A. S., Krasnyashchikh A. V., Lashmanov O. Yu. Algorithms of Smoke-Blackened Image Filtering.....	26
Gorbachev A. A., Korotaev V. V., Pantiushina E. N. Optical-Electronic System for Control over Position of Piston in the Valve.....	29
Andreev A. L., Varatkova A. P. Effectiveness of Algorithms of Generation and Processing of Interframe Difference Signal in Object Detection under Complex Observation Conditions.....	33
APPLIED AND COMPUTER OPTICS	
Zverev V. A., Karpova G. V., Tymoshchuk I. N. Telescopic Lens with Afocal Double-Mirror Optical Attachment.....	39
Ermolaeva E. V., Zverev V. A., Tymoshchuk I. N. Wave Aberration of the Point Source Image at the Central Shielding of Entrance Pupil.....	47
Ermolaeva E. V., Zverev V. A., Podgornykh Ju. A. Alternative Schematics of Reflection Optical System with Spherical Main Mirror.....	50
Kovaleva A. S. Calculation Method for Design of Concentric Mirror, Mirror-Lens, and Lens Systems.....	55
Maliutin V. E., Tolstoba N. D., Emelyanov E. V., Yakopov G. V. Automation of Data Processing in Optical System Testing with Hartmann Techniques.....	62

COMPUTERIZATION AND DESIGN OF OPTICAL DEVICES

Latyev S. M., Buy Din Bao. Methods of Lens Centering in Optical Systems	66
Leonov M. B., Razumovskiy I. T. Conceptual Model of Three-Coordinate Optoelectronic Designator	73
Ivanov A. N., Kireyankov V. E., Nosova M. D. Diffraction Methods for Control of Object Position.....	78

LED TECHNOLOGY

Ivukin I. N., Belov A. Yu., Bougrov V. E., Kovsh A. R., Odnoblyudov M. A., Romanov A. E. Optimization of Retrofit LED Lamp Radiator	83
Vinogradova K. A., Bougrov V. E., Kovsh A. R., Odnoblyudov M. A., Nikolaev V. I., Romanov A. E. Degradation of White and Blue LEDs at Prolonged Operation Time....	87

ENVIRONMENTAL INSTRUMENT-MAKING AND MONITORING

Bednova M. V., Konopelko L. A. Certification of Reference Samples of Calibration Gas Mixtures with Laser Interferometric Refractometer	92
Bednova M. V., Konopelko L. A. Application of New Reference Samples of Anesthetic Gases for Verification of Medicine Apparatus	95

SUMMARY	97
---------------	----

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящем тематическом выпуске журнала представлены результаты научных исследований, проводимых сотрудниками факультета оптико-информационных систем и технологий (ФОИСТ) Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (НИУ ИТМО).

Факультет является одним из старейших в университете.

На факультете обучаются бакалавры и магистры по направлению „Оптотехника“, а также специалисты по направлению подготовки (специальности) „Электронные и оптико-электронные приборы и системы специального назначения“.

Преподавателями и научными сотрудниками факультета совместно с аспирантами и студентами ведутся активные научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по приоритетным направлениям развития оплотехники, а также по инновационной деятельности в области образования.

В разделе „Оптико-электронные приборы и системы“ собраны статьи, посвященные системотехнике оптико-электронных приборов и систем различного назначения.

Статьи, представленные в разделе „Прикладная и компьютерная оптика“, отражают результаты работ по созданию новых оптических систем, а также результаты исследований, направленных на повышение их качества.

В разделе „Компьютеризация и проектирование оптических приборов“ представлены статьи, посвященные частным вопросам проектирования оптических приборов.

Статьи раздела „Светодиодные технологии“ содержат результаты исследований по созданию современных источников излучения на основе светодиодов и светодиодных сборок.

Наконец, в разделе „Экологическое приборостроение и мониторинг“ представлены материалы, касающиеся вопросов метрологии и аттестации стандартных газовых смесей экологического и медицинского назначения.

*Декан факультета
оптико-информационных систем и технологий НИУ ИТМО
доктор технических наук, профессор
В. В. КОРОТАЕВ*

PREFACE

This special issue of the Journal deals with research and development results of Optical Information Systems and Technologies Faculty of St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (NRU ITMO).

The Faculty is one of the oldest at the University.

Bachelors and masters are taught on the faculty on direction of “Optotehnika”, as well as engineers are taught on the speciality of “Electronic and Optical-Electronic Devices and Systems for Special Purposes”.

Teachers and researchers of the Faculty with their graduate and undergraduate students are active in research and development on priority areas of optical engineering, as well as in innovation activities in the education field.

The “Optical-Electronic Devices and Systems” section contains articles on the methodology and engineering of optical-electronic devices and systems for various applications.

Articles presented in the section “Applied and Computer Optics” reflect results of new optical systems creation, as well as research aimed at improving their quality.

The section “Computerization and Design of Optical Devices” presents articles on particular aspects of optical devices designing.

Articles in “LED Technology” section contain results of research on creation of modern radiation sources based on LEDs and LED assemblies.

Finally, in the section “Environmental Instrument-Making and Monitoring” materials relating to metrology and certification of standard gas mixtures for environmental and medical applications are presented.

*Dean of Optical Information Systems and Technologies Faculty
of University ITMO
Doctor of Technical Science, Professor
V. V. KOROTAEV*

Е. Н. ЗВЕРЕВА, Е. Г. ЛЕБЕДЬКО, ФИ ХУАН ТУНГ

ПОТЕРИ ИНФОРМАЦИИ ПРИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ПОЛЯ В ОПТИЧЕСКОМ ТРАКТЕ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ПРИБОРА

Исследуются потери приведенной энтропии пространственного распределения потока излучения в оптическом тракте оптико-электронного прибора с матричными фотоприемниками.

Ключевые слова: потери информации, преобразование оптического информационного поля.

Преобразование информационного поля оптической системой приводит к потере информации. Действительно, если рассматривать яркостное поле в пространстве предметов как непрерывное случайное состояние, то приведенная энтропия является относительной к координатной системе. При изменении координат приведенная энтропия в общем случае также изменяется. При переходе от координат x_1, x_2, \dots, x_n к координатам y_1, y_2, \dots, y_n новое значение приведенной энтропии будет определяться выражением [см. лит.]

$$\begin{aligned} H^*(Y) = & - \int_{-\infty}^{\infty} \dots (n) \dots \int_{-\infty}^{\infty} W(x_1, x_2, \dots, x_n) \left| J \left(\frac{x}{y} \right) \right| \times \\ & \times \log W(x_1, x_2, \dots, x_n) \left| J \left(\frac{x}{y} \right) \right| dy_1 dy_2 \dots dy_n = H^*(X) - \\ & - \int_{-\infty}^{\infty} \dots (n) \dots \int_{-\infty}^{\infty} W(x_1, x_2, \dots, x_n) \log \left| J \left(\frac{x}{y} \right) \right| dx_1 dx_2, \end{aligned} \quad (1)$$

где $\left| J \left(\frac{x}{y} \right) \right|$ — якобиан преобразования координат по абсолютной величине, так как плот-

ность вероятностей $W(x_1, x_2, \dots, x_n)$ — величина положительная; $H^*(X)$ — исходная приведенная энтропия состояний до изменения координат.

Если пространственные частоты ν_1, ν_2 , составляющие поле яркости в пространстве предметов, рассматривать как первичные координаты, то пространственные частотные составляющие потока излучения на выходе анализатора изображения, при условии, что преобразование в оптическом тракте линейное, будут представлять собой первичные, умноженные на некоторые коэффициенты.

В этом случае матрица преобразования координат относительно новых координат является диагональной и якобиан преобразования равен

$$J = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^m |K_{o.т}(jv_i, jv_j)|^2, \quad (2)$$

где $K_{o.т}(jv_1, jv_2) = K_o(jv_1, jv_2)K_a(jv_1, jv_2)$ — передаточная функция оптического тракта оптико-электронного прибора (ОЭП); $K_o(jv_1, jv_2)$ и $K_a(jv_1, jv_2)$ — соответственно передаточные функции приемного объектива и анализатора изображения, так как матричный фотоприемник представляет собой фотодетектор, совмещенный с анализатором изображения.

Подставив якобиан (2) в выражение (1) и осуществив предельный переход, получим выражение для энтропии пространственного распределения потока излучения на выходе анализатора изображения:

$$H_{\Phi}^*(X_0 \text{ и } Y_0) = H_L^*(X_0 \text{ и } Y_0) + H_{\Pi}^* = H_L^*(X_0 \text{ и } Y_0) + \frac{1}{\Delta_1 \Delta_2} \int_{\Delta_1} \int_{\Delta_2} \log |K_o(jv_1, jv_2)K_a(jv_1, jv_2)|^2 dv_1 dv_2,$$

где $H_L^*(X_0 \text{ и } Y_0)$ — приведенная энтропия яркостного поля в пространстве предметов; Δ_1 и Δ_2 — полосы пропускания пространственных частот оптического тракта ОЭП соответственно по координатам x и y ; H_{Π}^* — потери приведенной энтропии в оптическом тракте ОЭП:

$$H_{\Pi}^* = \frac{1}{\Delta_1 \Delta_2} \int_{\Delta_1} \int_{\Delta_2} \log |K_o(jv_1, jv_2)K_a(jv_1, jv_2)|^2 dv_1 dv_2.$$

Будем рассматривать обладающие апланатизмом приемные объективы со сферическими aberrациями. Для удобства расчетов весовую функцию таких объективов будем аппроксимировать гауссоидой вращения

$$g_o(x, y) = g_0 \exp\left(-\pi \frac{x^2 + y^2}{\rho_0^2}\right),$$

где $g_0 = \frac{\pi \tau(\lambda) D^2}{f^2 \rho_0^2}$, здесь D — диаметр входного зрачка объектива, f — фокусное расстояние объектива, $\tau(\lambda)$ — спектральное пропускание оптической системы, ρ_0 — радиус кружка рассеяния.

В этом случае для оптико-электронного прибора с матричным фотоприемником передаточная функция оптического тракта будет равна

$$K_{o.т}(jv_1, jv_2) = PSa\left(\frac{aMv_1}{2}\right) Sa\left(\frac{bNv_2}{2}\right) \exp\left[-\frac{\rho_0^2}{4\pi}(v_1^2 + v_2^2)\right] \exp\left\{-j\left[\frac{a(M-1)v_1 + b(N-1)v_2}{2}\right]\right\}, \quad (3)$$

где $P = \frac{\pi\tau(\lambda)abMND^2}{f^2}$; a и b , M и N — размеры элемента матрицы и количество элементов по осям x и y соответственно; $Sa(z) = \frac{\sin z}{z}$.

Для простоты анализа будем исходить из предположения, что размеры элементов матрицы по обеим осям равны ($a = b$) и одинаково их количество ($M = N$). В этом случае $\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta$, а потери приведенной энтропии в оптическом тракте будут определяться соотношением

$$H_{\Pi}^* = \frac{2}{\Delta^2} \int_{\Delta} \int_{\Delta} \left\{ \log \left| P_1 Sa^2 \left(\frac{aMv_1}{2} \right) \right| - \frac{\rho_0^2}{4\pi} (v_1^2 + v_2^2) \right\} dv_1 dv_2 =$$

$$= \frac{2}{\ln 2} \left[\ln P_1 - \frac{\Delta^2}{6\pi\Delta_0^2} - \frac{2}{aM\Delta} Cl_2(aM\Delta) - 2(\ln aM\Delta - 1) \right], \quad (4)$$

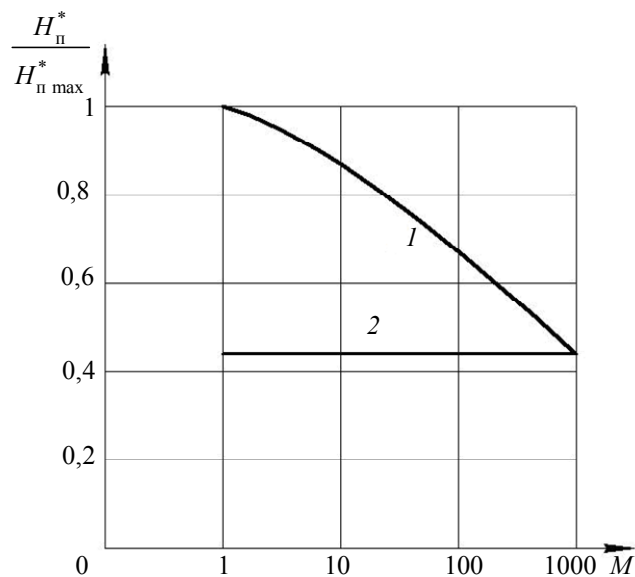
где $Cl_2(u) = -\int_0^u \ln \left| 2 \sin \frac{t}{2} \right| dt$ — интеграл Клаузена, $P_1 = \frac{\pi\tau(\lambda)a^2M^2D^2}{f^2}$, Δ_0 — полоса пропускания пространственных частот объектива.

Полосу пропускания пространственных частот оптического тракта Δ можно представить соотношением

$$\Delta = \int_0^{\infty} Sa \left(\frac{aMv}{2} \right) \exp \left(-\frac{\rho_0^2 v^2}{4\pi} \right) dv = \frac{\pi}{aM} \operatorname{erf} \left(\frac{aM\sqrt{\pi}}{2\rho_0} \right), \quad (5)$$

где $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-t^2) dt$ — функция Крампа.

Результаты расчетов по формуле (4) с учетом выражения (5) представлены на рисунке в виде нормированных по максимальной величине кривых, качественно характеризующих изменение потерь приведенной энтропии при изменении количества элементов матрицы для заданных размеров этих элементов (кривая 1) и при условии сохранения размеров матрицы (кривая 2).



Рассмотрим влияние интервала ε между чувствительными элементами матрицы на потери приведенной энтропии. При $\varepsilon \ll a$ и $\varepsilon \ll b$ передаточная функция оптического тракта ОЭП и потери приведенной энтропии в оптическом тракте будут определяться соответственно выражениями

$$K_{\text{о.т}}(jv_1, jv_2) = P_m \text{Sa}\left(\frac{Mav_1}{2}\right) \text{Sa}\left(\frac{Nbv_2}{2}\right) \exp\left[-\frac{\rho_0^2}{4\pi}(v_1^2 + v_2^2)\right] \times \\ \times \frac{\cos\left(\frac{Mv_1\varepsilon}{2}\right) \cos\left(\frac{Nv_2\varepsilon}{2}\right)}{\cos\left(\frac{v_1\varepsilon}{2}\right) \cos\left(\frac{v_2\varepsilon}{2}\right)} \exp\left\{-j\left[\frac{(M-1)(a+\varepsilon)v_1}{2} + \frac{(N-1)(b+\varepsilon)v_2}{2}\right]\right\}, \\ H_{\text{п}}^* = \frac{2}{\Delta_1 \Delta_2} \int_{\Delta_1} \int_{\Delta_2} \left\{ \log \left[P_m \text{Sa}\left(\frac{Mav_1}{2}\right) \text{Sa}\left(\frac{Nbv_2}{2}\right) \frac{\cos\left(\frac{Mv_1\varepsilon}{2}\right) \cos\left(\frac{Nv_2\varepsilon}{2}\right)}{\cos\left(\frac{v_1\varepsilon}{2}\right) \cos\left(\frac{v_2\varepsilon}{2}\right)} \right] - \frac{\rho_0^2}{4\pi}(v_1^2 + v_2^2) \right\} dv_1 dv_2. \quad (6)$$

Результаты численного интегрирования по формуле (6) показали, что множитель отношений косинусов при условии, что $\varepsilon \ll a$ и $\varepsilon \ll b$, вносит незначительные изменения в приведенную энтропию потерь.

Проведенный анализ позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением размеров матрицы потери приведенной энтропии уменьшаются;
- при сохранении размеров матрицы изменение размеров ее элементов или их количества приводит к постоянной потере приведенной энтропии.

Полученные соотношения позволяют качественно оценить влияние параметров элементов оптического тракта на информационные потери в оптическом тракте оптико-электронного прибора с многоэлементными фотоприемниками.

ЛИТЕРАТУРА

Лебедько Е. Г. Теоретические основы передачи информации, М. — СПб: Лань, 2011. 350 с.

Сведения об авторах

- Елена Николаевна Зверева** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; ст. преподаватель
- Евгений Георгиевич Лебедько** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: eleb@rambler.ru
- Фи Хуан Тунг** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

А. А. СМЕХОВ, И. А. КОНЯХИН

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛУЧЕННОСТИ ВИНЬЕТИРОВАННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ В АВТОКОЛЛИМАЦИОННОЙ СИСТЕМЕ С ПОМОЩЬЮ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Рассматриваются особенности виньетирования в автоколлимационных системах и алгоритмические методы компенсации систематической погрешности, вызванной виньетированием; изложены принципы построения программной модели с использованием компьютерной симуляции.

Ключевые слова: автоколлимация, измерение углов поворота, компьютерное моделирование, погрешность виньетирования.

При монтаже и последующем мониторинговом наблюдении за функционированием крупногабаритных объектов требуется осуществлять контроль и измерение деформаций их элементов, вызванных как их собственным весом, так и влиянием внешних условий — порывами ветра или температурными изменениями.

Для контроля угловых деформаций эффективны автоколлимационные системы, включающие контрольный элемент — плоское зеркало, установленное на исследуемом объекте в точке деформации, и оптико-электронный автоколлиматор, установленный на жестком основании [1]. Излучение марки автоколлиматора, выполненной в виде малоразмерного оптического источника с диафрагмой, формируется объективом автоколлиматора в параллельный рабочий пучок лучей, падающий на плоское зеркало (рис. 1). После отражения рабочий пучок повторно проходит через объектив автоколлиматора и формирует изображение марки на чувствительной площадке анализатора, выполненного в виде матричного фотоприемника — ПЗС- или КМОП-матрицы. При угловом смещении (повороте) контрольного элемента вследствие деформации объекта отраженный пучок отклоняется от исходного направления, что приводит к соответствующему смещению изображения марки. В результате микропроцессорной обработки видеокadra измеряется величина смещения изображения марки, что позволяет определить угловое смещение контрольного элемента [1].

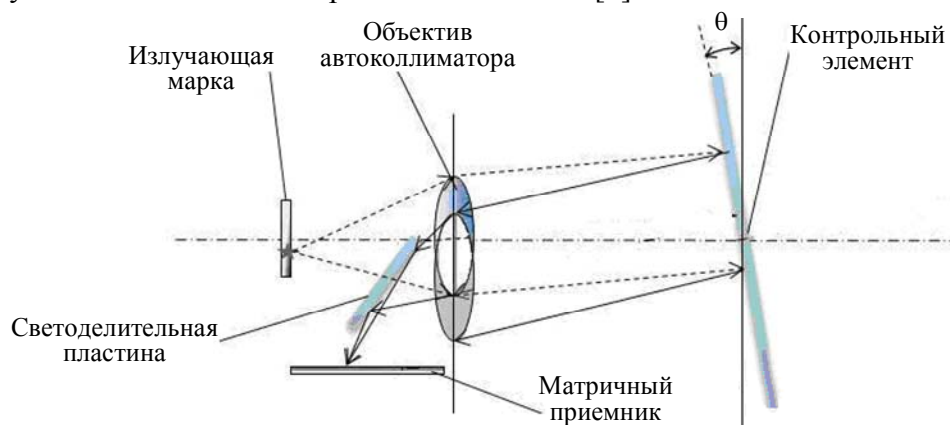


Рис. 1

Ограничение дистанции автоколлимационных измерений вследствие виньетирования. Дистанция от оптико-электронного автоколлиматора до контрольного элемента не превышает 2—3 м, что в значительной степени объясняется виньетированием отраженного рабочего пучка при прохождении через объектив автоколлиматора в случае углового смещения контрольного элемента [1].

Как показывает анализ, начиная с некоторой дистанции до контрольного элемента при его повороте на угол θ часть наклонного отраженного пучка „срезается“ (виньетируется) апертурой объектива, что приводит к нарушению симметричности формы распределения облученности в изображении марки, неточному измерению смещения его средневзвешенного энергетического центра и, соответственно, к погрешности измерения углового смещения контрольного элемента [1, 2].

Погрешность, вызванная виньетированием, является систематической, что определяет возможность ее компенсации и, следовательно, увеличения дистанции при измерении углов автоколлимационным методом.

Возникающая несимметричность распределения облученности сложным образом зависит как от величины углового смещения контрольного элемента, так и от соотношения апертур объектива и контрольного элемента и дистанции измерения [3].

Указанные обстоятельства затрудняют аналитические методы исследования погрешности вследствие виньетирования.

При известных параметрах элементов оптической схемы автоколлиматора и дистанции до контролируемого объекта для оценки величины погрешности измерения, вызванной виньетированием, и разработки алгоритма ее компенсации предлагается использовать компьютерную модель.

Принципы построения программной модели формирования виньетированного изображения. Детерминированное моделирование виньетированного изображения марки основано на найденной зависимости, согласно которой облученность в точке изображения пропорциональна интегралу по области перекрытия сечения отраженного пучка, формирующего изображение этой точки, апертурой объектива [4]: см. рис. 1. Формируемый объективом элементарный пучок, исходящий из точки излучающей марки (границы пучка изображены точками), после отражения от контрольного элемента (его апертура не ограничивает пучок), повернутого на угол θ (границы показаны сплошными линиями), формирует изображение точки марки на матричном приемнике. Облученность в точке изображения определяется (в относительных единицах) как отношение двух площадей: перекрытия сечения отраженного пучка апертурой объектива (незакрашенный эллипс) и самой апертуры объектива.

При работе программной модели вычисляется двумерное поле облученности на матричном фотоприемнике автоколлиматора. Каждая точка поля облученности определяется операторами, моделирующими прохождение элементарных пучков, формирующих облученность в этой точке изображения марки, через оптические элементы автоколлимационной системы (включая оператор пустого пространства). Также моделируются различные формы апертуры объектива и излучающей марки, учитывается диаграмма направленности излучения марки, что позволяет применять программную модель непосредственно в процессе проектирования автоколлимационной углоизмерительной системы. Модель разработана в технологии MatLab, оптимизированной для сложных вычислений с матричными данными.

В качестве примера на рис. 2, *а—г* приведено программное представление результатов моделирования распределения облученности изображения в случае излучающей марки крестообразной формы с постоянной яркостью и апертуры объектива квадратной формы (*а*). Графики (рис. 2, *б, в*) демонстрируют распределение облученности в двух ортогональных сечениях изображения: сечении, проходящем через центральную точку изображения (*в*), и сечении, где наибольшая облученность составляет 0,74 от величины облученности в центральной точке (*б*). На рис. 2, *г* в специальных полях показаны параметры автоколлимационной системы: задний фокальный отрезок и величина апертуры

объектива, половина размера излучающей марки, расстояние до точки формирования пучка автоколлиматора [2].

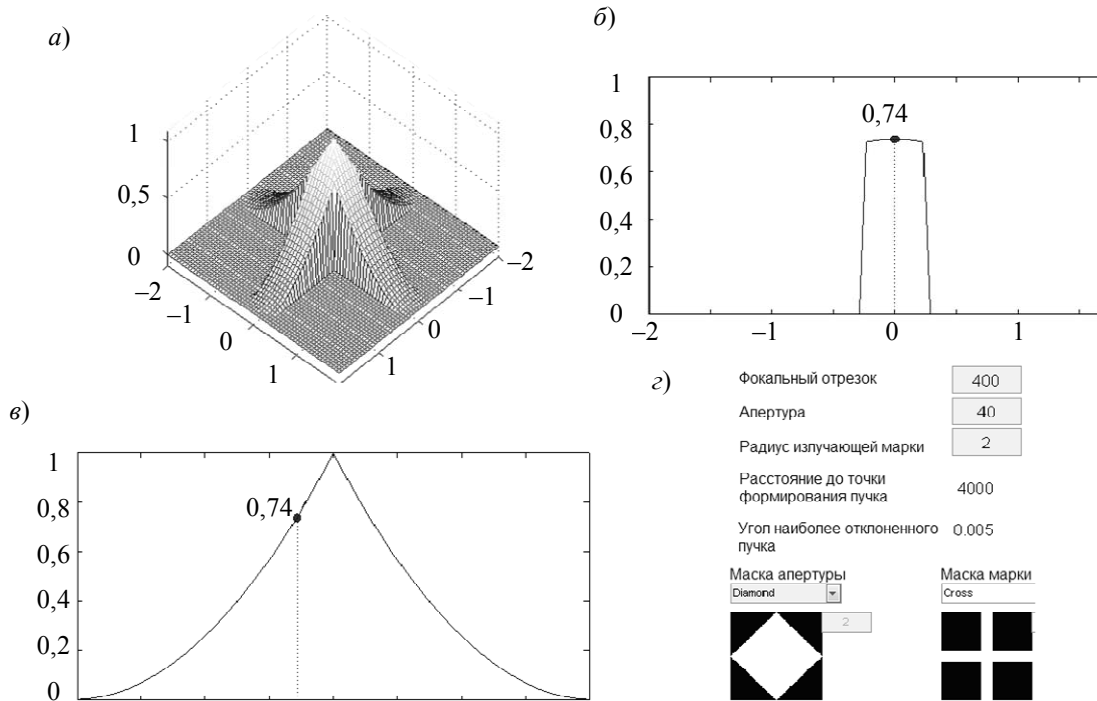


Рис. 2

Определение погрешности измерения углов с помощью программной модели. Разработанная программная модель виньетирования в автоколлимационной системе позволяет спрогнозировать несимметричность распределения облученности в изображении марки и определить зависимость возникающей погрешности измерения от величины углового смещения (поворота) контрольного элемента при известных габаритах оптических элементов автоколлиматора.

Полученная зависимость в табулированной форме запоминается в микропроцессорной системе обработки автоколлиматора и используется для вычисления истинного углового смещения контрольного элемента по измеренной величине.

Результаты расчета зависимости погрешности измерения (δx), вызванной виньетированием, от величины углового смещения (θ) контрольного элемента для автоколлимационной системы со следующими параметрами: фокусное расстояние объектива 250 мм, диаметр апертуры объектива 40 мм, диаметр зеркала 60 мм, диаметр марки (полупроводниковый излучающий диод) 1 мм, для двух различных дистанций (L) приведены на рис. 3.

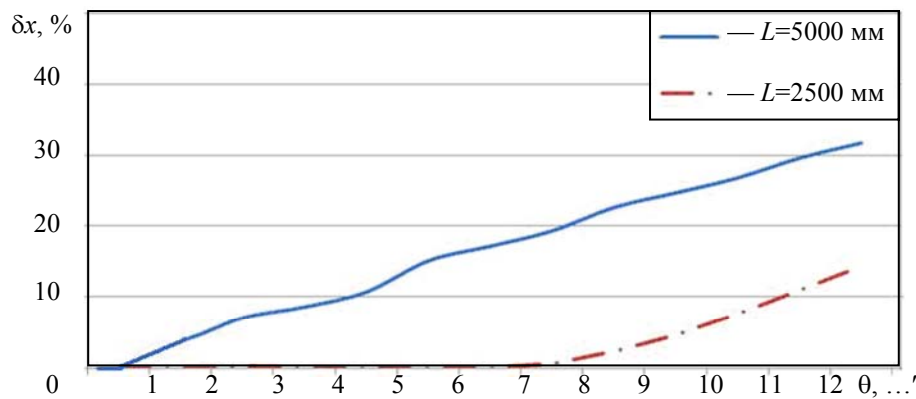


Рис. 3

Анализ рисунка показывает, что при $L=2500$ мм диапазон измерения угловых смещений при отсутствии погрешности, вызванной виньетированием, не превышает $7'$, а при $L=5000$ мм — $0,5'$.

При увеличении диапазона измерения на каждые 5' относительная погрешность возрастает соответственно на 10 %. Следовательно, на дистанции 5000 мм невозможны точные автоколлимационные измерения с относительной погрешностью, не превосходящей 5 %.

Использование полученной зависимости для коррекции измеренных значений угловых смещений позволяет увеличить диапазон измерения на каждой из рассмотренных дистанций до 12—15', что вполне достаточно для решения практических задач [3].

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных по федеральной целевой программе „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Проектирование оптико-электронных приборов: Учебник / Ю. Б. Парвулюсов, С. А. Родионов, В. П. Солдатов и др.; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Логос, 2000. 488 с.
2. Коняхин И. А., Панков Э. Д. Трехкоординатные оптические и оптико-электронные угломеры: Справочник. М.: Недра, 1991.
1. Konyakhin I. A. Development of optoelectronic autocollimation devices for monitoring angular displacements // J. Opt. Technol. 2000. N 67. P. 344—348 [Электронный ресурс]: <<http://www.opticsinfobase.org/jot/abstract.cfm?URI=jot-67-4-344>>.
2. Konyakhin I. A., Polyakov V. M., Vorona A. M. Research on the methods to compensate the systematic error at optical autoreflection angular measurements // Intern. Symp. on Instrumentation Science and Technology: J. of Physics: Conference. 2006. Ser. 48. P. 932—936.

Сведения об авторах

Андрей Алексеевич Смехов

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: myfearismyblue@gmail.com

Игорь Алексеевич Коняхин

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: igor@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

А. А. АЛЁХИН, Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, А. М. ОЛЬХОВСКИЙ,
Д. Б. ПЕТУХОВА, А. Н. ЧЕРТОВ

ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА ЭКСПРЕСС-АНАЛИЗА РУД ТВЕРДЫХ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ ОПТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Рассмотрены особенности построения оптико-электронной системы экспресс-анализа минерального сырья. Приведены результаты экспериментальных исследований указанной системы, подтверждающие эффективность ее использования для нужд горно-добывающей промышленности.

Ключевые слова: оптико-электронная система, фотометрический метод, оптический метод, экспресс-анализ, обогащение руд твердых полезных ископаемых.

Оптический метод обогащения руд твердых полезных ископаемых (в зарубежной практике известный как “color sorting”, в отечественной — как „фотометрический“) является наиболее динамично развивающимся среди радиометрических методов и успешно используется в горно-добывающей промышленности при добыче золота [1], алмазов [2], никеля [3], кальция [4], полевых шпатов [5]. Обогащение минерального сырья с использованием данного метода основывается на селекции минералов по их оптическим характеристикам, таким как блеск, цвет, отражательная способность, прозрачность.

На рынке обогатительного оборудования в настоящее время широко представлены оптические сепараторы различных фирм: например, Optosort (“ALUD GmbH”, Германия), MikroSort (“Mogensen GmbH”, Германия), UltraSort (“Commodas GmbH”, Германия) и др. Опуская подробный анализ их достоинств и недостатков, обратим внимание на одну из ключевых, по мнению авторов, проблем, препятствующих развитию и расширению границ применимости оптического метода.

Указанная проблема заключается в отсутствии методики определения степени обогатимости руд без прямого опробования на существующих сепараторах, а также в отсутствии оборудования, реализующего данную методику. Кроме того, следует отметить отсутствие критериев, определяющих выбор того или иного производителя оптических сепараторов. Прямым следствием сложившейся ситуации является „непрозрачность“ оптического метода и отказ потенциальных заказчиков от его использования.

Очевидно, что в оптических сепараторах различных фирм для обработки получаемых изображений минеральных объектов могут использоваться различные системы цветовых координат и разнообразные алгоритмы обработки [6]. При этом применяемые в сепараторах блоки регистрации, как правило, различаются по своим техническим характеристикам [6, 7].

В то же время во всех без исключения оптических сепараторах реализуются принципы анализа цветных изображений. Следовательно, представляется реальным создание оптико-электронной системы (ОЭС), которая, на основе результатов обработки снимков нескольких минеральных образцов (как содержащих полезные компоненты, так и „пустых“), позволит выработать решение о возможности (или невозможности) разделения минералов оптическим методом. При этом решение может быть принято для совокупности условий проведения анализа: например, ряда источников освещения (белых светодиодов, люминесцентных ламп,

галогенных ламп и т.п.) и систем цветowych координат, используемых для оцифровки изображения (RGB, Yuv, Lab и др.).

Принцип работы ОЭС экспресс-анализа руд твердых полезных ископаемых оптическим методом иллюстрируется схемой, представленной на рис. 1. Блок освещения объектов (БО) создает необходимый уровень освещенности на поверхности анализируемого объекта. Блок регистрации (БР) получает изображения объекта по сигналу его наличия в зоне регистрации от блока синхронизации (БС). Блок управления и анализа данных (БУА) координирует работу всей ОЭС и выработывает решение о возможности или невозможности разделения исследуемых образцов оптическим методом, а также определяет значения порогов выделения полезных областей и величин порогов разделения.

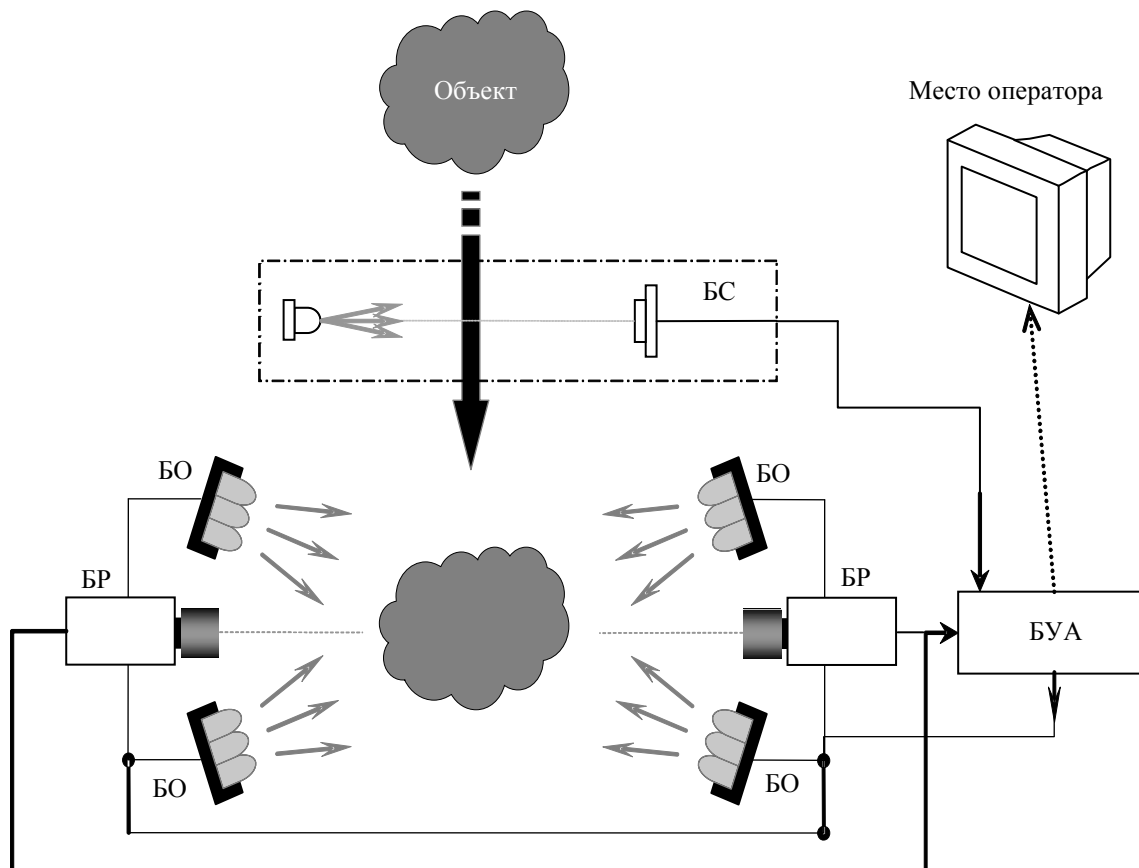


Рис. 1

Как известно, минеральные объекты можно разделять по различным селективным признакам: например, по наличию зон определенной цветности на поверхности объекта [6, 8, 9], по форме изображения объекта [6, 8], по наличию прожилок на объекте и их длине [10] и т.п. Поэтому программное обеспечение ОЭС экспресс-анализа должно предусматривать возможность выбора оператором любого из перечисленных признаков или их сочетания. Схема работы программного обеспечения ОЭС приведена на рис. 2.

На кафедре оптико-электронных приборов и систем НИУ ИТМО был разработан экспериментальный образец оптико-электронной системы экспресс-анализа руд твердых полезных ископаемых оптическим методом. Исследования системы проводились на базе научно-производственного предприятия „ГеоТестСервис“ (Москва) в условиях, максимально приближенных к условиям добычи и предварительного обогащения минерального сырья.

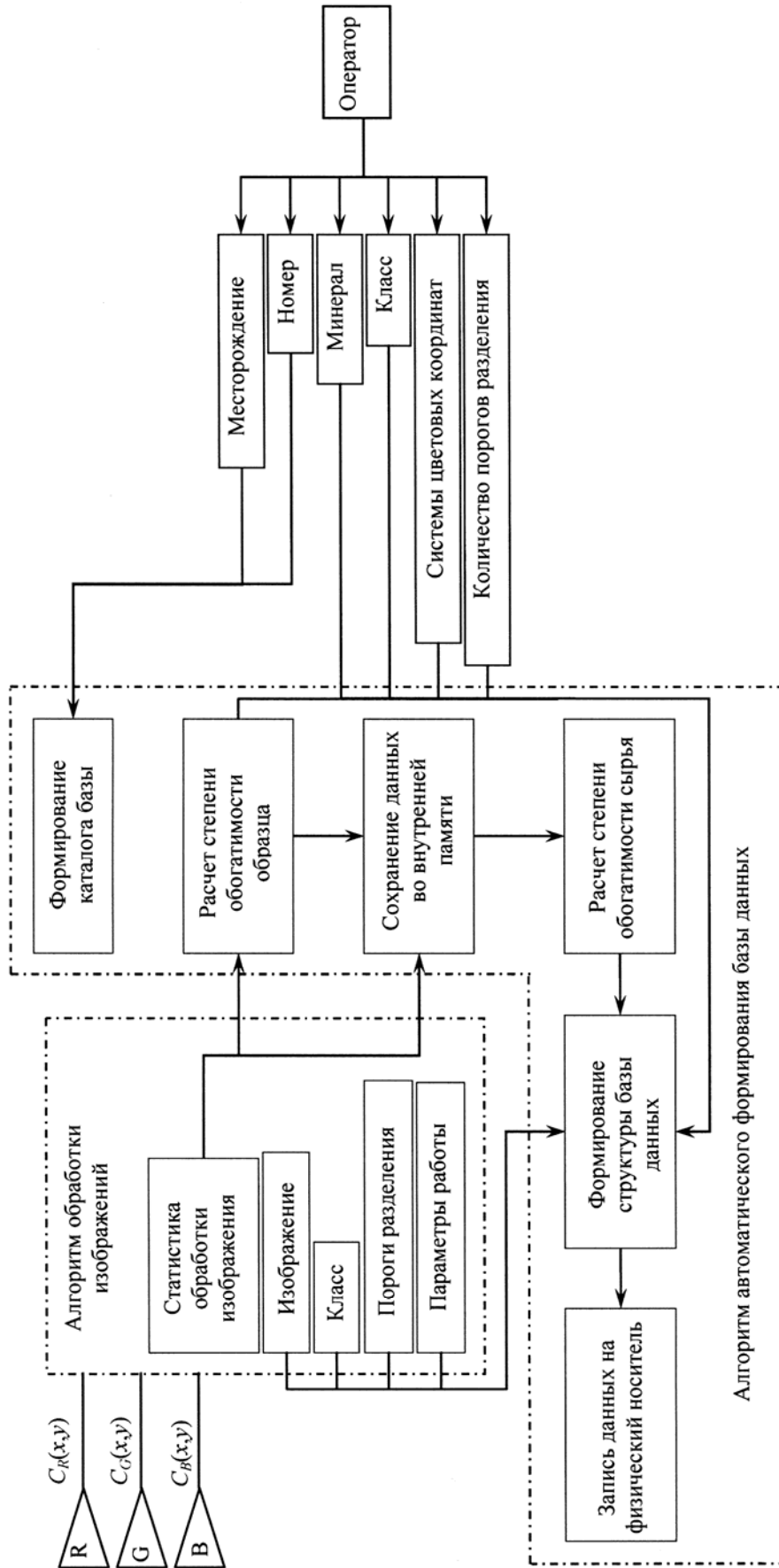


Рис. 2

В качестве анализируемых минеральных объектов были выбраны образцы дубликатов руды попутной добычи класса крупности от -60 до $+30$ мм золотоносного месторождения „Коневинское“. Изображения наиболее характерных минеральных образцов пробы представлены на рис. 3 в порядке уменьшения содержания в них золота (больше всего золота содержит кварц, тогда как гранодиориты фактически не содержат золота и считаются пустой породой).

Визуальный анализ минералов показал, что наличие областей определенной цветности на поверхности образцов является наиболее эффективным селективным признаком (по которому специалист-минералог определяет степень полезности каждого образца): кварцу соответствуют белые и светло-желтые оттенки; окисленный березит представлен различными оттенками оранжевого и коричневого цветов; березит отличается болотно-зелеными оттенками; остальные цветовые оттенки присущи гранодиоритам.

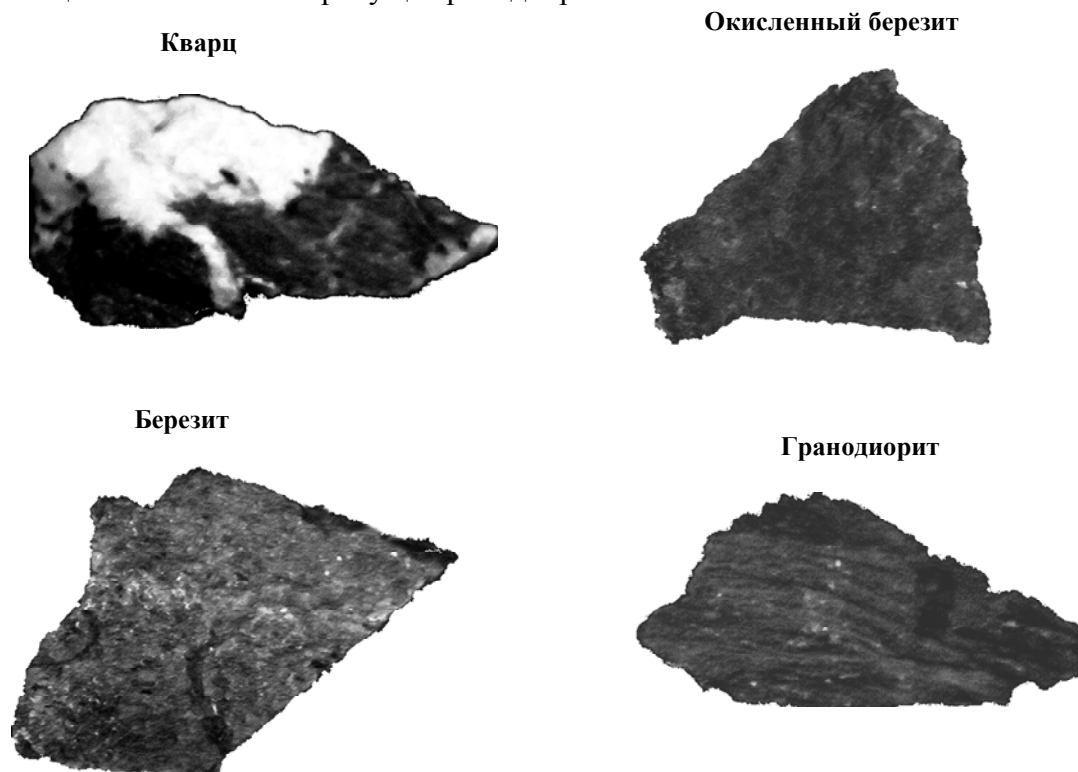


Рис. 3

По результатам проведенных исследований предложена следующая методика определения степени обогатимости руд твердых полезных ископаемых оптическим методом. Сначала вычисляются границы определяемых областей цветности и их относительные площади $S_{R,i}$ для выбранных систем цветовых координат:

$$S_{R,i} = \frac{S_{o,ц,i}}{S_{из}} \cdot 100 \%,$$

где $S_{из}$ — площадь изображения объекта, $S_{o,ц,i}$ — площадь i -й области цветности.

Далее оценивается фактор A каждого минерального образца:

$$A = \begin{cases} 1, & \text{если } \sum_{i=1}^N S_{R,i} \geq P; \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

где N — количество анализируемых областей цветности; P — величина порога разделения.

Минеральный образец считается полезным при $A = 1$; принадлежности образца к пустой породе соответствует $A = 0$.

Для верификации результатов анализа пробы с помощью разработанной ОЭС образцы руды попутной добычи золотоносного месторождения „Коневинское“ исследовались также на сепараторе фирмы “Commodas”. Результаты сравнительного анализа четырех представленных минеральных образцов с использованием ОЭС экспресс-анализа и сепаратора приведены в таблице.

Образец	Система цветowych координат	$P, \%$, —ОЭС экспресс-анализа,					$P, \%$, — “Commodas”				
		60	70	75	80	90	60	70	75	80	90
Кварц	RGB	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1
	Yuv	0	0	0	1	1					
	HLS	0	0	1	1	1					
Окисленный березит	RGB	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Yuv	1	1	1	1	1					
	HLS	1	1	1	1	1					
Березит	RGB	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1
	Yuv	0	0	1	1	1					
	HLS	1	1	1	1	1					
Гранодиорит	RGB	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
	Yuv	0	0	0	0	0					
	HLS	0	0	0	0	1					

Как видно из представленных результатов, для ОЭС экспресс-анализа порог $P = 75 \dots 80 \%$ позволяет эффективно отделить полезные кварц, окисленный и простой березиты от гранодиоритов в Yuv- и HLS-системах цветowych координат. Этот же порог для RGB-системы цветowych координат составляет 90% .

Сравнение данных анализа пробы сепаратором “Commodas” (работающим в системе Yuv) показало высокую степень совпадения с результатами, полученными с использованием ОЭС экспресс-анализа для той же системы цветowych координат.

Таким образом, показана возможность реализации ОЭС, обеспечивающей оценку степени обогатимости руд оптическим методом без прямого опробования на существующих сепараторах. Также предлагаемая ОЭС экспресс-анализа позволяет оценить результаты применения оптического метода сепарации при использовании различных источников излучения, нескольких систем цветowych координат и разнообразных селективных признаков. Это позволяет выбрать среди известных типов сепараторов наиболее подходящие для обогащения руды конкретного месторождения.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Von Ketelhodt L. Viability of optical sorting of gold waste rock dumps // Proc. of World Gold Conf. 2009. P. 271—277 [Электронный ресурс]: <<http://www.saimm.co.za/publications/conference-papers>>.
2. Обзор алмазодобывающей отрасли России [Электронный ресурс]: <<http://www.advisers.ru/file/advisers/almaz.pdf>>.
3. Dehler M. Optical sorting of ceramic raw materials // Tile & Brick Internat. 2003. Vol. 19 [Электронный ресурс]: <http://www.worldcat.org/title/optical-sorting-of-ceramic-raw-material/oclc/210215395&referer=brief_results>.
4. Harbeck H. Optoelectronic separation in feldspar processing at maffei sarda // Aufbereitungs Technik. 2001. Vol. 42, N. 9.

5. *Tako P. R. de Jong*. The Economic Potential of Automatic Rock Sorting / Delft Univ. of Technology. 2005.
6. *Manouchehri H. R.* Sorting: Possibilities, Limitations and Future [Электронный ресурс]: <<http://pure.ltu.se/portal/files/299975/article>>.
7. *Рябкин В. К., Литвинцев Э. Г., Тихвинский А. В., Карпенко И. А., Пичугин А. Н., Кобзев А. С.* Метод полихромной фотометрической сепарации золотосодержащих руд // Горный журн. 2007. № 12.
8. *Reinhardt C.* The use of a mogensen sizer and mikrosort optoelectronic system in aluminium production // Aufbereitungs Technik. 2002. Vol. 43, N 7.
9. *Dehler M.* Optical sorting of quartz gravel to reduce the iron content // Aufbereitungs Technik. 2006. Vol. 47, N 8—9.
10. Успешное обнаружение примесей с помощью сортировочной системы REDWAVE-XRF // GlassRussia. 2012. № 10. С. 32—34 [Электронный ресурс]: <http://www.mgorod.com/index.php?option=com_content&view=article&id=101&Itemid=215>.

Сведения об авторах

- Артём Андреевич Алёхин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: temka-pk@mail.ru
- Елена Васильевна Горбунова** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: vredina_ia@mail.ru
- Валерий Викторович Коротяев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий кафедрой; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Александр Михайлович Ольховский** — ОАО «Научно-производственное предприятие „ГеоТестСервис“», Москва; зам. генерального директора; E-mail: a_olh@mail.ru
- Дарья Борисовна Петухова** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: petuxovadarja@yandex.ru
- Александр Николаевич Чертов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; доцент; E-mail: a.n.chertov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов
и систем НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

А. И. КНЯХИН, Ф. В. МОЛЕВ, А. Н. ТИМОФЕЕВ

СИНТЕЗ ОТРАЖАТЕЛЕЙ ДЛЯ ТРЕХКООРДИНАТНЫХ АВТОКОЛЛИМАТОРОВ С СОВМЕЩЕННЫМ МАТРИЧНЫМ ПОЛЕМ

Рассматривается метод расчета параметров отражателей в виде трехгранного зеркала для измерения трех угловых координат с помощью автоколлиматора с упрощенной структурой. Приводится анализ параметров отражателей для трехкоординатных измерений.

Ключевые слова: автоколлимация, трехкоординатные измерения, отражатель в виде трехгранного зеркала, инвариантная ось.

Для контроля взаимного положения элементов крупногабаритных экспериментальных установок, например опто- и радиотелескопов [1, 2] и космических систем оптической локализации [3], а также для измерения компенсируемых пространственных деформаций корпусов и опор блоков систем астронавигации [4] применяются трехкоординатные оптико-электронные автоколлиматоры, в которых для измерений используются специальные отражатели, размещаемые на объекте контроля [5].

Известные трехкоординатные системы [5], построенные по оптической схеме с единым коллиматором (рис. 1), содержат автоколлиматор для измерения коллимационных углов (углов поворота отражателя относительно осей, перпендикулярных оптической оси объектива автоколлиматора) и дополнительный приемный канал для измерения угла скручивания (угла поворота отражателя относительно оптической оси объектива автоколлиматора). В состав автоколлиматора входят точечная излучающая марка 1, объектив 2, отражатель 3 и фотоприемная матрица 4, а в состав приемного канала — объектив 5 и фотоприемная матрица 6.

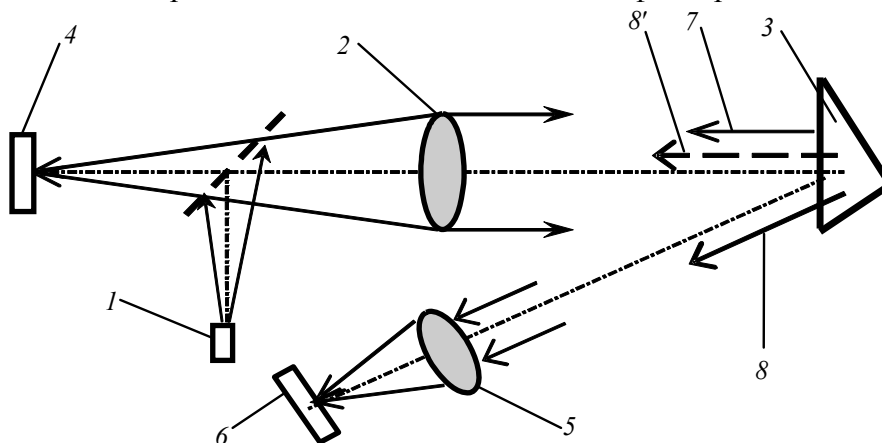


Рис. 1

Отражатель 3 автоколлиматора выполнен в виде призмного углового отражателя, двугранные углы между отражающими гранями которого имеют малые отклонения от 90° . Некоторые лучи — часть 7 — пучка автоколлиматора отражаются от преломляющей грани отражателя 3 как от автоколлимационного зеркала и формируют изображение марки на фотоприемной матрице 4; второе изображение марки, созданное основными лучами — частью 8 — пучка после его отражения от внутренних граней отражателя 3, регистрируется матрицей 6. При поворотах отражателя пучки 7 и 8 отклоняются от исходного направления, что приводит к пропорциональному смещению формируемых ими изображений. После измерения величин смещений с помощью матричных фотоприемников 4 и 6 (ПЗС или КМОП), сопряженных

с микропроцессорами обработки видеокладов, при известных фокусных расстояниях объективов измеряются углы поворота.

Известны также трехкоординатные системы с полностью разделенными оптическими схемами каналов измерения коллимационных углов и угла скручивания [5]. Фактическое использование двух различных отражательных систем (входной грани и отражающих граней уголкового отражателя) значительно усложняет структуру автоколлиматора. Вследствие виньетирования пучка 7 рабочая дистанция не превышает 1—3 м, что недостаточно для решения многих практических задач [5].

Возможен вариант, когда при определенном соотношении параметров трехгранного угла, образованного отражающими гранями уголкового отражателя, пучок 7 формируется тремя отражающими гранями. При этом чувствительность пучка 7 к изменению коллимационных углов значительно меньше, чем чувствительность при отражении от плоского зеркала, что позволяет практически устранить влияние виньетирования. В этом случае пучок 8 отклонен от оптической оси объектива на малый угол (см. δ' на рис. 1) и для его приема может использоваться объектив 2 автоколлиматора. В результате поля анализа изображений, соответствующие различным измерительным каналам, совмещаются на одной фотоприемной матрице 4, что значительно упрощает оптическую схему трехкоординатного автоколлиматора и расширяет его метрологические возможности. Частный случай расчета параметров такого уголкового отражателя, основанного на результатах анализа пространственных поворотов отражающих граней при формировании требуемого трехгранного угла, приведен в работе [6].

Использование теории „инвариантных осей“ (другой вариант термина — основное неизменное направление) позволяет разработать относительно несложную методику синтеза отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем.

Алгоритм автоколлимационного измерения углов поворота отражателя имеет следующий вид:

$$\mathbf{B} = \mathbf{M}_\Theta \cdot \mathbf{A} = \mathbf{M}_r \cdot \mathbf{M}_d \cdot \mathbf{M}_r^{-1} \cdot \mathbf{A}, \quad (1)$$

где \mathbf{A} и \mathbf{B} — орты отраженного и падающего пучков соответственно, заданные в неподвижной системе координат XYZ автоколлиматора; \mathbf{M}_d — матрица действия трехгранного зеркала, заданная в системе координат $X_1Y_1Z_1$; \mathbf{M}_r и \mathbf{M}_r^{-1} — матрицы прямого и обратного преобразований координат, описывающих поворот отражателя (рис. 2).

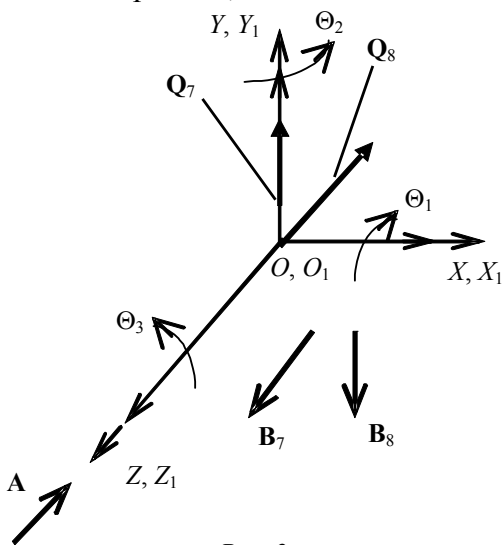


Рис. 2

Для уменьшения погрешности, обусловленной взаимовлиянием процессов измерения контролируемых углов, направляющие векторы \mathbf{Q}_7 , \mathbf{Q}_8 инвариантных осей трехгранного зеркала, соответствующие матрицам действия \mathbf{M}_7 , \mathbf{M}_8 , определяющим отраженные пучки 7 и 8, должны быть взаимно-перпендикулярны и совпадать, соответственно, с осями O_1Y_1 и O_1Z_1 [7]. Матрицы действия отражателя для двух рассматриваемых пучков при этом определяются как

$$\mathbf{M}_7 = \begin{bmatrix} \cos \omega & -\sin \omega & 0 \\ \sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$\mathbf{M}_8 = \begin{bmatrix} \cos \omega & 0 & \sin \omega \\ 0 & -1 & 0 \\ -\sin \omega & 0 & \cos \omega \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где ω — угол поворота пучка относительно инвариантной оси при отражении.

При малых величинах отклонения двугранных углов трехгранного зеркала от 90° с каждой инвариантной осью может быть связан вектор \mathbf{Q} , определяющий угол поворота пучка:

$$\omega \approx \pi - 2 \cdot |\mathbf{Q}|. \quad (4)$$

Тогда матрицы действия трехгранного зеркала при малой величине модуля \mathbf{Q} определяются как

$$\mathbf{M}_7 = \begin{bmatrix} -1 & -2 \cdot |\mathbf{Q}| & 0 \\ 2 \cdot |\mathbf{Q}| & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

$$\mathbf{M}_8 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 2 \cdot |\mathbf{Q}| \\ 0 & -1 & 0 \\ -2 \cdot |\mathbf{Q}| & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Составляющие ортов отраженных пучков $\mathbf{B}_7, \mathbf{B}_8$ определяются при подстановке матриц (5) и (6) в алгоритм (1) при условии осевого падения пучка, орт которого $\mathbf{A} = [0 \ 0 \ -1]^T$:

$$\mathbf{B}_{7X} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_2, \quad \mathbf{B}_{7Y} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_1, \quad \mathbf{B}_{8X} \approx 2 \cdot |\mathbf{Q}|, \quad \mathbf{B}_{8Y} = 2 \cdot |\mathbf{Q}| \cdot \Theta_3. \quad (7)$$

Также формируются и пучки с обратной последовательностью отражений, выражения для составляющих их ортов $\mathbf{B}'_7, \mathbf{B}'_8$ имеют знаки, противоположные указанным в выражениях (7). Для измерений может использоваться любая пара пучков или, в зависимости от алгоритма обработки изображения, две сразу.

Как следует из выражений (7), три угла измеряются независимо друг от друга, причем чувствительность к изменению коллимационных углов пропорциональна величине модуля $2 \cdot |\mathbf{Q}|$ направляющего вектора и, следовательно, значительно меньше, чем при измерениях с использованием автоколлимационного зеркала.

Определим общие условия реализации матриц действия $\mathbf{M}_7, \mathbf{M}_8$ трехгранного зеркала (см. формулы (5), (6)).

Пусть углы между гранями трехгранного зеркала (соответственно 1 и 2, 2 и 3, 3 и 1) отличаются на величины $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ от 90° (рис. 3). Зададим соотношения между величинами $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ как $\delta_2 = \delta, \delta_1 = k_1 \delta, \delta_3 = k_2 \delta$, где k_1, k_2 — некоторые коэффициенты. Выражения, определяющие составляющие направляющих векторов $\mathbf{Q}_7, \mathbf{Q}_8$ инвариантных осей для последовательностей отражения 2—1—3 и 1—2—3 пучка от граней, задаются в табл. 1 [6]. Значения составляющих для обратных последовательностей отражения имеют противоположные знаки.

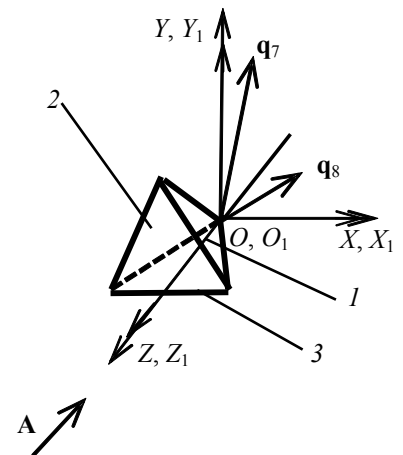


Рис. 3

Таблица 1

Ось	Составляющая вектора \mathbf{Q}_7 (последовательность отражения 2—1—3)	Составляющая вектора \mathbf{Q}_8 (последовательность отражения 1—2—3)
OX_1	$\frac{\sqrt{2} \cdot \delta}{2}(1+k_2)$	$\frac{\sqrt{2} \cdot \delta}{2}(1+k_2)$
OY_1	$\frac{\sqrt{6} \cdot \delta}{6}(1-k_2+2k_1)$	$\frac{\sqrt{6} \cdot \delta}{6}(1-k_2-2k_1)$
OZ_1	$\frac{\sqrt{3} \cdot \delta}{3}(-1+k_2+k_1)$	$-\frac{\sqrt{3} \cdot \delta}{3}(1-k_2+k_1)$

Приравнявая нулю скалярное произведение направляющих векторов \mathbf{Q}_7 и \mathbf{Q}_8 , найдем соотношение между коэффициентами k_1 и k_2 , при котором инвариантные оси будут перпендикулярны:

$$k_2^2 - k_1^2 + 1 = 0. \quad (8)$$

Модуль направляющих векторов при условии (8) определяется выражением

$$|\mathbf{Q}| = \delta\sqrt{2} \cdot \sqrt{k_2^2 + 1}. \quad (9)$$

Для совмещения направляющих векторов \mathbf{Q}_7 , \mathbf{Q}_8 инвариантных осей с координатными осями O_1Y_1 и O_1Z_1 необходимо повернуть трехгранное зеркало относительно исходного положения на некоторые начальные углы Ξ_1 , Ξ_2 , Ξ_3 относительно соответствующих осей координат.

Величины начальных углов определяются из уравнений

$$(0 \ 0 \ -1)^T = \mathbf{M}_{\Xi} (\mathbf{q}_{7X} \ \mathbf{q}_{7Y} \ \mathbf{q}_{7Z})^T; \quad (10)$$

$$(0 \ 1 \ 0)^T = \mathbf{M}_{\Xi} (\mathbf{q}_{8X} \ \mathbf{q}_{8Y} \ \mathbf{q}_{8Z})^T, \quad (11)$$

где $\mathbf{q}_7 = \mathbf{Q}_7/|\mathbf{Q}|$, $\mathbf{q}_8 = \mathbf{Q}_8/|\mathbf{Q}|$ — орты направляющих векторов \mathbf{Q}_7 , \mathbf{Q}_8 ; \mathbf{M}_{Ξ} — матрица поворота, определяемая выражением

$$\mathbf{M}_{\Xi} = \begin{bmatrix} \cos \Xi_2 \cdot \cos \Xi_3 & -\cos \Xi_2 \cdot \sin \Xi_3 & \dots \\ \cos \Xi_3 \cdot \sin \Xi_1 \cdot \sin \Xi_2 + \cos \Xi_1 \cdot \sin \Xi_3 & \cos \Xi_1 \cdot \cos \Xi_3 - \sin \Xi_1 \cdot \sin \Xi_2 \cdot \sin \Xi_3 & \dots \\ \sin \Xi_3 \cdot \sin \Xi_1 - \cos \Xi_1 \cdot \cos \Xi_3 \cdot \sin \Xi_2 & \cos \Xi_1 \cdot \sin \Xi_2 \cdot \sin \Xi_3 + \cos \Xi_3 \cdot \sin \Xi_1 & \dots \\ \dots & \sin \Xi_2 & \dots \\ \dots & -\cos \Xi_2 \cdot \sin \Xi_1 & \dots \\ \dots & \cos \Xi_1 \cdot \cos \Xi_2 & \dots \end{bmatrix}.$$

Система из трех уравнений, выбранных из совокупности (10) и (11), решается численными методами в программе MathCAD при различных значениях коэффициента k_2 . Некоторые результаты расчета, позволяющие задать матрицы действия (2) и (3) отражателя, а также ориентировать его апертуру относительно падающего пучка, приведены в табл. 2. Значение угла Ψ определяет наклон апертуры трехгранного зеркала относительно падающего пучка.

Таблица 2

k_2	k_1	$ \mathbf{Q} $	Ξ_1	Ξ_2	Ξ_3	Ψ, \dots°
-2	2,24	3,168	9°42'	-14°58'	-10°53'	17
-1,8	2,06	2,918	9°20'	-12°57'	-9°22'	16
-1,5	1,80	2,558	10°48'	-9°13'	-6°35'	13
-1,2	1,56	2,218	10°23'	-4°14'	-3°	11
-0,9	1,35	1,908	10°18'	3°32'	2°15'	10
-0,6	1,17	1,658	9°5'	12°35'	9°47'	14
-0,3	1,04	1,488	7°46'	23°14'	18°44'	24
0	1	$\sqrt{2} \cdot \delta$	5°	27°54'	21°44'	27

Следует отметить два особенных варианта:

- аналитическое решение: $k_2 = -1$, $k_1 = \sqrt{2}$, $\Xi_1 = \arctg(3 - 2\sqrt{2}) = 9^\circ 50'$, $\Xi_2 = 0$, $\Xi_3 = 0$, $|\mathbf{Q}| = 2\delta$, при котором потери светового потока вследствие наклона отражателя минимальны;
- решение, соответствующее $k_2 = 0$, при котором реализуется оригинальный отражатель с отклонением от 90° только двух углов трехгранного зеркала.

Представленная общая методика синтеза отражателей в виде трехгранных зеркал позволяет выполнить инженерный расчет параметров различных отражателей для трехкоординатных автоколлиматоров с совмещенным матричным полем.

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных по федеральной целевой программе „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинигин Г. И. Телескопы наземной оптической астрометрии: Учеб. пособие. Николаев: Атолл, 2000. 104 с.
2. Артеменко Ю. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные системы измерения деформаций элементов конструкции радиотелескопа миллиметрового диапазона РТ-70 (Суффа) // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 9. С. 5—10.
3. Игнатенко Ю. В., Тряпичин В. Н., Игнатенко И. Ю. Отклонение света от заданного направления в околоземном космическом пространстве [Электронный ресурс]: Науч.-техн. интернет-журнал „Исследовано в России“. 2009. С. 344—353: <<http://zhurnal.apel.relam.ru/articles/2009/034.pdf>>.
4. Бутырин С. А., Иванов А. В. Геометрическая калибровка взаимного углового положения телескопа и астродатчиков // Вестн. Самарского техн. ун-та (технические науки). 2008. Вып. 1(21). С. 181—183.
5. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин, Э. Д. Панков; Под ред. Ю. Г. Якушенкова. М.: Машиностроение, 1987. 480 с.
6. Джабиев А. Н., Коняхин И. А., Панков Э. Д. Автоколлимационные углоизмерительные средства мониторинга деформаций. СПб: СПб ГИТМО(ТУ), 2000. 197 с.
7. Коняхин И. А., Копылова Т. В., Коняхин А. И., Мерсон А. Д. Синтез частных инвариантных преобразований в оптико-электронных системах измерения угла скручивания // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 3(67). С. 12.

Сведения об авторах

- Алексей Игоревич Коняхин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: aligkon@yandex.ru
- Федор Владимирович Молев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем
- Александр Николаевич Тимофеев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

А. С. ВАСИЛЬЕВ, А. В. КРАСНЯЩИХ, О. Ю. ЛАШМАНОВ

АЛГОРИТМЫ ФИЛЬТРАЦИИ ЗАДЫМЛЕННОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ

Рассматриваются вопросы фильтрации задымленного изображения в системе обнаружения и мониторинга лесных пожаров. Приведены результаты сравнительного анализа алгоритмов фильтрации задымленного изображения.

Ключевые слова: *фильтрация изображения, фильтрация дыма, оптико-электронная система, система обнаружения и мониторинга лесных пожаров, телевизионная камера.*

Введение. Лесные пожары не только представляют большую опасность как для населения, так и для экологической обстановки, но и наносят огромный экономический ущерб [1].

Задача раннего обнаружения возгорания является комплексной проблемой и требует соответствующего подхода. Наиболее рациональный подход к ее решению — применение оптико-электронной системы на базе беспилотного летательного аппарата. Оптико-электронная система должна содержать как минимум два оптических канала, работающие в разных спектральных диапазонах. Совместное использование тепловизионных и телевизионных изображений является лучшим решением для обнаружения и мониторинга лесных пожаров, так как дает наиболее полное представление о наблюдаемой местности и характере возгорания. Кроме того, такой подход позволяет разрабатывать эффективную тактику пожаротушения.

Качественное функционирование такой системы обеспечивается при цифровой обработке изображений с использованием прикладных методов нейронных сетей, а также методов адаптивной фильтрации замкнутых и незамкнутых высококонтрастных объектов с последующим обнаружением их контуров. Для правильного сопоставления найденных контуров и относительных координат применяется теория аффинных преобразований, а также математическая модель камеры-обскуры с учетом внешних и внутренних параметров. Для привязки относительных координат к абсолютным географическим координатам используются решения уравнений геоида земной поверхности, основанные на математической модели WGS-72 [2].

При построении подобных систем одной из важных задач является представление визуальной информации в виде понятном и удобном для восприятия оператором и системой обнаружения возгораний. При поиске возгораний беспилотный летательный аппарат зачастую попадает в зону задымления, что приводит к существенному снижению качества изображения, формируемого визуальным каналом. Для устранения дефектов изображения применяются различные методы фильтрации.

Методы фильтрации задымленного изображения. Для решения задач фильтрации задымления на изображении были рассмотрены три метода, базирующиеся на следующих алгоритмах:

- поиск аддитивной фоновой составляющей;
- высокочастотная фильтрация;
- эквализация гистограммы изображения.

Алгоритм на основе поиска аддитивной фоновой составляющей позволяет вычислить среднее значение фоновой составляющей по периметру кадра, при этом считается, что изображение задымлено полностью, а основная информация сосредоточена в центре кадра. В этом случае аддитивная фоновая составляющая описывается следующим образом:

$$\hat{I} = \sum_{i=0}^P I_i / P,$$

где I_i — уровень яркости i -го пиксела изображения, P — количество пикселей по периметру изображения; суммирование осуществляется по периметру изображения.

Затем производится фильтрация исходного изображения в соответствии с выражением

$$I(x_i, y_j) = \begin{cases} I(x_i, y_j) - \hat{I}, & \text{если } I(x_i, y_j) > \hat{I}; \\ 0, & \text{если } I(x_i, y_j) \leq \hat{I}. \end{cases}$$

В результате на выходе фильтра формируется изображение с уменьшенной фоновой составляющей, что соответствует уменьшению его задымленности. Наилучший результат достигается при повторении данной процедуры два-три раза.

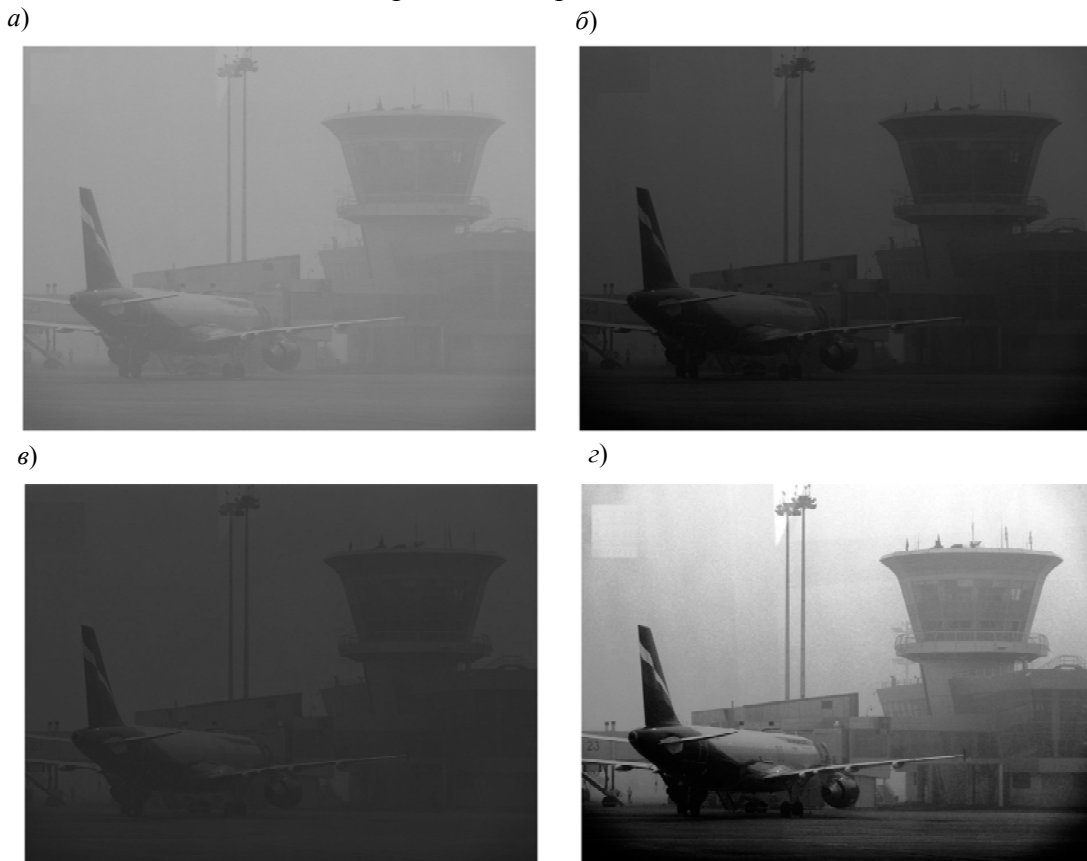
Алгоритм на основе высокочастотной фильтрации направлен на усиление высоких частот в фурье-спектре изображения, что позволяет увеличить его резкость. Для этого изображение переводится в частотную область с помощью прямого двумерного преобразования Фурье, затем поэлементно возводится в степень α , при этом $\alpha = [0 \dots 1]$:

$$F(\omega) = [F_k(\omega)]^\alpha.$$

Полученное новое спектральное распределение подвергается операции обратного двумерного преобразования Фурье [3].

Алгоритм на основе эквализации гистограммы изображения в общем случае подразумевает изменение гистограммы, при котором осуществляется преобразование яркости исходного изображения. Эквализация приводит к растяжению гистограммы входного изображения таким образом, что значения уровней яркости элементов эквализованного изображения перекрывают более широкий диапазон яркостей [4].

Результаты фильтрации задымленного изображения с использованием рассмотренных методов представлены на рисунке, где a — исходное изображение; b — фильтрация на основе поиска аддитивной фоновой составляющей; $в$ — высокочастотная фильтрация; $г$ — фильтрация на основе эквализации гистограммы изображения.



Результаты исследования. Для сравнения методов фильтрации использовалась база цифровых изображений, содержащих задымления. Все изображения были подвергнуты обработке рассмотренными методами. Качество фильтрации оценивалось комплексно на основе сравнения с исходным изображением по следующим параметрам:

- контраст по Микельсону (C);
- эксцесс двумерного спектра Фурье (ε);
- быстродействие (T);
- экспертная оценка (σ).

Величина контраста по Микельсону позволяет оценить степень уменьшения фоновой составляющей задымления изображения. По эксцессу двумерного спектра Фурье оценивается увеличение резкости изображения [5]. Оценка быстродействия алгоритмов производилась на компьютере со следующими техническими характеристиками: ЦПУ Intel Core i5-2400, 3,10 ГГц; ОЗУ 4 Гб.

Для экспертной оценки были привлечены 5 специалистов, которым были предъявлены 5 наборов изображений, сформированных случайным образом. Задача экспертов состояла в оценке степени улучшения качества изображения в процентном соотношении по сравнению с оригиналом. Результаты сравнительного анализа методов фильтрации приведены в таблице.

Метод фильтрации	Параметр			
	C , %	ε , %	T , мкс	σ , %
Поиск аддитивной фоновой составляющей	12—14	13—15	200—300	30—50
Высокочастотная фильтрация	6—8	17—21	400—700	5—10
Эквализация гистограммы изображения	36—40	24—27	200—300	70—80

Заключение. В соответствии с полученными результатами наилучшим был признан метод фильтрации на основе эквализации гистограммы изображения. Этот метод обладает высокими показателями качества изображения как при количественной оценке, так и с субъективной точки зрения экспертов. Таким образом, при решении задач улучшения качества изображений, искаженных задымлениями, целесообразно применение именно этого метода фильтрации.

Статья подготовлена по результатам исследований, выполненных по федеральной целевой программе „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: Состояние, проблемы. М.: ДЭКС-ПРЕСС, 2004. 312 с.
2. Васильев А. С., Краснящих А. В., Кортаев В. В., Лашманов О. Ю., Лысенко Д. Ю., Ненарокомов О. Н., Широков А. С., Ярышев С. Н. Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 12. С. 50—55.
3. Пахомов А. А., Потапов А. А. Методы цифровой обработки малоконтрастных изображений для распознающих систем реального времени // Материалы Междунар. науч. конф. „Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта (ISDMCI' 2009)“, Евпатория, 18—22 мая 2009 г. Херсон: ХНТУ, 2009. Т. 2. С. 395—400.
4. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982.
5. Jain A. K. Fundamentals of Digital Image Processing. NJ, USA: Prentice-Hall, 1989.

Сведения об авторах

Александр Сергеевич Васильев

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: yoshikawa06@gmail.com

- Андрей Владимирович Краснящих** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: crus@mail.ru
- Олег Юрьевич Лашманов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: o.lashmanov@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов
и систем

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

УДК 681.78

А. А. ГОРБАЧЁВ, В. В. КОРОТАЕВ, Е. Н. ПАНТЮШИНА

**ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННАЯ СИСТЕМА
КОНТРОЛЯ ПОЛОЖЕНИЯ ПОРШНЯ В КЛАПАНЕ**

Рассматривается принцип построения оптико-электронной системы, предназначенной для контроля поперечных перемещений поршня в клапане. Представлены результаты испытаний поршня в лабораторных условиях.

Ключевые слова: оптико-электронная система, бесконтактное измерение, анализ изображений, контроль перемещений.

При функционировании подвижных элементов оборудования, например поршня в клапане, золотника в вентиле, поршней цилиндров в двигателе внутреннего сгорания и т. д., часто возникает необходимость проверки их работоспособности. Обычно подвижные элементы располагаются в труднодоступных местах и проконтролировать их работу контактным способом во время движения не представляется возможным. Использование в таких ситуациях оптико-электронных приборов и систем позволяет наблюдать за протекающими процессами в реальном времени, автоматизировать процесс снятия данных, реализовать оперативное и точное измерение линейных перемещений объекта бесконтактным способом и повысить, таким образом, достоверность получаемых результатов.

Бесконтактное измерение поперечных смещений можно реализовать с помощью законов геометрической и физической оптики. Однако использование законов физической оптики нецелесообразно, поскольку при подобных измерениях не требуется высокая (до единиц и десятков длин волн) точность. Кроме того, фиксация смещений интерференционной картины при перемещениях элементов объекта с ускорением, превышающим $0,1 \text{ м/с}^2$, требует использования дорогой высокоскоростной видеокамеры. Для динамической системы относительная погрешность может составлять 1 % от величины перемещений клапана (диапазон перемещений составляет единицы-десятки миллиметров), поэтому для создания таких оптико-электронных систем целесообразно использовать законы геометрической оптики [1].

На кафедре оптико-электронных приборов и систем НИУ ИТМО была разработана оптико-электронная система (ОЭС), принцип работы которой основан на анализе совокупности изображений. Конструктивная схема ОЭС, предназначенной для измерения поперечных линейных смещений поршня в клапане, представлена на рис. 1. Контроль положения поршня 4

в клапане 3 осуществляется в видеоблоке 1 с помощью метки 2, жестко закрепленной на поршне.

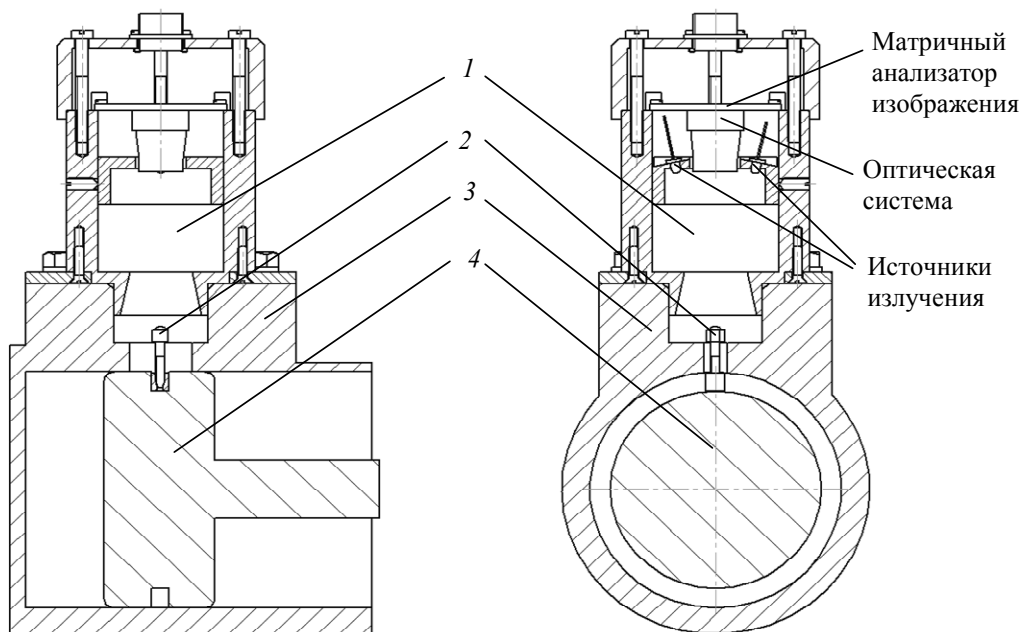


Рис. 1

Возможны два вида меток: активная и пассивная.

Активная метка представляет собой источник излучения — полупроводниковый лазер или диод. Напряжение питания можно подводить как от аккумуляторных батарей, так и по проводам. Ограниченные габаритные размеры метки и использование аккумуляторных батарей приводит к усложнению конструкции крепления самой метки. К тому же время работы источника при питании от аккумуляторных батарей мало по сравнению с общим циклом измерений. С другой стороны, использование проводов усложняет монтирование метки на поршень клапана. Кроме того, в процессе измерений провода могут переломиться, что не позволит зафиксировать положение метки с поршнем.

Перечисленные недостатки активной метки обуславливают целесообразность использования для системы контроля положения поршня в клапане пассивной метки, представляющей собой сферический отражатель [2]. Источники излучения (полупроводниковые излучающие диоды) в этом случае находятся в видеоблоке. Отраженное от метки излучение источника через оптическую систему видеоблока попадает на приемник оптического излучения (ПОИ).

Принцип работы системы заключается в следующем. Контрольная метка 2 (см. рис. 1) освещается источником излучения. Изображение источника формируется на приемнике оптического излучения видеоблока 1 системы, включающего в себя, кроме источников излучения, оптическую систему и матричный анализатор изображения. Кадр с изображением источника передается в блок обработки, в качестве которого могут использоваться схемы с применением микроконтроллеров или программируемых логических интегральных схем, а также персональный компьютер. По двум соседним кадрам программа вычисляет смещение, скорость и ускорение поршня 4, который перемещается внутри клапана 3, и передает информацию на видеоконтрольное устройство. Блок питания вырабатывает необходимое напряжение для работы системы.

При выборе матричного анализатора изображения предпочтение было отдано ПОИ на КМОП-структуре [3], поскольку в таких КМОП-матрицах схемы управления могут реализовывать произвольную координатную выборку сигналов, что значительно расширяет возможности фильтрации и обработки (в том числе, параллельной) сигналов изображения. Помимо схемы управления, фоточувствительные КМОП-приемники содержат матрицу активных фо-

точувствительных элементов (активных пикселей), аналоговые усилители считывания, аналого-цифровой преобразователь и ряд других цифровых блоков. Задачи выделения произвольной области на фоточувствительной поверхности ПОИ, на которой формируется изображение метки, и слежения за ним решаются путем считывания сигналов только с элементов выделяемой области. А поскольку обычно произвольная область занимает небольшую часть кадра, скорость считывания, по сравнению с ФПЗС, в которых необходимо считывать весь кадр, может быть значительно увеличена.

Были проведены экспериментальные исследования разработанной ОЭС на клапане управления потоком рабочей среды. Результаты анализа поведения поршня в клапане — смещение l , скорость v и ускорение a — приведены на рис. 2, a — $в$. Смещение поршня происходило под давлением 2,5 МПа.

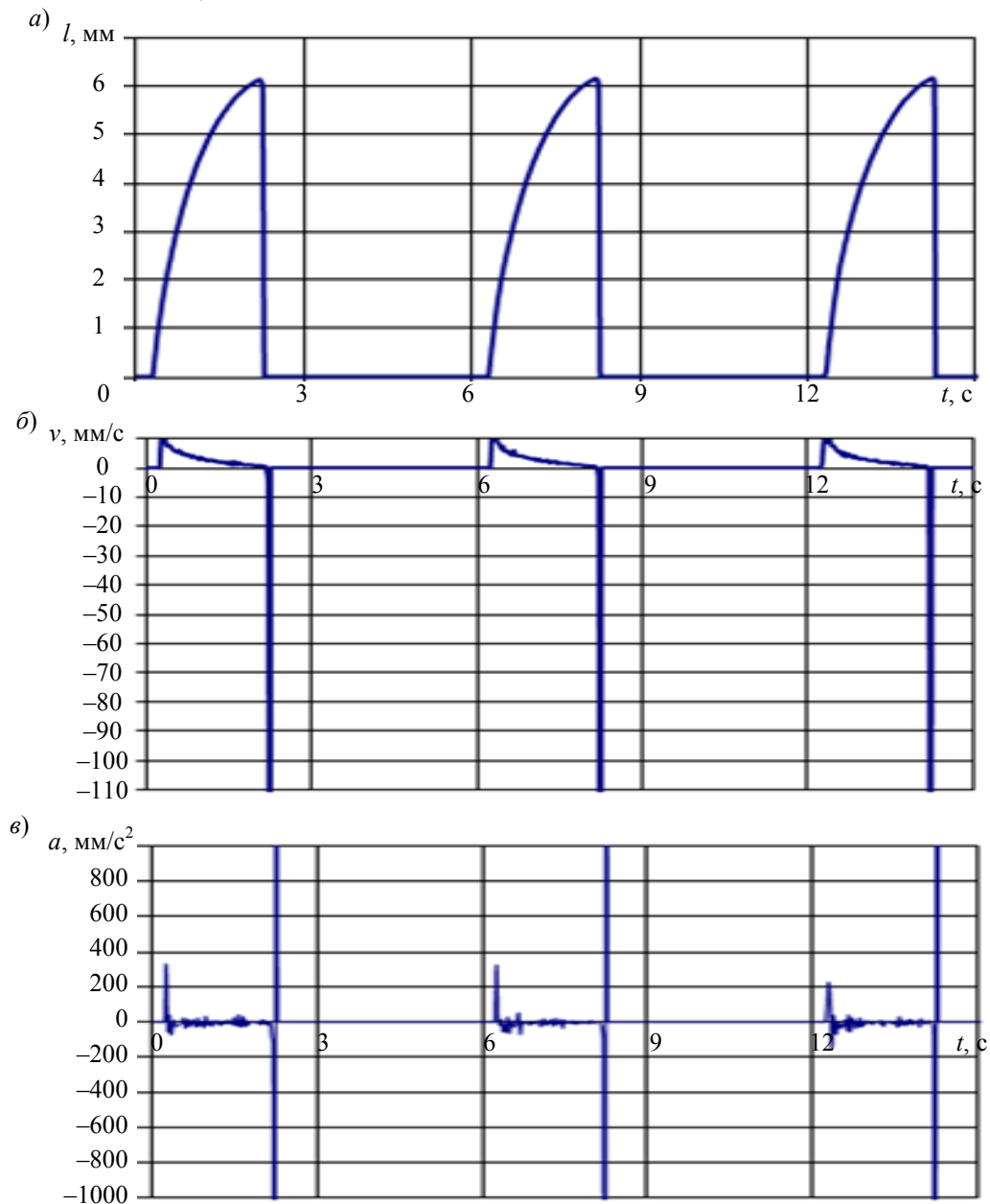


Рис. 2

График смещения поршня в клапане (рис. 2, a) показывает относительно медленное перемещение поршня при подаче воздуха и его быстрое смещение при его откачке. Тарельчатые пружины (на рис. 1 не показаны), находящиеся внутри клапана, препятствуют перемещению поршня, когда подается давление, и способствуют его ускоренному перемещению при

откачке воздуха. Анализ графиков скорости и ускорения поршня (рис. 2, б, в соответственно) показывает, что эти динамические параметры при подаче воздуха в десятки раз меньше, чем при его откачке. Такие изменения динамических параметров поршня приводят к удлинению его штока, что в результате, после значительного количества циклов, приводит к разрыву штока и выходу клапана из строя.

Таким образом, при эксплуатации клапанов следует учитывать режим их функционирования, а также количество циклов работы поршня, составляющее в среднем 5000.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В. А., Усов В. С.* Оптические приборы и методы контроля прямолинейности в инженерной геодезии. М.: Недра, 1973. 152 с.
2. *Горбачёв А. А., Кулешова Е. Н.* Исследование влияния формы сферического отражателя на точность измерения перемещений поршня в цилиндре клапана // Науч.-техн. вестник СПбГУ ИТМО. 2010. № 6 (70). С. 12—16.
3. *Стемковский А., Шилин В.* КМОП-фотодиодные СБИС. Перспективная элементная база однокристалльных систем приема и обработки информации // Электроника: НТБ. 2003. № 2. С. 14.

Сведения об авторах

Алексей Александрович Горбачёв

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: gorbachev@grv.ifmo.ru

Валерий Викторович Коротаяев

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий кафедрой; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru

Екатерина Николаевна Пантюшина

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: enkuleshova@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

А. Л. АНДРЕЕВ, А. П. ВАРАТКОВА

ЭФФЕКТИВНОСТЬ АЛГОРИТМОВ ФОРМИРОВАНИЯ И ОБРАБОТКИ МЕЖКАДРОВОГО РАЗНОСТНОГО СИГНАЛА ПРИ ОБНАРУЖЕНИИ ОБЪЕКТОВ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ НАБЛЮДЕНИЯ

Исследуется алгоритм, сочетающий процедуры межкадровой и внутрикадровой обработки сигналов в автоматизированных системах наблюдения за подвижными объектами в сложной фоновой обстановке. Приводятся результаты статистического моделирования, подтверждающие эффективность рассматриваемого алгоритма.

Ключевые слова: межкадровый разностный сигнал, пространственная фильтрация, накопление сигнала, площадь области изменений, виртуальная модель, характеристики обнаружения, оптимизация параметров.

Алгоритм, сочетающий процедуры межкадровой и внутрикадровой обработки сигналов, может использоваться в автоматизированных системах наблюдения (АСН) за подвижными объектами [1]. В сложной фоновой обстановке, когда малоконтрастные подвижные объекты наблюдаются на фоне значительно более контрастных предметов или перепадов яркости в поле зрения АСН, процесс обнаружения подвижных объектов распадается на два этапа:

1) формирование межкадрового разностного сигнала (МРС), в котором сосредоточена вся информация об изменениях, происходящих в изображении, и в то же время отсутствуют (или значительно подавлены) мешающие перепады уровня сигнала, соответствующие находящимся в кадре неподвижным объектам и деталям фона;

2) принятие решения о наличии или отсутствии объектов в зоне наблюдения на основе анализа небольшого сегмента изображения в окрестности каждой „подозрительной“ точки, в которой МРС по абсолютной величине превышает установленный порог $U_{\text{п}}$.

На рис. 1 представлены фрагмент исходного изображения зоны наблюдения (а); изображение, иллюстрирующее формирование межкадрового разностного сигнала (б); соответствующие этим изображениям осциллограммы выделенной строки (в и г).

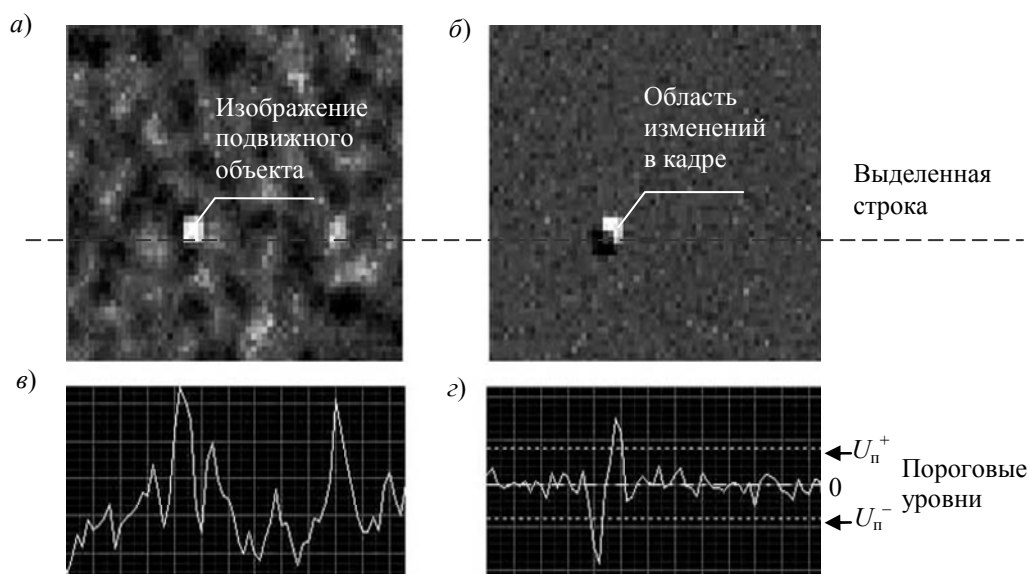


Рис. 1

При проектировании АСН, решающих задачи обнаружения объектов, целесообразно использовать понятие отношения сигнал/шум:

$$\mu = U_{c \max} / U_{\sigma \text{ ш}},$$

где $U_{c \max}$ — максимальное (пиковое) значение напряжения полезного сигнала в электронном тракте АСН; $U_{\sigma \text{ ш}}$ — среднеквадратическое значение шумового напряжения, обусловленного влиянием всех составляющих шумов, действующих в АСН, включая внутренние шумы фотоприемного устройства (ФПУ) и шумы, обусловленные квантовой природой поглощения оптического излучения.

Однако следует иметь в виду, что реальное отношение сигнал/шум в межкадровом разностном сигнале ($\mu_{p.c}$) всегда меньше отношения сигнал/шум μ в исходных сигналах сравниваемых кадров.

Введем следующие обозначения:

v — скорость перемещения объекта в плоскости изображения;

d — пространственный период элементов ФПУ;

T_n — время накопления сигнала в ФПУ (КМОП, ФПЗС и др.);

T_k — период смены кадров;

$\Delta T_k = nT_k$ — интервал времени между сравниваемыми кадрами, где $n = 1, 2, 3 \dots$ — целые числа натурального ряда.

Рассмотрим вначале случай *относительно медленных перемещений*, когда за время накопления сигнала изображение подвижного объекта успевает переместиться на расстояние, значительно меньшее одного пространственного периода элементов: $T_n v \ll d$. Чтобы обнаружить заметные изменения в кадре, связанные с перемещением наблюдаемого объекта, необходимо выполнение условия $n \gg 1$ (т.е. $\Delta T_k \gg T_k$). В этом случае шумовые составляющие в каждом из сравниваемых кадров можно рассматривать как случайные между собой не коррелированные процессы. При этом отношение сигнал/шум в разностном сигнале примерно в $\sqrt{2}$ раз меньше отношения сигнал/шум в сравниваемых кадрах: $\mu_{p.c} \approx \mu / \sqrt{2}$.

В случае *быстрых перемещений* изображения наблюдаемого объекта ($T_n v \gg d$) фактическое время накопления T'_n , определяющее величину сигнала подвижного объекта, уменьшается пропорционально скорости: $T'_n = d/v$. Тогда величину $T_n / T'_n = T_n v / d$ можно рассматривать как коэффициент уменьшения отношения сигнал/шум при быстрых перемещениях объекта. Таким образом, фактическое значение $\mu_{p.c}$ при быстрых перемещениях можно оценивать по приближенной формуле:

$$\mu_{p.c} \approx \mu / (\sqrt{2} \cdot T_n v / d). \quad (1)$$

Перечисленные факторы необходимо учитывать при определении оптимальной величины решающего порога, с которой сравнивается абсолютное значение МРС.

Обычно изменения, происходящие в кадре в результате перемещения находящихся в поле зрения АСН объектов, занимают площадь как минимум несколько раз большую, чем площадь одного элемента изображения. Поэтому на этапе обработки МРС представляется возможным использовать алгоритм *накопления сигналов по площади области изменений*, позволяющий значительно повысить чувствительность АСН к обнаружению малоконтрастных подвижных объектов при наличии значительных шумов во входном сигнале [1].

Площадь кадра разбивается на большое число дискретных участков, каждый из которых анализируется отдельно и является элементарной зоной накопления. Зона накопления представляет собой прямоугольный участок кадра, состоящий из $m \times n$ элементов. Размеры дискретной области накопления нужно выбирать с таким расчетом, чтобы при любых изменениях в кадре, вызванных перемещением объектов, хотя бы одна из дискретных областей была полностью расположена в области изменений.

Обозначим через $P_{л.т}(k)$ вероятность ложного обнаружения сигнала об изменениях в k -й зоне накопления. Тогда вероятность ложной тревоги при анализе сигнала целого кадра можно записать в следующем виде:

$$P_{л.т}(T_k) = 1 - \prod_{k=1}^Q [1 - P_{л.т}(k)], \quad (2)$$

где Q — число зон накопления в кадре, равное отношению полного числа элементов изображения ($M \times N$) к числу элементов в зоне накопления:

$$Q = (M \times N) / (m \times n).$$

Учитывая, что ложные обнаружения в любой из зон равновероятны, выражение (2) можно записать иначе:

$$P_{л.т}(T_k) = 1 - [1 - P_{л.т}(k)]^Q. \quad (3)$$

Решение об обнаружении подвижного объекта в k -й зоне накопления принимается в случае, если число элементов изображения (в пределах данной зоны накопления), в которых напряжение межкадрового разностного сигнала ($U_{МРС}$) по абсолютной величине превышает значение заданного порога, больше или равно p при общем числе $q = m \times n$ элементов ($p \leq q$). Иначе говоря, выполняется условие $|U_{МРС}| \geq U_p$ при числе элементов k -й зоны накопления не меньшем чем p . При этом вероятность ложной тревоги в k -й зоне накопления можно вычислить по формуле

$$P_{л.т}(k) = \sum_{l=p}^q C_q^l [P_{р.в}]^l [1 - P_{р.в}]^{q-l},$$

где $P_{р.в}$ — вероятность регистрации выброса шума за установленный порог ограничения; C_q^l — число сочетаний из q по l .

Вероятность ошибки второго рода — пропуска объекта — при использовании рассмотренного алгоритма накопления определяется как

$$P_{пр}^H = 1 - P_{прав} = \sum_{l=q-p+1}^q C_q^l [P_{пр}]^l [1 - P_{пр}]^{q-l},$$

где $P_{пр}$ — условная вероятность пропуска сигнала в одном из элементов зоны накопления; $P_{прав}$ — вероятность правильного обнаружения при отсутствии алгоритма накопления.

При наличии априорной информации о возможных размерах, диапазоне скоростей, относительном контрасте и других параметрах объектов наблюдения можно оптимизировать параметры алгоритма обнаружения и, следовательно, работу АСН в целом.

Однако, учитывая достаточно сложный характер взаимосвязей множества факторов и физических процессов, протекающих в различных звеньях оптико-электронного тракта АСН, наиболее эффективным методом решения подобной задачи представляется использование виртуальной компьютерной модели АСН, позволяющей реализовать метод статистических испытаний исследуемого алгоритма (метод Монте-Карло). Приведем некоторые результаты, полученные с помощью модели, общие принципы реализации которой рассмотрены, например, в работе [2].

В модели АСН в качестве скользящей зоны пространственного анализа в окрестности „подозрительной“ точки рассматривался сегмент размером 3×3 элемента изображения (т.е. $q = 9$). Решение о наличии объекта в зоне анализа принималось в случае, когда не менее чем в p элементах этого сегмента МРС по абсолютной величине превышал установленный пороговый уровень ($p \leq 9$).

На рис. 2 показаны зависимости относительного числа ложных обнаружений (ложных тревог) $N_{л.т.}^*$ (сплошные линии) и относительного числа пропусков объекта $N_{пр.}^*$ (пунктирные линии) от величины относительного порога $U_{п.}/U_{\sigma ш}$ при различных значениях параметра p . Каждое значение получено при статистической обработке не менее 350 реализаций для фрагмента изображения зоны наблюдения размером 64×64 элемента.

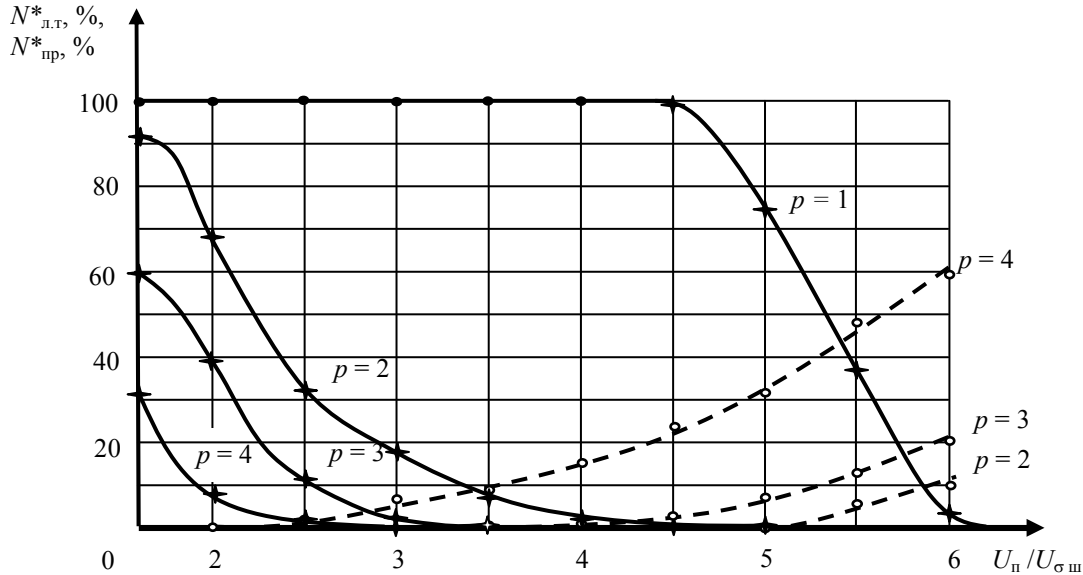


Рис. 2

Результаты, приведенные на рис. 2, получены при моделировании достаточно сложных условий наблюдения объекта размером 4×4 элемента в плоскости анализа изображения. Относительная величина электрического сигнала подвижного объекта в исходном видеосигнале составляла в среднем 0,7 от величины сигнала, соответствующего неравномерности фоновой составляющей (см. рис. 1, а, в). Интервал пространственной корреляции фоновой помехи задавался равным 8 элементам изображения. Относительная скорость перемещения изображения объекта (по диагонали вверх и направо) составляла $1,5d$ за время ΔT_k . При этом с учетом фотонной составляющей шумов и уровня внутреннего шума ФПУ эффективное значение отношения сигнал/шум в исходном видеосигнале $\mu \approx 3,7$. Тем не менее, например, при сочетании значений $U_{п.}/U_{\sigma ш} = 5$, $p = 2$ (или $U_{п.}/U_{\sigma ш} = 3,5$, $p = 3$) практически не было зарегистрировано ошибок обнаружения типа „ложной тревоги“ или пропуска объекта. Это говорит о достаточно высокой эффективности рассматриваемых алгоритмов, сочетающих процедуры межкадровой и внутрикадровой обработки сигналов при обнаружении малоразмерных и мало-контрастных подвижных объектов на неоднородном фоне в зоне наблюдения.

Очевидно, что результаты моделирования, полученные для фрагмента изображения зоны наблюдения размером 64×64 элемента, могут быть экстраполированы на больший формат изображения. В частности, вероятность ошибки первого рода (ложное обнаружение объекта) при анализе полного кадра изображения зоны наблюдения может быть оценена с помощью приближенного выражения, аналогичного формуле (3):

$$P_{л.т.}(T_k) = 1 - \left[1 - P_{л.т.}(64 \times 64) \right]^K,$$

где K — число фрагментов, содержащихся в полном кадре изображения размером $M \times N$ элементов, $K = (M \times N) / (4096)$; $P_{л.т.}(64 \times 64)$ — оценка вероятности ложной тревоги, полученная в результате моделирования фрагмента такого изображения.

На рис. 3 в качестве примера приведены зависимости вероятности правильного обнаружения от величины среднего контраста η изображения подвижного объекта размером 4×4 элемента при различных скоростях V^* его перемещения (по диагонали вверх и направо).

Заметим, что реальное значение оптического контраста изображения меняется в зависимости от текущего положения объекта на различных участках неоднородного фона. При этом, естественно, меняется и отношение сигнал/шум. Так, например, при среднем значении $\eta=6$ отношение сигнал/шум изменялось в пределах от 1,2 до 6,1 (с учетом заданных условий эксперимента, предопределяющих суммарный уровень шумов в исходном видеосигнале).

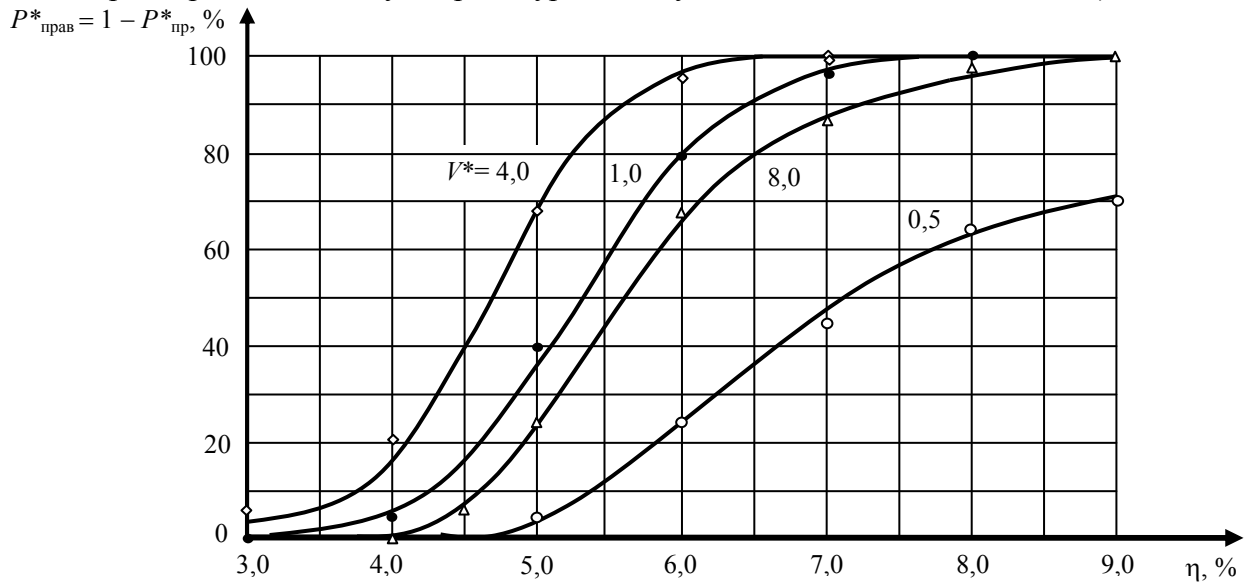


Рис. 3

Численное значение скорости V^* перемещения объекта (в плоскости анализа изображения) оценивалось числом пространственных периодов, соответствующим перемещению изображения объекта за время ΔT_k . Каждая точка, показанная на графиках, получена в результате статистической обработки 350 реализаций. При этом задавались параметры ($U_{\text{п}}/U_{\text{шш}} = 3,5$, $p = 3$), при которых в рамках проводимого эксперимента не наблюдалось появление ошибок типа „ложной тревоги“ (см. рис. 2).

Снижение обнаружительной способности АСН при относительно малых скоростях перемещения объекта ($V^* < 4$) связано с уменьшением размеров области изменений в кадре, в пределах которой возможно использование эффекта пространственного накопления сигнала в соответствии с решающим правилом „ p из q “. Существенное улучшение характеристик обнаружения при малых скоростях перемещения ($V^* < 1$) возможно путем увеличения интервала времени между сравниваемыми кадрами: $\Delta T_k = nT_k$ при $n > 1$. При сравнительно большой скорости ($V^* = 8$) снижение обнаружительной способности АСН наблюдается ввиду заметного уменьшения реального времени накопления сигнала подвижного объекта в элементах фотоприемника и, как следствие, уменьшения реального отношения сигнал/шум в разностном сигнале (см. формулу (1)).

Приведенные примеры отражают результаты, полученные для определенных частных условий наблюдения за объектами. Однако по этим результатам можно сделать вывод, что рассмотренный алгоритм формирования и обработки межкадрового разностного сигнала позволяет при интенсивном уровне помех добиться надежного обнаружения подвижных объектов, средний оптический контраст которых составляет единицы процентов относительно элементов окружающего фона с размерами, соизмеримыми с размерами объекта.

Использование виртуальной компьютерной модели позволяет на ранних стадиях проектирования АСН решать задачи оптимизации параметров используемого алгоритма и обоснования требований к отдельным звеньям аппаратной структуры АСН, а также прогнозировать поведение проектируемой системы в заданных условиях наблюдения за объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев А. Л., Бурдова Н. А., Коротяев В. В. Алгоритм пространственной временной селекции сигналов в адаптивных системах наблюдения за подвижными объектами // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 4 (74).
2. Андреев А. Л., Тоткайло С. В. Комплексная модель оптико-электронной системы наблюдения за точечными объектами // Сб. тр. VII Междунар. конф. „Прикладная оптика—2006“. Т. 1. Оптическое приборостроение. СПб: СПбГУ ИТМО, 2006.

Сведения об авторах

- Андрей Леонидович Андреев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: and-andr@yandex.ru
- Александра Павловна Вараткова** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем;
E-mail: varatkova@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

В. А. ЗВЕРЕВ, Г. В. КАРПОВА, И. Н. ТИМОЩУК

ТЕЛЕОБЪЕКТИВ С АФОКАЛЬНОЙ ДВУХЗЕРКАЛЬНОЙ НАСАДКОЙ

Показано, что замена выпуклой отражающей поверхности в афокальной системе из двух сферических зеркал плосковыпуклым зеркалом с внутренним отражением позволяет при малой остаточной величине отступления от условия изопланатизма успешно компенсировать остаточную сферическую aberrацию изображения. Дополнение афокальной насадки двухкомпонентным телеобъективом позволяет достичь плананастигматической коррекции aberrаций изображения.

Ключевые слова: отражающая поверхность, афокальная насадка, условия изопланатизма, сферическая aberrация.

Фокусное расстояние оптической системы, состоящей из афокальной насадки и объектива, в параксиальной области определяется формулой $f' = \frac{h_1}{\alpha'} = \frac{h_1}{h_2} \frac{h_2}{\alpha'} = \Gamma f'_0$, где f'_0 — фокусное расстояние объектива; $\Gamma = h_1/h_2$ — угловое увеличение изображения, образованного афокальной системой. При этом длина системы определяется как $L_{0a.c} = d + f'_0$, где d — расстояние между компонентами системы. В этом случае коэффициент уменьшения длины равен $Q_{0a.c} = \Gamma / (1 + d / f'_0)$. Отсюда следует, что чем больше Γ , тем больше $Q_{0a.c}$.

В работе [1] для компенсации сферической aberrации изображения, образованного сферической отражающей поверхностью, рассмотрена возможность применения плоскопараллельной пластинки, расположенной в сходящемся пучке лучей. Показано, что при этом может быть достигнута весьма совершенная стигматическая коррекция aberrаций: волновая сферическая aberrация изображения бесконечно удаленной точки, образованного сферической отражающей поверхностью при относительном отверстии 1:1,5 и радиусе кривизны, равном 500 мм, в пределах всего зрачка не превышает 0,25 длины волны.

Продольная сферическая aberrация изображения точки, образованного оптической системой, состоящей из сферической и плоской отражающих поверхностей, определяется формулой

$$\Delta s'_{сф} = \frac{1}{2} \left(\sqrt{2} / \sqrt{1 + \cos \sigma'} - 1 \right) r, \quad (1)$$

где σ' — задний апертурный угол, r — радиус кривизны образованной поверхности.

Сферическая aberrация изображения точки, образованного плоскопараллельной пластинкой толщиной $d_{пл}$, определяется формулой

$$\Delta s'_{пл} = \frac{d_{пл}}{n} \left(1 - n \cos \sigma' / \sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma'} \right).$$

Суммарная сферическая aberrация изображения, образованного системой отражающих поверхностей с плоскопараллельной пластинкой в сходящемся пучке лучей, равна $\Delta s' = \Delta s'_{\text{сф}} + \Delta s'_{\text{пл}}$. Положив $\Delta s' = 0$, получим

$$d_{\text{пл}} = \frac{1}{2} \frac{1 - \sqrt{2}/\sqrt{1 + \cos \sigma'}}{1 - n \cos \sigma' / \sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma'}} nr. \quad (2)$$

Толщина пластинки из стекла марки ТК8 ($n_e = 1,61675$) при $\sigma' = 30^\circ$ равна $d_{\text{пл}} = -0,32r$. Таким образом, для компенсации сферической aberrации изображения, образованного отражающей поверхностью сферической формы, необходима плоскопараллельная пластинка достаточно большой толщины.

Рассмотрим aberrационные свойства изображения, образованного афокальной системой из двух отражающих поверхностей сферической формы с плоскопараллельной пластинкой, расположенной в пространстве между поверхностями (рис. 1).

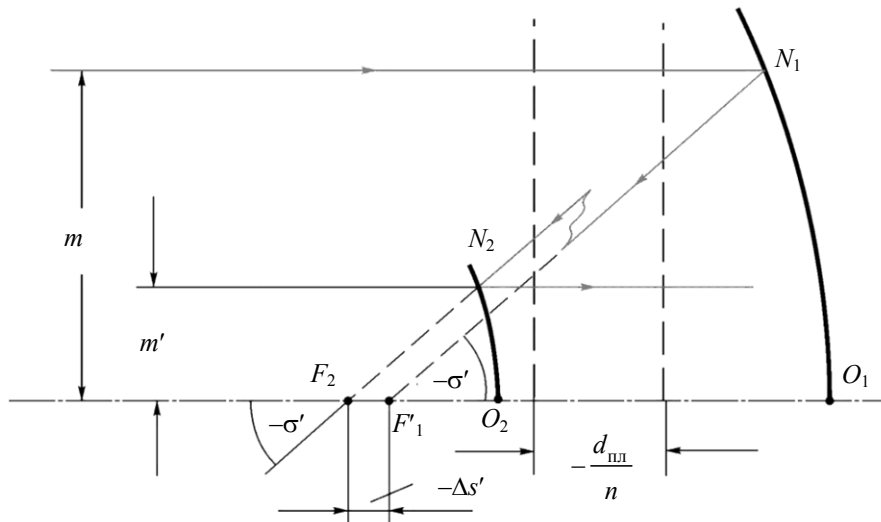


Рис. 1

Сферическая aberrация изображения, образованного сферической отражающей поверхностью, в соответствии с формулой (1) при некотором значении угла σ' прямо пропорциональна радиусу кривизны r . Совместим задний фокус вогнутой отражающей поверхности с передним фокусом выпуклой отражающей поверхности, образовав, таким образом, афокальную оптическую систему. Пусть на первую поверхность в точку N_1 на высоте m падает луч, параллельный оптической оси. После отражения от поверхности луч пересекает оптическую ось под углом $-\sigma'$ в точке F_1' , образуя продольную сферическую aberrацию изображения точки, равную $F_0'F_1' = \Delta s_1'$. Пусть луч, падающий на вторую поверхность в точку N_2 под тем же углом $-\sigma'$ к оптической оси, пересекая ее в точке F_2 при $F_0'F_2 = F_0'F_1' = \Delta s_2'$, отражается от поверхности на высоте m' параллельно оптической оси, как показано на рис. 1. При этом расстояние между падающим на вторую поверхность и отраженным от первой поверхности лучами в направлении оптической оси равно $\Delta s' = \Delta s_1' + \Delta s_2' = \Delta s_1' - \Delta s_2'$. Для компенсации этого смещения лучей толщина плоскопараллельной пластинки должна определяться согласно формуле (2) следующим образом:

$$d_{\text{пл}} = \frac{1}{2} \frac{1 - \sqrt{2}/\sqrt{1 + \cos \sigma'}}{1 - n \cos \sigma' / \sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma'}} n(r_1 - r_2). \quad (3)$$

При $\Delta s' = 0$ координата $m = r_1 \sin \gamma = r_1 \sin \frac{1}{2} \sigma'$, а координата $m' = r_2 \sin \gamma = r_2 \sin \frac{1}{2} \sigma'$, где γ — угол между нормалью к поверхности и оптической осью. При этом угловое увеличение изображения, образованного рассматриваемой афокальной оптической системой, равно $\Gamma = m / m' = r_1 / r_2$, т.е. не зависит от угла σ' , а соответственно от координат m и m' . Следовательно, если компенсировать остаточную сферическую aberrацию, то изображение, образованное рассматриваемой оптической системой, будет обладать апланатической коррекцией aberrаций. Представим формулу (3) в виде

$$d_{\text{пл}} = \psi r_1 \left(1 - \frac{r_2}{r_1} \right), \quad \psi = \frac{n}{2} \frac{1 - \sqrt{2} / \sqrt{1 + \cos \sigma'}}{1 - n \cos \sigma' / \sqrt{n^2 - \sin^2 \sigma'}}.$$

Но $\frac{r_2}{r_1} = \frac{m'}{m} = k_3$, где k_3 — коэффициент центрального экранирования зрачка по диаметру. При этом $d_{\text{пл}} = d(1 - k_3)$, где величина $d_{\text{пл}}$ определяется формулой (2) при $r = r_1$. Отсюда следует, что чем больше коэффициент центрального экранирования, тем меньше требуемая толщина пластинки, а чем меньше толщина пластинки, тем меньше масса объектива. Однако при этом уменьшается значение Γ , а следовательно, утрачивается практический смысл применения афокальной насадки.

Толщина пластинки может быть сколь угодно малой, если вторую поверхность пластинки заменить выпуклой поверхностью сферической формы внутреннего отражения (рис. 2).

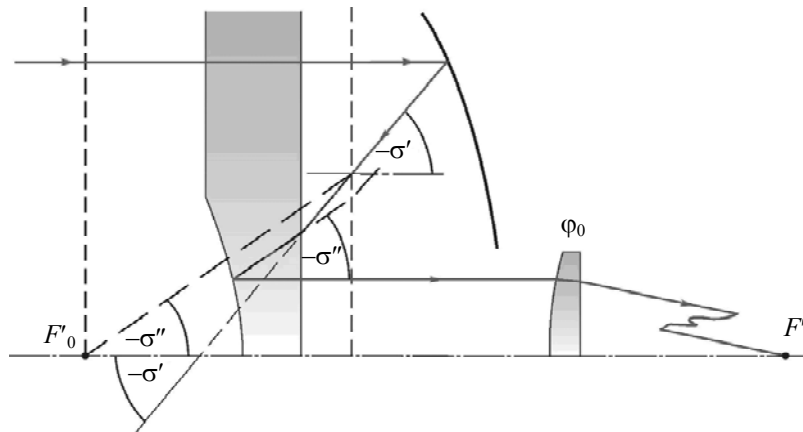


Рис. 2

Для aberrационного анализа афокальной системы телеобъектива запишем ее с помощью углов осевого виртуального луча в следующем виде:

$\alpha_1 = 0$		$n_1 = 1$
$\alpha_2 = \alpha$	$d_1 =$	$n_2 = -1$
$\alpha_3 = \alpha/n$	$d_2 = d$	$n_3 = -n$
$\alpha_4 = 0$	$d_3 = -d_2$	$n_4 = n$
$\alpha_5 = 0$		$n_5 = 1$

Коэффициенты сферической aberrации, комы, астигматизма третьего порядка и пеццалевой кривизны поверхности изображения можно определить выражениями вида [2, 3]

$$S_{\text{I}}^* = S_{\text{I}} = B_0; \quad S_{\text{II}}^* = \frac{1}{J} S_{\text{II}} = K_0 + qB_0;$$

$$S_{\text{III}}^* = \frac{1}{J^2} S_{\text{III}} = C_0 + 2qK_0 + q^2 B_0; \quad S_{\text{IV}}^* = S_{\text{IV}} = D_0,$$

где

$$B_0 = \sum_{i=1}^{\mu} h_i P_i; \quad K_0 = -\sum_{i=1}^{\mu} W_i + \sum_{i=1}^{\mu} h_i S_i P_i;$$

$$C_0 = \sum_{i=1}^{\mu} \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_i} - 2 \sum_{i=1}^{\mu} S_i W_i + \sum_{i=1}^{\mu} h_i S_i^2 P_i; \quad D_0 = \sum_{i=1}^{\mu} \frac{v_i \alpha_{i+1} - v_{i+1} \alpha_i}{h_i};$$

$$W_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} (v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i); \quad P_i = \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{v_{i+1} - v_i} W_i; \quad S_i = \sum_{k=2}^i \frac{d_{k-1}}{n_k h_k h_{k-1}}; \quad v_i = \frac{1}{n_i},$$

а величина q определяется положением зрчка и предмета: $q = \frac{v_1}{h_1^2 (1/s_1 - 1/s_{p1})}$. При $v_1 = 1$

и $s_1 = \infty$ величина $q = -s_{p1}$, где s_{p1} — расстояние от первой поверхности системы до входного зрчка.

Пусть $h_1 = 1$, тогда $h_2 = 1 - \alpha d_1$, $h_3 = 1 - \alpha d_1 - \alpha d_2 / n$, но $h_3 = k_3$. При этом $d_1 = (1 - k_3) / \alpha - v d_2$, тогда $h_2 = k_3 + v \alpha d_2$. При этих значениях величин коэффициент сферической абберации третьего порядка определяется формулой

$$B_0 = \left[v(1 - v^2) d_2 \alpha - (1 - 4k_3 + 3v^2 k_3) / 4 \right] \alpha^3.$$

Положив $B_0 = 0$, получим формулу, определяющую толщину пластинки:

$$d_2 = \frac{1 - 4k_3 + 3v^2 k_3}{4v(1 - v^2)\alpha}. \quad (4)$$

Отсюда следует, что $d_2 \leq 0$ при $1 - 4k_3 + 3v^2 k_3 \geq 0$. Этому условию удовлетворяют значения коэффициента $k_3 \leq \frac{1}{v^2 + 4(1 - v^2)}$. Таким образом, при $n = 1, 5 \dots 2, 0$ коэффициент $k_3 \leq 0,375 \dots 0,308$.

При толщине d_2 зеркально-линзового компонента, определяемой выражением (4), расстояние $d_1 = \frac{3 - 4v^2 + v^2 k_3}{4(1 - v^2)\alpha}$, а высота $h_2 = \frac{1 - v^2 k_3}{4(1 - v^2)}$. Тогда, учитывая эти соотношения и выражение (4), находим коэффициенты S_i :

$$S_1 = 0, \quad S_2 = -\frac{d_1}{h_2} = -\frac{3 - 4v^2 + v^2 k_3}{(1 - v^2 k_3)\alpha}, \quad S_3 = -\frac{1 - k_3}{k_3 \alpha}.$$

При этом коэффициент комы третьего порядка определяется выражением $K_0 = -(1 - v^2)\alpha^2 / 4$.

Дополним рассматриваемую афокальную систему тонким компонентом φ_0 (см. рис. 2), образовав оптическую систему телеобъектива. Будем считать, что в изображении, образованном афокальной системой и тонким компонентом, сферическая абберация отсутствует. При этом параметр P_K тонкого компонента равен нулю. Вполне очевидно, что при апланатической коррекции аббераций изображения, образованного оптической системой телеобъектива в целом, значение параметра W_K тонкого компонента должно удовлетворять условию $W_K = -(1 - v^2)\alpha^2 / 4$.

Для тонкого компонента в составе телеобъектива имеем: $\alpha_k = \alpha_5 = 0$, $\alpha'_k = 1$. Тогда при $h_1 = 1$ высота $h_k = h_4 = h_3 = k_3$. При этом

$$S_1 = 0; \quad S_2 = -\frac{d_1}{h_2} = -\frac{3 - 4v^2 + v^2 k_3}{(1 - v^2 k_3) \alpha}; \quad S_3 = S_2 - \frac{v d_2}{h_2 k_3} = -\frac{1 - k_3}{k_3 \alpha};$$

$$S_4 = \frac{1}{\alpha} - \frac{1 - v^2 k_3}{4(1 - v^2) k_3^2 \alpha}; \quad S_5 = S_4 + d_4 / (h_4 h_5 n_5).$$

Принимаем $d_4 = -d_1$. Учитывая, что $h_4 = h_5 = h_3 = k_3$, получаем $S_5 = (k_3^2 - 1)/(k_3^2 \alpha)$. Полученные соотношения позволяют выражение, определяющее коэффициент астигматизма изображения третьего порядка, представить в виде $C_0 = \frac{k_3^2 + v^2 k_3 - 2(1 - v^2)}{4k_3^2} \alpha + \frac{1}{k_3}$. Отсюда

следует, что при $C_0 = 0$ угол α определяется выражением $\alpha = \frac{4n^2 k_3}{2(n^2 - 1) - k_3(n^2 k_3 - 1)}$. Тогда

при $0 \leq k_3 \leq 1$ угол α принимает значения в интервале $0 \leq \alpha \leq 4n^2 / (n^2 - 1)$, т.е. $\alpha \geq 0$. В рассматриваемой оптической системе насадки угол $\alpha < 0$. Таким образом, при независимой коррекции сферической aberrации изображения, образованного афокальной насадкой и тонким компонентом, устранить астигматизм изображения невозможно.

Пусть толщина пластинки в соответствии с формулой (4) определяется как $d_2 = \frac{1 - 4k_3 + 3v^2 k_3 + \delta}{4v(1 - v^2)\alpha}$, где добавленная величина $\frac{\delta}{4v(1 - v^2)\alpha}$ характеризует изменение тол-

щины пластинки, нарушающее стигматичность изображения, образованного афокальной насадкой. При этом для апланатической коррекции aberrаций изображения, образованного телеобъективом, параметры тонкого компонента должны удовлетворять следующим условиям:

$P_k = \frac{\delta}{4k_3} \alpha^3$, $W_k = -\frac{1 - v^2}{4} \alpha^2 + \frac{\delta}{4k_3^2} \alpha^3$. В этом случае при $C_0 = 0$ угол α определяется выра-

жением $\alpha = \frac{4k_3^3}{[2(1 - v^2) - v^2 k_3 + k_3^2] k_3^2 - \delta}$ и в рассматриваемой оптической системе насадки

$\alpha < 0$. Для достижения этого величина δ должна быть положительной, что соответствует увеличению толщины пластинки.

Для коррекции кривизны поверхности изображения и астигматизма в качестве дополнительной следует использовать более сложную систему, например телеобъектив, состоящий из двух тонких компонентов ϕ_1 и ϕ_2 . Схема такого объектива показана на рис. 3

В этом случае коэффициент D_0 определяется выражением

$$D_0 = \frac{\alpha(k_3 n^2 - 1)}{k_3 n^2} + \frac{1 - \phi_1^2 k_3 d}{n k_3 (1 - \phi_1 d)}.$$

Из этого выражения находим, что при $D_0 = 0$ расстояние между компонентами телеобъектива, при котором кривизна поверхности изображения, образованного рассматриваемой системой в целом, равно

$$d = \frac{1}{\varphi_1} \frac{n + \alpha(k_3 n^2 - 1)}{\alpha(k_3 n^2 - 1) + k_3 n \varphi_1}. \quad (5)$$

Применение дополнительной системы в виде телеобъектива позволяет компенсировать и остаточный астигматизм изображения.

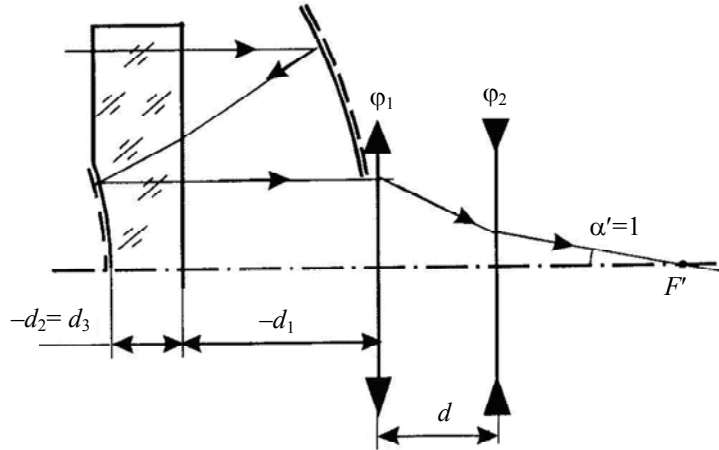


Рис. 3

Пусть сферическая aberrация изображения, образованного первым и вторым компонентами телеобъектива, отсутствует, т.е. пусть параметры $P_1 = P_2 = 0$. При этом для определения основных параметров P_i^* и W_i^* применим следующие формулы [4]:

$$P_i^* = \frac{1}{(\alpha' - \alpha)^3} \left\{ P_i - 4\alpha W_i + \alpha(\alpha' - \alpha) [2(2 + \pi)\alpha + \alpha'] \right\},$$

$$W_i^* = \frac{1}{(\alpha' - \alpha)^2} [W_i - \alpha(\alpha' - \alpha)(2 + \pi)].$$

Пусть параметры $W_1 \neq W_2 \neq 0$. Тогда выражения, определяющие коэффициенты aberrаций третьего порядка, принимают следующий вид:

$$B_0 = 0, \quad K_0 = -\frac{\alpha^2(n^2 - 1)}{4n^2} - W_1 - W_2, \quad (6)$$

$$C_0 = \frac{\alpha}{4k_3 n^2} [k_3(2 - 3n^2) + 1] + \frac{1 - \varphi_1^2 k_3 d}{k_3(1 - \varphi_1 d)} + 2 \frac{1 - k_3^2}{\alpha k_3^2} W_1 +$$

$$+ 2 \left(\frac{1 - k_3^2}{\alpha k_3^2} - \frac{d}{k_3^2(1 - \varphi_1 d)} \right) W_2. \quad (7)$$

Решая систему уравнений (6) и (7), при $K_0 = C_0 = 0$ получаем значения параметров W_1 и W_2 , при которых оптическая система, состоящая из афокальной зеркально-линзовой насадки и телеобъектива, становится апланатическим плананастигматом.

Пусть $W_1 \neq 0$, а $W_2 = 0$. Тогда при $K_0 = 0$ параметр $W_1 = -\frac{\alpha^2(n^2-1)}{4n^2}$. При этом коэффициент C_0 определяется выражением

$$C_0 = -\frac{\alpha}{4k_3^2 n^2} [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] + \frac{1 - \varphi_1^2 k_3 d}{k_3 (1 - \varphi_1 d)}.$$

Отсюда находим, что при $C_0 = 0$ расстояние

$$d = \frac{1}{\varphi_1} \frac{\alpha [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] - 4k_3 n^2}{\alpha [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] - 4k_3^2 n^2 \varphi_1}. \quad (8)$$

Предположим, что при одном и том же значении расстояния d отсутствуют астигматизм и кривизна поверхности изображения. Тогда, приравняв правые части выражений (5) и (8), получим $\alpha n (k_3 \varphi_1 - 1) [(1 + 4n)(k_3 n^2 - 1) k_3 + 2(n^2 - 1)] = 0$. Отсюда следует, что в рассматриваемом случае плананастигматическая коррекция aberrаций возможна при $\varphi_1 = 1/k_3$. При этом, как следует из выражения (8), расстояние между компонентами телеобъектива $d = k_3$, т.е. второй компонент телеобъектива расположен в плоскости изображения, выполняя функцию линзы Смита.

Пусть $W_1 = 0$, а $W_2 \neq 0$. Тогда при $K_0 = 0$ параметр $W_2 = -\frac{\alpha^2(n^2-1)}{4n^2}$. При этом коэффициент C_0 определяется выражением

$$C_0 = -\frac{\alpha}{4n^2 k_3^2} [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] + \frac{1 - \varphi_1^2 k_3 d}{k_3 (1 - \varphi_1 d)} + \alpha \frac{n^2 - 1}{2k_3^2 n^2} \frac{d}{1 - \varphi_1 d}.$$

Отсюда находим, что при $C_0 = 0$ расстояние

$$d = \frac{\alpha [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] - 4k_3 n^2}{2\alpha (n^2 - 1) + \alpha \varphi_1 [k_3^2 n^2 - k_3 + 2(n^2 - 1)] - 4k_3^2 n^2 \varphi_1^2}. \quad (9)$$

В этом случае, приравняв правые части выражений (5) и (9), получим

$$\varphi_1 = \frac{1}{2k_3} + \frac{1}{4k_3^2} + \frac{2(n^2 - 1) [n + \alpha (n^2 k_3 - 1)]}{nk_3 [(1 + 4n)(n^2 k_3 - 1) + 2(n^2 - 1)]}.$$

При значении угла $\alpha = -3,333$ и коэффициенте экранирования $k_3 = 0,3$ оптическая сила первого компонента $\varphi_1 = 4,616$, расстояние между компонентами $d = 0,172$, оптическая сила второго компонента $\varphi_2 = -6,23$.

Технические характеристики телеобъектива с зеркально-линзовой афокальной насадкой приведены ниже.

Фокусное расстояние, мм.....	500,2
Диафрагменное число	5,00
Угловое поле (2w)	2°00'
Положение предмета относительно первой поверхности	∞
Положение изображения относительно последней поверхности, мм.....	38,76
Диаметр входного зрачка, мм.....	100,0
Положение входного зрачка относительно первой поверхности, мм.....	1216,86
Положение выходного зрачка относительно последней поверхности, мм.....	-53,99
Основная длина волны, нм.....	546,07
Диапазон ахроматизации, нм	480,00—643,80

Конструктивные параметры и остаточные aberrации изображения, образованного такой системой, приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1

Номер поверхности	r , мм	d , мм	Марка стекла	n	$\varnothing_{\text{св}}$, мм
1	-300,000	-83,86		1,0000	
2	∞	-18,19	TK16	-1,0000	117,86
3	-59,436	-11,27	Ф1	-1,6152	49,50
4	-145,152	11,27	Ф1	-1,6169	38,56
5	-59,436	18,19	TK16	1,6169	33,92
6	∞	86,00		1,0000	33,64
7	597,778	12,00	TK1	1,5661	33,95
8	-48,013	7,00	Ф4	1,6285	37,28
9	-126,079	1,00		1,0000	37,35
10	230,306	9,80	TK1	1,5661	38,20
11	-197,357	81,60		1,0000	38,09
12	-46,140	8,00	СТК19	1,7477	17,96
13	-24,998	5,55	Ф1	1,6169	18,21
14	376,410			1,0000	18,02

Таблица 2

$S_0=\infty$	s_{p0}	s'_{p0}	s'_0	f'_0	$V(s_{p0})$	s'_Δ	$s'_0(\lambda_1-\lambda_0)$	$s'_0(\lambda_2-\lambda_0)$
		1217,0	-53,99	38,761	500,16	0,1854	38,761	-0,001051
$2w=0$	m	$\Delta s'$	$\text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	W	η , %	$\delta g'(\lambda_1-\lambda_0)$	$\delta g'(\lambda_2-\lambda_1)$
	50,0	0,139	0,100	0,0139	-0,0071	$0,9 \cdot 10^{-3}$	-0,0114	0,0156
	43,3	0,0215	0,0869	0,00187	-0,177	0,0224	-0,00681	0,00940
	35,4	-0,0354	0,0709	-0,0025	-0,150	0,0289	-0,00346	0,00474
	25,0	-0,0404	0,0501	-0,0020	-0,0544	0,0213	-0,00116	0,00154
w	s_p	s'_p	$\text{tg}w'$	y'	$\Delta y'$	z'_m	z'_s	$z'_m - z'_s$
0,0124	1217,0	-53,96	-0,0668	6,19	0,00357	-0,0073	-0,0027	-0,00458
0,0175	1217,0	-53,94	-0,0946	8,76	0,00995	-0,0058	-0,0029	-0,00292
$w=0,0175$	m	$\text{tg}\sigma'$	$\delta \text{tg}\sigma'$	$\delta g'$	W	—	$\delta g'(\lambda_1-\lambda_0)$	$\delta g'(\lambda_2-\lambda_0)$
	50,0	0,00535	0,0999	0,0103	0,456	—	-0,00790	0,0217
	43,3	-0,0079	0,0866	0,00545	0,273	—	-0,00333	0,0158
	35,4	-0,0238	0,0708	0,00320	0,153	—	0,000282	0,0111
	25,0	-0,0444	0,0502	0,00186	0,0597	—	0,00304	0,00764
	-18,8	-0,133	-0,0381	$-0,3 \cdot 10^{-3}$	-0,0114	—	0,00603	0,00410
	-26,5	-0,149	-0,0540	-0,0041	0,0396	—	0,00698	0,00264
	-32,5	-0,161	-0,0663	-0,0119	0,203	—	0,00823	0,000717
-37,5	-0,171	-0,0766	-0,0239	0,519	—	0,00982	-0,00170	
$w=0,0175$	M	$\text{tg}\sigma'$	$\text{tg}\sigma'_s$	$\delta G'$	W	$\delta g'$	$\delta G'(\lambda_1-\lambda_0)$	$\delta G'(\lambda_2-\lambda_0)$
	50,0	-0,0950	0,100	0,0230	0,383	-0,0042	-0,0120	0,0164
	43,3	-0,0949	0,0867	0,00759	0,0367	-0,0012	-0,00738	0,0101
	35,4	-0,0948	0,0708	$0,50 \cdot 10^{-3}$	-0,0603	$0,46 \cdot 10^{-3}$	-0,00392	0,00527
	25,0	-0,0947	0,0500	-0,0010	-0,0353	$0,84 \cdot 10^{-3}$	-0,00150	0,00191

Применение в качестве вторичного зеркала афокальной системы зеркально-линзового компонента с выпуклой поверхностью внутреннего отражения позволяет построить оптическую систему телеобъектива с плананастигматической коррекцией aberrаций образованного изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В. А., Хлусова Н. И. Применение плоскопараллельной пластинки для исправления сферической абберации // ОМП. 1972. № 9. С. 24—25.
2. Чуриловский В. Н. Теория хроматизма и аббераций третьего порядка. Л.: Машиностроение, 1968. 312 с.
3. Зверев В. А. Основы геометрической оптики: Учеб. пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.
4. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.

*Сведения об авторах***Виктор Алексеевич Зверев**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: post_vaz@rambler.ru

Галина Васильевна Карпова

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики

Ирина Николаевна Тимощук

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: tim_ir@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптикиПоступила в редакцию
07.02.13 г.

УДК 535.317

Е. В. ЕРМОЛАЕВА, В. А. ЗВЕРЕВ, И. Н. ТИМОЩУК

**ВОЛНОВАЯ АБЕРРАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЯ ТОЧКИ
ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ ЭКРАНИРОВАНИИ ВХОДНОГО ЗРАЧКА**

Определены условия, при которых волновая абберация изображения точки для крайних лучей на входном зрачке оптической системы и для лучей на границе экранируемой части пучка равна нулю, что позволяет заметно уменьшить остаточную волновую абберацию изображения точки.

Ключевые слова: волновая абберация, изображение точки, выходной зрачок, центральное экранирование.

Волновая абберация Φ изображения точки при известной продольной сферической абберации $\Delta s'$ и продольном смещении Δ' плоскости установки изображения с приемлемой точностью определяется выражением [1]

$$\Phi = \int_0^{\sigma'} \Delta s' \sin \sigma' \cdot d\sigma' - (1 - \cos \sigma') \Delta'.$$

На рис. 1 показано сечение меридиональной плоскостью сферы сравнения, проходящей через осевую точку P' и крайнюю точку Q' волнового фронта. Вполне очевидно, что волновая абберация в плоскости сечения заметно уменьшится, если кривую сечения поверхности сравнения провести через крайнюю точку волнового фронта и крайнюю точку Q_3' его экранируемой части. В этом случае радиус кривизны окружности сечения становится равным R_3' . При этом для определения волновой абберации используем точное выражение [2]

$$\Phi = \frac{(\delta g' - \Delta' \operatorname{tg} \sigma')^2}{R'_3} \cos^2 \sigma' + \int_0^{\sigma'} \delta g' d(\sin \sigma') - (1 - \cos \sigma') \Delta' . \quad (1)$$

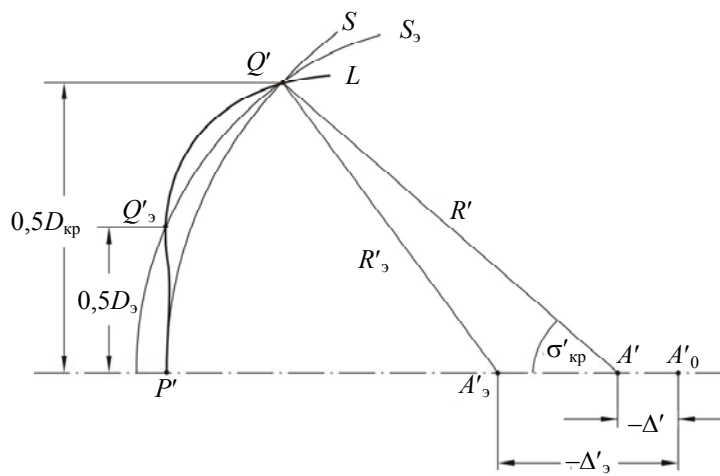


Рис. 1

Итак, в рассматриваемом случае при $\sigma' = \sigma'_{кр}$ волновая aberrация $\Phi = \Phi(\sigma'_{кр}) = 0$ и при $\sigma' = \sigma'_3$ — $\Phi = \Phi(\sigma'_3) = 0$; смещение $\Delta'_{кр} = \Delta'_3$. Тогда, как следует из выражения (1), имеем

$$\frac{(\delta g'_{кр} \cos \sigma'_{кр} - \Delta'_3 \sin \sigma'_{кр})^2}{\int_0^{\sigma'_{кр}} \delta g' d(\sin \sigma'_{кр}) - (1 - \cos \sigma'_{кр}) \Delta'_3} = \frac{(\delta g'_3 \cos \sigma'_3 - \Delta'_3 \sin \sigma'_3)^2}{\int_0^{\sigma'_3} \delta g' d(\sin \sigma'_3) - (1 - \cos \sigma'_3) \Delta'_3} .$$

Решая это уравнение, находим величину Δ'_3 . При этом

$$R'_3 = \frac{(\delta g'_{кр} - \Delta'_3 \operatorname{tg} \sigma'_{кр})^2 \cos^2 \sigma'_{кр}}{(1 - \cos \sigma'_{кр}) \Delta'_3 - \int_0^{\sigma'_{кр}} \delta g' d(\sin \sigma'_{кр})} = \frac{(\delta g'_3 - \Delta'_3 \operatorname{tg} \sigma'_3)^2}{(1 - \cos \sigma'_3) \Delta'_3 - \int_0^{\sigma'_3} \delta g' d(\sin \sigma'_3)} . \quad (2)$$

Поперечная aberrация $\delta g' = \frac{d\Phi}{d(\sin \sigma')} \approx \frac{d\Phi}{d\sigma'}$. Возможный вид кривой зависимости $\delta g' = \delta g'(\sigma')$ представлен на рис. 2, а. Величина остаточной поперечной aberrации изображения осевой точки определяется как

$$\delta g' = \delta g'_0 + \delta g'_{\Delta'} ,$$

где $\delta g'_0$ — поперечная aberrация изображения в плоскости Гаусса; $\delta g'_{\Delta'} = \Delta' \operatorname{tg} \sigma'$ — расфокусировка изображения, вызванная продольным смещением плоскости установки изображения относительно плоскости Гаусса; при этом $\Delta' = \frac{\delta g'_{\Delta'}}{\operatorname{tg} \sigma'}$, в соответствии с рис. 2, а $\Delta' = \operatorname{tg} \psi$.

С приемлемой точностью принято считать, что волновая aberrация определяется суммированием площадей, ограниченных кривой $\delta g'_0 = \delta g'_0(\sigma')$ и прямой $\delta g'_{\Delta'} \approx \Delta' \sigma'$, т.е. определяется интегралом

$$\int (\delta g'_0 + \delta g'_{\Delta'}) d(\sin \sigma') \approx \int (\delta g'_0 + \delta g'_{\Delta'}) d\sigma' .$$

При центральном экранировании входного зрачка экранируемая часть осевого пучка лучей в образовании изображения не участвует, поэтому волновую aberrацию этой части пучка лучей можно считать равной нулю. Равной нулю будет и волновая aberrация в крайней точке экранируемой части волнового фронта. При этом линия, определяющая смещение плоскости установки изображения, образует угол ψ_3 ; в рассматриваемом случае $|\psi_3| > |\psi|$, как показано на рис. 2, б. Волновая aberrация изображения в интервале значений $(\sigma'_3, \sigma'_{кр})$ должна принять экстремальное значение: $\Phi = \Phi_{extr}$. При $\sigma' = \sigma'_{extr}$ поперечная aberrация $\delta g' = 0$.

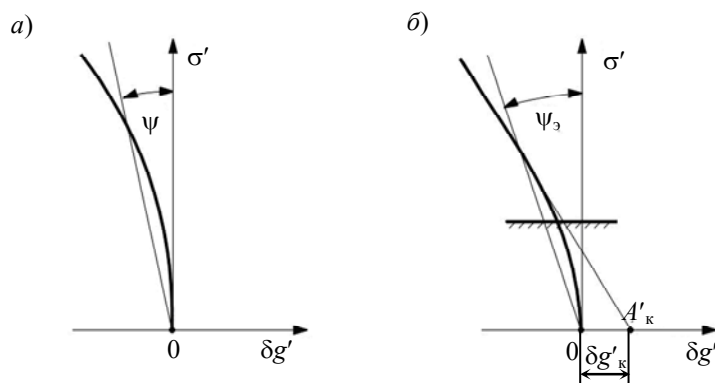


Рис. 2

Линия, проведенная вблизи неэкранируемой части кривой $\delta g'_0 = \delta g'_0(\sigma')$ таким образом, чтобы абсолютные отклонения кривой относительно линии были минимальны, пересекает ось $0-\delta g'$ в некоторой точке $A'_к$. При этом отклонения кривой от рассматриваемой линии определяют отклонение множества точек пересечения лучей с плоскостью установки изображения относительно точки, смещенной относительно оптической оси на расстояние, равное отрезку $\delta g'_к = 0A'_к$. Осевая симметрия рассматриваемого пучка лучей определяет множество точек поперечной aberrации, образующее окружность, радиус которой равен $\delta g'_к$. При этом пятно рассеяния в изображении точки будет иметь вид кольцевой полосы, ширина которой определяется размахом отклонений поперечной aberrации $\delta g'_0$ относительно линии.

Для „сжатия“ кольцевой полосы в одно осевое пятно можно применить пластинку, одна из поверхностей которой плоская, а другая имеет форму конической поверхности вращения, поместив ее во входном зрачке оптической системы в параллельных пучках лучей. Примером такой системы может служить сферическая отражающая поверхность с осевой точкой входного зрачка в центре кривизны поверхности. Малой „деформацией“ линейной образующей конуса можно компенсировать остаточную сферическую aberrацию изображения точки.

Заметим, что линию можно провести таким образом, чтобы она пересекала кривую $\delta g'_0 = \delta g'_0(\sigma')$ в двух точках, что позволит получить волновую aberrацию равной нулю в трех точках волнового фронта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чуриловский В. Н. Теория оптических приборов. М. — Л.: Машиностроение, 1966. 564 с.
2. Пуряев Д. Т. Методы контроля оптических асферических поверхностей. М.: Машиностроение, 1976. 262 с.

Сведения об авторах

Елена Владимировна Ермолаева — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики;
E-mail: ermolena@yandex.ru

Виктор Алексеевич Зверев

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: post_vaz@rambler.ru

Ирина Николаевна Тимошук

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: tim_ir@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

УДК 535.317.6

Е. В. ЕРМОЛАЕВА, В. А. ЗВЕРЕВ, Ю. А. ПОДГОРНЫХ
**ВАРИАНТЫ ЗЕРКАЛЬНЫХ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
С ГЛАВНЫМ ЗЕРКАЛОМ СФЕРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ**

Рассматриваются варианты зеркальных систем, построенных на основе применения афокальной системы из двух отражающих поверхностей с использованием преобразования систем Грегори и Кассегрена.

Ключевые слова: *зеркальная система, отражающая поверхность, афокальная система.*

Входным зрачком крупногабаритных телескопов, как правило, является оправа главного зеркала, форма отражающей поверхности которого, исходя из соображений практической реализации при существующем уровне технологии изготовления, должна быть сферической. Как показано в работе [1], афокальная система, состоящая из главного зеркала сферической формы и вторичного зеркала, поверхность которого эквидистантна параболоиду, формирует строго стигматичное изображение осевой точки при достаточно большом отступлении от условия синусов. Для эффективной компенсации этого отступления с помощью последующей зеркальной системы афокальная система, предложенная Д. Т. Пуряевым [1], должна быть кеплеровского типа [2], т.е. иметь промежуточное изображение, как показано на рис. 1.

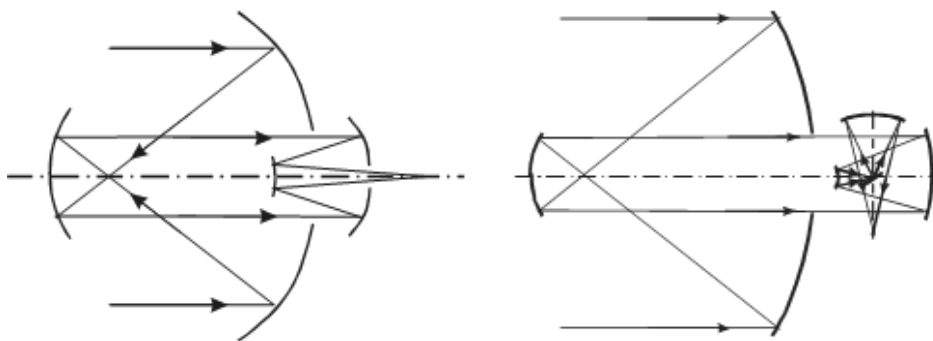


Рис. 1

Проф. М. М. Русиновым было установлено, что если изображение, образованное объективом Грегори, расположить в плоскости, проходящей через вершину отражающей поверхности главного зеркала, то изображение этого зеркала будет сформировано вторичным зеркалом в плоскости промежуточного изображения, образованного отражающей поверхностью главного зеркала [3, 4]. Если при этом отражающую поверхность главного зеркала принять в качестве входного зрачка объектива, то его изображение в плоскости промежуточного изо-

бражения будет выходным зрачком рассматриваемой оптической системы. В этом случае в выходной зрачок системы можно поместить дополнительную отражающую поверхность (рис. 2).

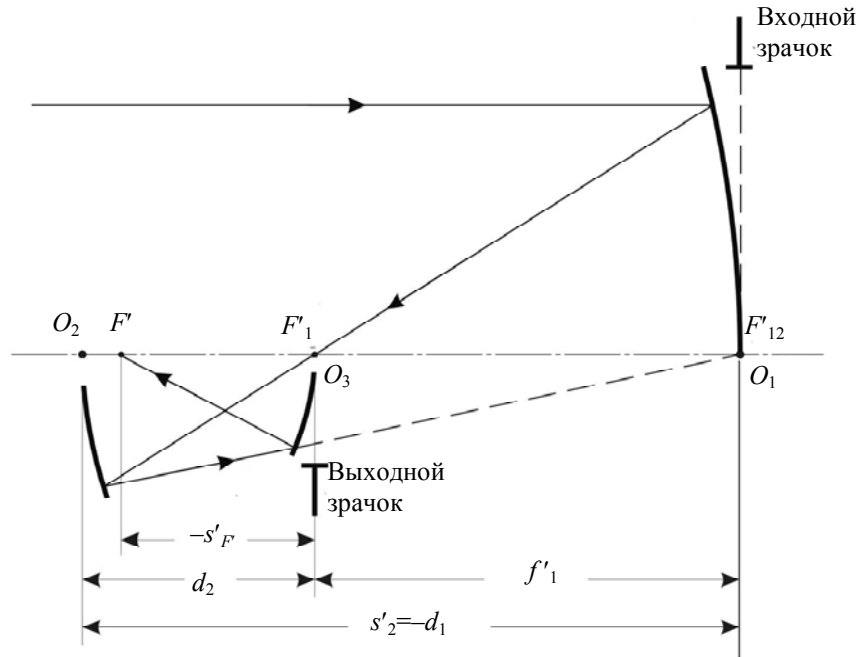


Рис. 2

Выразив линейные величины в масштабе фокусного расстояния системы, получим: $h_1 = 1$; отношение $h_2 / h_1 = h_2 = -k_s$ определяет коэффициент центрального экранирования зрачка (осевого пучка лучей) по диаметру; задний фокальный отрезок $s'_{F'} = -k_s d_2$. Коэффициент экранирования k_s ($k_s > 0$) — величина известная (задана или выбрана); значение коэффициента k_s выбирается из конструктивных соображений.

Сферическая аберрация, кома и астигматизм третьего порядка изображения в общем случае определяются следующими коэффициентами [5, 6]:

$$S_I = \sum_{i=1}^3 h_i Q_i; \quad S_{II} = \sum_{i=1}^3 H_i Q_i - J \sum_{i=1}^3 W_i;$$

$$S_{III} = \sum_{i=1}^3 \frac{H_i^2}{h_i} Q_i - 2J \sum_{i=1}^3 \frac{H_i}{h_i} W_i + J^2 \sum_{i=1}^3 \frac{v_{i+1} \alpha_{i+1} - v_i \alpha_i}{h_i},$$

где $Q_i = P_i + T_i \sigma_i$; σ_i — коэффициент „деформации“ сферической поверхности в уравнении $x^2 + y^2 = 2r_i z - (1 + \sigma_i) z^2$; $J = n' \alpha' l'$ — инвариант Лагранжа — Гельмгольца, здесь $n' = -1$, $\alpha' = 1$, $l' = f' \beta_1$; при $\beta_1 = 1$ в масштабе фокусного расстояния имеем $J = -1$.

Выражения, определяющие коэффициенты первичных аберраций изображения, образованного рассматриваемой оптической системой, можно представить в виде

$$S_I = \sum_{i=1}^3 h_i P_i + T_1 \sigma_1 - k_s T_2 \sigma_2 - \frac{k_s}{1+k_s} T_3 \sigma_3, \tag{1}$$

$$S_{II} = -\frac{1}{k_s} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \sum_{i=1}^3 W_i, \tag{2}$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_s^2 k_s} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \frac{2}{k_s k_s} W_2 + 1 + 2k_s (1+k_s) + \frac{1+k_s}{k_s}. \tag{3}$$

Коррекционными параметрами в рассматриваемой оптической системе являются коэффициенты деформации отражающих поверхностей: σ_1, σ_2 и σ_3 . Из выражений (2) и (3) следует, что подбором коэффициента σ_2 можно компенсировать или остаточную кому, или астигматизм. Следовательно, зная три коррекционных параметра, можем компенсировать лишь две aberrации из трех. Раскрыв величины, входящие в выражения, определяющие коэффициенты S_I и S_{II} [6], при $S_{II} = 0$ получим

$$\sigma_2 = \frac{2 - k_s^2(2k_3 - 1)}{k_s^2(2k_3 - 1)^3},$$

при этом коэффициент S_I определяется выражением

$$S_I = \frac{1}{4} k_s^3 (1 - k_3)^3 (1 + \sigma_1) - \frac{1 - 2k_3}{2} k_s^3 k_3 - \frac{1}{4} \frac{1 - k_s^2 k_3^2}{1 - k_3} (1 - k_s k_3) k_3 \left[1 - \frac{(1 + k_s k_3)^2}{(1 - k_s k_3)^2} \sigma_3 \right].$$

Отсюда следует, что при $S_I = 0$ коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как $\sigma_1 = 0$ при $\sigma_3 \neq 0$ или $\sigma_3 = 0$ при $\sigma_1 \neq 0$.

Очевидным достоинством рассматриваемой оптической системы (см. рис. 2) является то, что при апланатической коррекции aberrаций главное зеркало может иметь сферическую форму, а недостатком — расположение приемника изображения на большом расстоянии от главного зеркала.

Альтернативной этой оптической системе может быть система, схема которой представлена на рис. 3. Из габаритных соотношений следует, что коэффициент экранирования светового пучка лучей плоским зеркалом равен $k_3 = 1 + d_p \varphi_1$, где d_p — расстояние от главного зеркала до плоского; $\varphi_1 = -2/r_1$ — оптическая сила главного зеркала. Заметим, что в данной оптической системе плоское зеркало выполняет функцию лишь габаритного элемента.

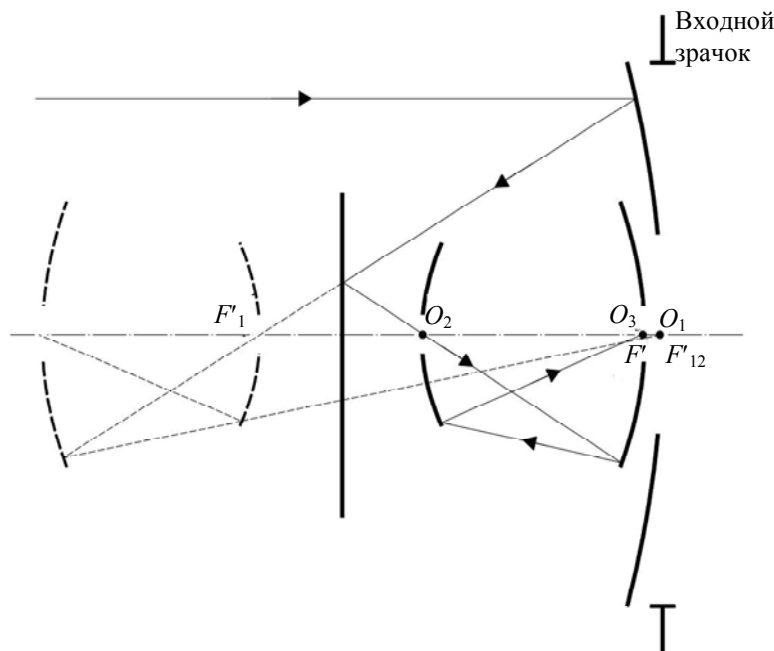


Рис. 3

Для расширения коррекционных возможностей систему, состоящую из главного и плоского зеркал, заменим системой из двух отражающих поверхностей типа оптической системы Кассегрена (рис. 4). При этом апертурной диафрагмой может служить отражающая поверхность как первого, так и второго зеркала.

Рассмотрим вариант композиции оптической системы, когда апертурной диафрагмой является отражающая поверхность главного зеркала. На эту же поверхность проецируется ее изображение, образованное второй и третьей отражающими поверхностями системы, как показано на рис. 4.

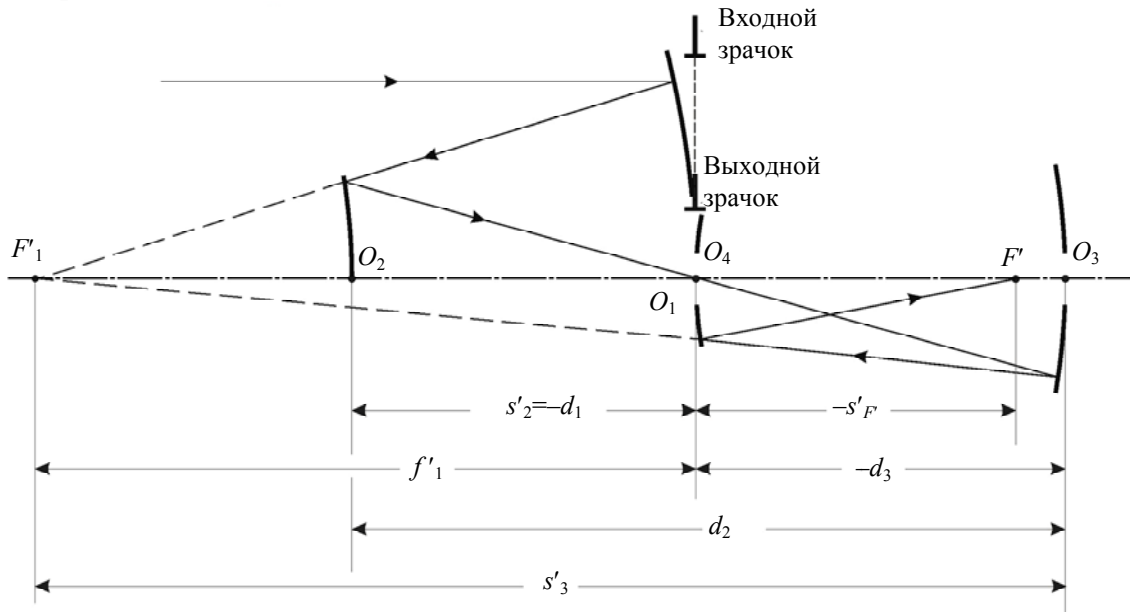


Рис. 4

Пусть $s'_2 = -d_1$, $s'_{F'} = -k_s d_3$, а $d_3 = k_1 d_1$. В результате параметрического анализа рассматриваемой композиции зеркальной оптической системы получены соотношения, которые можно представить последовательностью

$$d_1 = -\frac{1}{k_s} \frac{k_3}{1 + k_1(1 - k_3)}; \quad \alpha_2 = \frac{k_3 - 1}{d_1}; \quad d_2 = -(1 + k_1)d_1; \quad \alpha_3 = \frac{k_3}{d_1};$$

$$d_3 = k_1 d_1; \quad \alpha_4 = \frac{k_1 k_3}{d_1} \frac{1 - k_3}{1 + k_1(1 - k_3)}; \quad s'_{F'} = \frac{k_1 k_3}{1 + k_1(1 - k_3)}.$$

Первичные aberrации изображения, образованного рассматриваемой системой, определяются коэффициентами

$$S_I = \sum_{i=1}^4 h_i P_i - T_1 \sigma_1 - k_3 T_2 \sigma_2 + k_1 k_3 T_3 \sigma_3 + \frac{k_1 k_3}{1 + k_1(1 - k_3)} T_4 \sigma_4, \quad (4)$$

$$S_{II} = -\frac{1}{k_s} \frac{k_3}{1 + k_1(1 - k_3)} (P_2 + T_2 \sigma_2) - \frac{1}{k_s} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \sum_{i=1}^4 W_i, \quad (5)$$

$$S_{III} = -\frac{1}{k_s^2} \frac{k_3}{[1 + k_1(1 - k_3)]^2} (P_2 + T_2 \sigma_2) + \frac{1}{k_1 k_s^2 k_3} (P_3 + T_3 \sigma_3) - \frac{2}{k_s [1 + k_1(1 - k_3)]} W_2 +$$

$$+ \frac{2}{k_1 k_s k_3} W_3 + k_s \frac{1 - k_3}{k_3} + \frac{1 + k_1(1 - k_3)}{k_s^2} \left[k_s (2k_3 - 1) + \frac{1 + k_s}{k_1} k_3 \right]. \quad (6)$$

Положив в выражениях (5) и (6) коэффициенты $S_{II} = 0$ и $S_{III} = 0$, получим систему из двух уравнений, решив которую, найдем значения коэффициентов σ_2 и σ_3 . Подставив найденные значения коэффициентов в формулу (4), получим уравнение с неизвестными коэффициентами σ_1 и σ_4 . Отсюда следует, что коэффициенты деформации могут принимать и такие значения, как $\sigma_1 = 0$ при $\sigma_4 \neq 0$ или $\sigma_4 = 0$ при $\sigma_1 \neq 0$. Очевидным достоинством рассматриваемой

оптической системы (см. рис. 4) является то, что при анастигматической коррекции аберраций главное зеркало может иметь сферическую форму.

Кривизна поверхности изображения определяется коэффициентом

$$S_{IV} = \sum_{i=1}^4 \frac{v_i \alpha_{i+1} - v_{i+1} \alpha_i}{h_i} = -\alpha_2 - \frac{\alpha_2 + \alpha_3}{h_2} + \frac{\alpha_3 + \alpha_4}{h_3} - \frac{1 + \alpha_4}{h_4}.$$

Заменяя углы и высоты определяющими их выражениями, получим

$$S_{IV} = -\frac{1}{k_s} \frac{k_3}{1 + k_1(1 + k_3)} \left[\frac{(1 + 2k_1)k_3 - k_1}{k_1 k_3} + \frac{1 - k_3}{1 + k_1(1 - k_3)} \right] - \frac{1 + k_1(1 - k_3)}{k_1 k_3}. \quad (7)$$

Рассматриваемая система имеет вполне конструктивный вид, если принять $k_1 = k_s = 1$.

При этом при $S_{IV} = 0$ выражение (7) приобретает следующий вид: $k_3^2 - 2k_3 + \frac{1}{4} = 0$. Этому уравнению удовлетворяет решение $k_3 = 0,134$. Таким образом, в рассматриваемой системе возможна компенсация не только сферической аберрации, комы и астигматизма, но и кривизны поверхности изображения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Piryayev D. T.* Afocal two-mirror system // Optical Engineering. 1993. Vol. 32, N 6. P. 1325—1327.
2. *Зверев В. А., Бахолдин А. В., Гаврилюк А. В.* Оптическая система высокоапертурного телескопа // Оптич. журн. 2001. Т. 68, № 6. С. 6—14.
3. *Русинов М. М.* Несферические поверхности в оптике. М.: Недра, 1973. 296 с.
4. *Русинов М. М.* Композиция оптических систем. Л.: Машиностроение, 1989. 383 с.
5. *Слюсарев Г. Г.* Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
6. *Зверев В. А.* Основы геометрической оптики: Учеб. пособие. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002. 218 с.

Сведения об авторах

- Елена Владимировна Ермолаева** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: ermolena@yandex.ru
- Виктор Алексеевич Зверев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: post_vaz@rambler.ru
- Юлия Александровна Подгорных** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: julijapdg@gmail.com

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

А. С. КОВАЛЕВА

МЕТОД РАСЧЕТА КОНЦЕНТРИЧЕСКИХ ЗЕРКАЛЬНЫХ, ЗЕРКАЛЬНО-ЛИНЗОВЫХ И ЛИНЗОВЫХ СИСТЕМ

Представлены соотношения, полученные при расчете габаритных и конструктивных параметров концентрической оптической системы с преломляющими и отражающими поверхностями исходя из условия коррекции сферической аберрации, а также соотношения, определяющие выбор материалов линзовых элементов линзовых концентрических оптических систем в соответствии с условиями коррекции сферической и хроматических аберраций.

Ключевые слова: *апланатический зеркально-линзовый объектив, концентрический объектив, ахроматический концентрический объектив, плоскость наилучшей установки.*

Разработка оптических систем, удовлетворяющих современным условиям применения, требует обстоятельного анализа элементной базы и схем, формирующих реальную основу композиции линзовых, зеркальных и зеркально-линзовых систем.

Известно, что оптическая система с концентрическими поверхностями обладает собственными коррекционными возможностями, а именно строгим отсутствием астигматизма при произвольном положении предмета и строгим отсутствием аберрации во входных зрачках. Исследованию свойств концентрических оптических систем посвящено множество работ. Результаты этих исследований позволяют проанализировать габаритные и аберрационные свойства оптической системы и разработать метод расчета концентрических объективов.

Поверхность, концентричная зрачку, обладает сферической аберрацией. Однако если устранить сферическую аберрацию, то образуется апланатическая поверхность, которая оставляет неисправленной только кривизну изображения.

Рассмотрим рис. 1, на котором показан ход действительного луча через преломляющую поверхность сферической формы, где P — точка пересечения падающего на поверхность луча (или его продолжения) с нормалью к нему, опущенной из центра кривизны поверхности C ; P' — точка пересечения преломленного на поверхности луча (или его продолжения) с нормалью к нему из центра кривизны той же поверхности; $[NC]$ — нормаль к сферической поверхности. Положим $[PC] = m$, $[P'C] = m_1$.

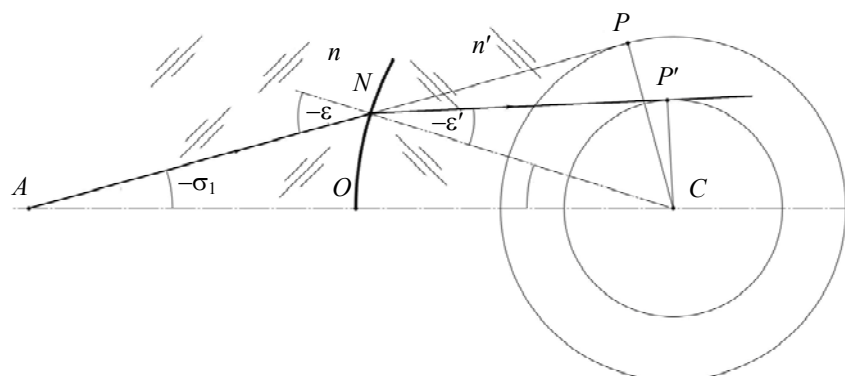


Рис. 1

Приняв угол падения на первую поверхность рассматриваемой системы $\sigma_1 = 0$ (см. рис. 1), фокусное расстояние системы можно определить как

$$f' = \frac{m}{\sin \sigma'} = \frac{m_1}{\sin \sigma'_k}, \quad (1)$$

где σ'_k — угол преломления луча после k -й поверхности (на рис. 1 не показан).

Дифференцируя выражение (1) и заменяя дифференциалы конечными разностями, получаем $\Delta f' \cong \Delta s' = -\frac{\Delta \sigma'}{\sin^2 \sigma'} m \cos \sigma'$, здесь $\Delta s'$ — продольная сферическая абберация, $m = \text{const}$. Тогда поперечная сферическая абберация будет определяться выражением $\delta g' = \Delta s' \text{tg} \sigma' = f' \delta \sigma'$, где $\delta \sigma' = \sigma'_0 - \sigma'$ [1]. При этом сферическая абберация в угловой мере определяется отношением $\delta \sigma' = \frac{\delta g'}{f'}$. При $\sigma_1 = 0$ можно записать формулу для σ'_k :

$$\sigma'_k = \sum_{i=1}^k \arcsin \frac{n_i m_1}{n_i r_i} - \sum_{i=1}^k \arcsin \frac{n_{i+1} m_1}{n_{i+1} r_i}, \quad (2)$$

где r_i — радиус кривизны i -й поверхности, n_i — показатель преломления i -й поверхности.

В соответствии с выражением (1) угол $\sigma'_k = \arcsin(m_1/f')$. При малой величине x угол $\arcsin x = x$. В рассматриваемом случае при $m \rightarrow 0$ величина $f' = f'_0$. Полагая в формуле (2) величину m_1 малой, получаем уравнение для оптической силы системы:

$$\Phi_0 = \frac{1}{f'_0} = n_1 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i+1}} \right). \quad (3)$$

Функцию $\arcsin x$ можно представить степенным рядом вида $\arcsin x = x + \frac{1}{6} x^3 + \frac{3}{40} x^5 + \frac{5}{112} x^7 + \dots$. Ограничиваясь в разложении в степенной ряд членами не выше седьмого порядка, формулу (2) можно записать следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma'_k = & n_1 m_1 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i+1}} \right) + \frac{1}{6} n_1^3 m_1^3 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i^3} \left(\frac{1}{n_i^3} - \frac{1}{n_{i+1}^3} \right) + \\ & + \frac{3}{40} n_1^5 m_1^5 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i^5} \left(\frac{1}{n_i^5} - \frac{1}{n_{i+1}^5} \right) + \frac{5}{112} n_1^7 m_1^7 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i^7} \left(\frac{1}{n_i^7} - \frac{1}{n_{i+1}^7} \right), \end{aligned} \quad (4)$$

здесь

$$n_1 m_1 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i} \left(\frac{1}{n_i} - \frac{1}{n_{i+1}} \right) = \frac{m_1}{f'_0} = \sin \sigma'_{k,0},$$

при этом

$$\sigma'_{k,0} = \arcsin \frac{m_1}{f'_0} = \frac{m_1}{f'_0} + \frac{1}{6} \frac{m_1^3}{f_0'^3} + \frac{3}{40} \frac{m_1^5}{f_0'^5} + \frac{5}{112} \frac{m_1^7}{f_0'^7}.$$

Полученные соотношения позволяют представить выражение (4) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \delta \sigma' = \sigma'_{k,0} - \sigma'_k = & \frac{1}{6} \frac{m_1^3}{f_0'^3} - \frac{1}{6} n_1^3 m_1^3 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i^3} \left(\frac{1}{n_i^3} - \frac{1}{n_{i+1}^3} \right) + \frac{3}{40} \frac{m_1^5}{f_0'^5} - \frac{3}{40} n_1^5 m_1^5 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i^5} \left(\frac{1}{n_i^5} - \frac{1}{n_{i+1}^5} \right) + \\ & + \frac{5}{112} \frac{m_1^7}{f_0'^7} - \frac{5}{112} n_1^7 m_1^7 \sum_{i=1}^k \frac{1}{r_i^7} \left(\frac{1}{n_i^7} - \frac{1}{n_{i+1}^7} \right). \end{aligned} \quad (5)$$

Оптические системы с concentрическими поверхностями, состоящие из одних линз, наряду со сферической абберацией обладают еще одной абберацией — хроматической. Если

система состоит из линз и зеркал, находящихся в воздухе, то хроматическая aberrация определяется как [2]

$$\eta = m \sum_{i=1}^k \frac{\varphi_i}{n_i \mu_i}, \quad (6)$$

где $\varphi_i = \frac{n_i - 1}{n_i} \left(\frac{1}{r_i} - \frac{1}{r_{i+1}} \right)$ — оптическая сила концентрической линзы, $\mu_i = \frac{n_i - 1}{\Delta n_i}$ — коэффициент дисперсии.

В настоящей статье рассматриваются несколько схем концентрических объективов, расчет которых можно произвести в соответствии с изложенным методом.

Применим полученные соотношения для расчета зеркально-линзового объектива, состоящего из концентрического мениска и двух концентрических отражающих поверхностей — вогнутой и выпуклой (рис. 2).

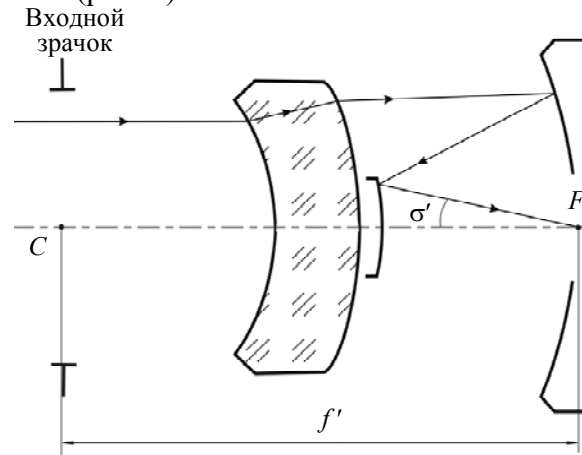


Рис. 2

Показатели преломления сред, разделяемых поверхностями оптической системы объектива, равны $n_1 = n_3 = -n_4 = n_5 = 1$, $n_2 = n$, где n — показатель преломления мениска. Выражение (3), определяющее оптическую силу системы, в рассматриваемом случае принимает вид

$$\varphi_0 = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + 2 \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right). \quad (7)$$

Положение поверхности изображения относительно вершины первой по ходу луча отражающей поверхности определяется соотношением фокусного расстояния системы и радиуса кривизны отражающей поверхности. Это соотношение можно записать в виде $r_3 = k_S f'_0$, где величина коэффициента $k_S < 0$ выбирается из конструктивных соображений. При $k_S = -1$ осевая точка поверхности изображения будет совмещена с осевой точкой (вершиной) первой отражающей поверхности. Положение мениска относительно системы отражающих поверхностей выбирается из конструктивных соображений при условии требуемой коррекции aberrаций. Для этого взаимосвязь радиусов кривизны второй отражающей поверхности и второй поверхности мениска целесообразно определить соотношением $r_4 = k_R r_2$, где коэффициент $k_R \geq 1$. При $k_R = 1$ поверхности должны быть совмещены. Эта задача конструктивно и технологически решается нанесением отражающего покрытия на центральную зону второй поверхности мениска.

Выражая конструктивные параметры в масштабе фокусного расстояния системы, принимаем $\varphi_0 = 1$. Тогда с учетом введенных коэффициентов k_S и k_R выражение (7) можно преобразовать к виду

$$\frac{1}{r_1} = \frac{n}{n-1} \frac{k_S - 2}{k_S} + \frac{n(k_R + 2) - k_R}{(n-1)k_R r_2}. \quad (8)$$

Подставив соотношение (8) в выражение (5), при $\delta\sigma' = 0$ получим уравнение седьмой степени относительно r_2 . В первом приближении величину r_2 можно определить, если в выражении (5) отбросить все члены в степени, выше третьей. Таким образом, находим радиусы кривизны поверхностей рассматриваемой системы.

Важным параметром зеркальных и зеркально-линзовых оптических систем является коэффициент центрального экранирования зрачка k_3 для осевого пучка лучей по его диаметру. В данном случае

$$k_3 = \frac{S'_{F'}}{f'_0} = \frac{f'_0 + r_4}{f'_0}, \text{ при } f'_0 = 1 \quad k_3 = 1 + r_4 = 1 + k_R r_2.$$

Аналогичным образом можно рассчитать *концентрический объектив с тройным прохождением луча через мениск*, что естественным образом усиливает его коррекционные возможности. Схема такой оптической системы приведена на рис. 3.

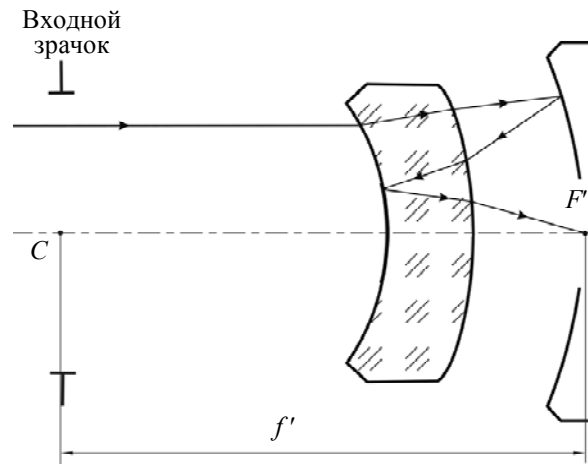


Рис. 3

В этом объективе отражающая поверхность совмещена с центральной зоной первой поверхности мениска. Согласно рис. 3 радиусы $r_1 = r_5$, $r_2 = r_4 = r_6$, и в этом случае положение осевой точки изображения относительно осевой точки (вершины) первой по ходу луча отражающей поверхности определяется соотношением $r_3 = k_S f'_0$. Кроме того, показатели преломления разделяемых сред равны $n_1 = n_3 = -n_4 = n_7 = 1$, $n_2 = -n_5 = n_6 = n$. Выражение (3) в данном случае принимает вид

$$\varphi_0 = \frac{n-3}{nr_1} - 3 \frac{n-1}{nr_2} + \frac{2\varphi_0}{k_S}.$$

При $\varphi_0 = 1$ имеем

$$\frac{1}{r_1} = \frac{n}{n-3} \frac{k_S - 2}{k_S} + \frac{n-1}{n-3} \frac{3}{r_2}.$$

Предположим, что во входном зрачке системы расположена плоскопараллельная пластинка, которая может выполнять роль защитного стекла. При этом сферическую aberrацию образованного изображения можно компенсировать деформацией второй поверхности пластинки. *Оптическая система концентрического объектива с пластинкой Шмидта* приведена на рис. 4.

Пусть начало O системы координат xuz расположено в центре кривизны отражающих поверхностей и совпадает с осевой точкой второй поверхности пластинки. Ось z направлена вдоль оптической оси зеркальной системы слева направо. При этом осевая деформация W плоского волнового фронта, падающего на несферическую поверхность пластинки, определяется координатой z поверхности [3]:

$$W = (1-n)z, \quad (9)$$

где n — показатель преломления материала пластинки.

В общем случае для оптимальной коррекции сферической aberrации изображения, образованного рассматриваемой зеркальной системой, правая часть уравнения несферической поверхности должна содержать три члена с неравными нулю коэффициентами [4, 5]:

$$z = \frac{1}{2r_0}y^2 + ay^4 + by^6, \quad (10)$$

где r_0 — радиус кривизны в вершине несферической поверхности; a, b — коэффициенты.

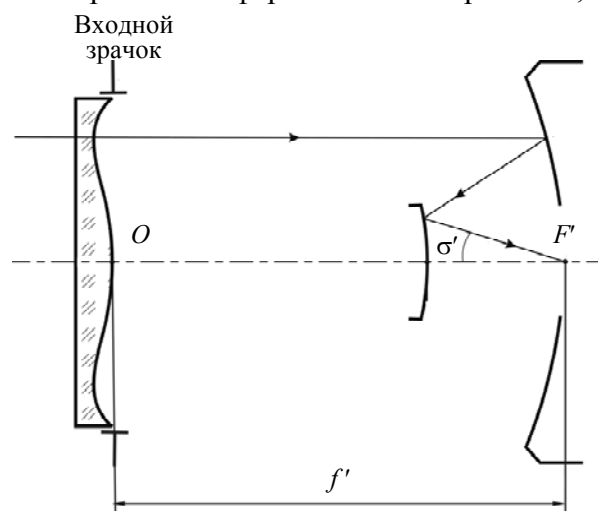


Рис. 4

Характер коррекции остаточной волновой сферической aberrации определяет следующие три условия, которым должно удовлетворять уравнение несферической поверхности (10):

1) на краю зрачка при $y_{кр} = m_{кр}$ координата $z_{кр} = 0$, а следовательно, в соответствии с уравнением (9) должно выполняться условие

$$bm_{кр}^4 + am_{кр}^2 + \frac{1}{2r_0} = 0; \quad (11)$$

2) при $y_0 = m_0$ должно выполняться условие $\frac{dz}{dy} = \frac{dW}{dm} = 0$, и в соответствии с уравнением (9) имеем

$$6bm_0^4 + 4am_0^2 + \frac{1}{r_0} = 0; \quad (12)$$

3) при $y_0 = m_0$ экстремальное значение деформации плоского волнового фронта, вносимой несферической поверхностью, должно быть равно экстремальному значению остаточной волновой сферической aberrации; это условие определяется выражением

$$z_{extr} = \frac{W(m_0)}{1-n} = \frac{W_{extr}}{1-n} = \frac{1}{2r_0}m_0^2 + am_0^4 + bm_0^6. \quad (13)$$

Решив систему линейных уравнений (9), (11)—(13), находим значение радиуса кривизны r_0 и коэффициентов a и b . Несферическая поверхность пластинки, форма которой определяется принятым характером коррекции остаточной сферической aberrации изображения, обладает достаточно хорошей коррекцией хроматической aberrации положения. В результате получаем оптическую апланатическую систему с исправленной хроматической aberrацией.

Рассмотрим следующий вариант — *трехлинзовую оптическую систему с преломляющими поверхностями*, схема которой представлена на рис. 5. Входной зрачок такой системы располагается в центре кривизны поверхностей, а конструктивные параметры удовлетворяют следующим условиям: $n_1 = n_5 = 1$, $n_2 = n_4$, $r_1 = -qr_4$, $r_2 = -qr_3$, где q — связующий параметр.

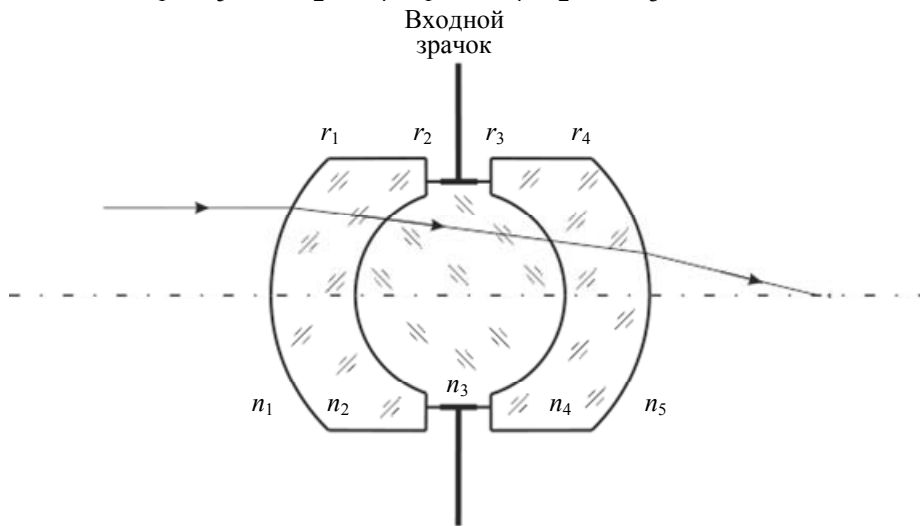


Рис. 5

Оптическая сила этой системы, согласно формуле (3), определяется как

$$\begin{aligned} \Phi_0 &= \Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 = \\ &= \frac{n_2 - 1}{n_2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{n_3 - 1}{n_3} \left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} \right) + \frac{n_4 - 1}{n_4} \left(\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right) = \\ &= \frac{n_2 - 1}{n_2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{n_3 - 1}{n_3} \left(\frac{1}{r_2} + \frac{q}{r_2} \right) + \frac{n_2 - 1}{n_2} \left(-\frac{q}{r_2} + \frac{q}{r_1} \right) = \\ &= \frac{n_2 - 1}{n_2} (1 + q) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{n_3 - 1}{n_3} (1 + q) \left(\frac{1}{r_2} \right) = \\ &= (1 + q) \left[\frac{n_2 - 1}{n_2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{n_3 - 1}{n_3} \left(\frac{1}{r_2} \right) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Таким образом, $\Phi_1 = q\Phi_3$. При этом легко заметить, что $\Phi_1 < 0$, $\Phi_2 > 0$.

Используя формулу (6), выведем условие для устранения хроматической aberrации рассматриваемой системы через конструктивные параметры:

$$\begin{aligned} \eta &= \frac{\Phi_1}{n_2 \mu_2} + \frac{\Phi_2}{n_3 \mu_3} + \frac{\Phi_3}{n_4 \mu_4} = \frac{\Phi_1}{n_2 \mu_2} + \frac{\Phi_2}{n_3 \mu_3} + \frac{q\Phi_1}{n_2 \mu_2} = \\ &= (1 + q) \frac{\Phi_1}{n_2 \mu_2} + \frac{\Phi_2}{n_3 \mu_3} = (1 + q) \left[\frac{n_2 - 1}{n_2^2 \mu_2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{n_3 - 1}{n_3^2 \mu_3} \left(\frac{1}{r_2} \right) \right] = 0. \end{aligned} \quad (15)$$

При $\Phi_0 = 1$, помножив выражение (14) на $\frac{1}{n_2 \mu_2}$, получим уравнение

$$\begin{aligned} \frac{1}{n_2\mu_2} &= (1+q) \left[\frac{n_2-1}{n_2^2\mu_2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{n_3-1}{n_3n_2\mu_2} \left(\frac{1}{r_2} \right) \right] = \\ &= \frac{1}{n_2\mu_2(1+q)} = \frac{n_2-1}{n_2^2\mu_2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{n_3-1}{n_3n_2\mu_2} \left(\frac{1}{r_2} \right), \end{aligned}$$

вычитая из которого выражение (15), имеем

$$\frac{1}{n_2\mu_2(1+q)} = \frac{n_3-1}{n_3n_2\mu_2} \frac{1}{r_2} - \frac{n_3-1}{n_3^2\mu_3} \frac{1}{r_2} = \frac{n_3-1}{n_3} \left(\frac{1}{n_2\mu_2} - \frac{1}{n_3\mu_3} \right) \left(\frac{1}{r_2} \right). \quad (16)$$

Умножим выражение (16) на величину $n_2\mu_2r_2$:

$$\frac{r_2}{1+q} = \frac{n_3-1}{n_3} \left(1 - \frac{n_2\mu_2}{n_3\mu_3} \right),$$

откуда следует, что $1 \geq \frac{n_2\mu_2}{n_3\mu_3}$: отсюда, в свою очередь, следует условие, определяющее выбор

стекла для линз:

$$n_2\mu_2 \leq n_3\mu_3. \quad (17)$$

Решая систему из уравнений (5), (14) и (15) и учитывая условие (17), получаем значения радиусов кривизны поверхностей при заданной комбинации стекол.

Результатом проведенного исследования является разработанный инженерный метод расчета зеркальных, линзовых и зеркально-линзовых оптических систем с концентрическими поверхностями. Данный метод позволяет произвести расчет оптической системы на минимум аберраций, используя свойства концентрических систем. Применение данного метода для расчета линзовых систем позволяет учесть хроматические аберрации и дать рекомендации по выбору комбинации стекол.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Попов Г. М. Концентрические оптические системы и их применение в оптическом приборостроении. М.: Наука, 1969.
2. Родионов С. А. Основы оптики: Конспект лекций. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2000.
3. Погарев Г. В. Юстировка оптических приборов. Л.: Машиностроение, 1982.
4. Грамматин А. П., Демидова Е. А., Зверев В. А., Романова Г. Э. Аберрационные свойства оптической системы из двух отражающих поверхностей сферической формы с компенсатором // Оптич. журн. 2004. Т. 71, № 4.
5. Зверев В. А. Основы геометрической оптики. СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2002.

Сведения об авторе

Анна Сергеевна Ковалева — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: anyuta_kov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

В. Е. МАЛЮТИН, Н. Д. ТОЛСТОБА, Э. В. ЕМЕЛЬЯНОВ, Г. В. ЯКОПОВ

АВТОМАТИЗАЦИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ПРИ КОНТРОЛЕ ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ МЕТОДОМ ГАРТМАНА

Обсуждается проблема автоматической обработки гартманограмм при контроле оптических систем методом Гартмана. Рассматривается этап сепарации пятен рассеяния на гартманограмме и приводятся алгоритмы, разработанные для поиска пятен.

Ключевые слова: метод Гартмана, гартманограмма, сепарация, поиск.

Метод Гартмана, являющийся геометрическим методом контроля, позволяет обнаружить и измерить местные деформации волнового фронта, которые нарушают симметрию пучка лучей.

Известно [1, 2], что процесс обработки результатов контроля оптических систем методом Гартмана делится на следующие этапы:

1) определение идеальных положений центров пятен рассеяния, зарегистрированных на матричном приемнике;

2) обработка гартманограммы:

2.1 — определение масштаба и ориентации гартманограммы;

2.2 — сепарация пятен;

2.3 — определение центров пятен;

2.4 — идентификация пятен;

3) определение величин отклонений волнового фронта.

В настоящей статье рассматривается этап 2.2 — сепарация пятен на гартманограмме. Для устойчивой автоматической работы метода Гартмана с различными снимками необходимо распознавать любые картины с заранее неизвестным количеством пятен рассеяния. Для этого, в свою очередь, необходимо разделение гартманограммы на отдельные пятна в целях поиска информации о центрах пятен иными способами [3—5].

Рассмотрим методы нахождения пятен на гартманограмме.

Метод поиска пятен „по диагонали“. Интенсивность картины отдельного пятна от края к центру увеличивается, поэтому можно вывести следующее предположение: если интенсивность пикселей по диагонали отличается от интенсивности фона или изменяется при анализе некоторого ряда пикселей, то можно сделать вывод о том, что это — пятно рассеяния. В противном случае, если интенсивность пикселей меняется, но на небольшом участке гартманограммы, то этот участок необходимо считать цифровым шумом и его, соответственно, не следует определять как пятно рассеяния.

Алгоритм (рис. 1).

1. Диагональ направлена в четвертый квадрант (слева направо сверху вниз).

2. Изначально рассматривается пиксел (0,0) и подвергается проверке пиксел (1,1) на диагонали:

— если пиксел отличается от фона по интенсивности, то устанавливается маркер, и по диагонали проверяется следующий пиксел;

— если пиксел не отличается от фона по интенсивности, значит, перепад интенсивности завершен, следующие пиксели принадлежат фону, и маркировка диагонали пятна прекращается; далее начало проверки перемещается в пиксел (0,1).

Пикселы, помеченные на предыдущих шагах, пропускаются.

3. В результате по окончании анализа картины, т.е. по достижении последнего пиксела, формируется набор пятен рассеяния, помеченных штрихами слева направо по диагонали.

4. Далее алгоритм выполняется сначала с изменением направления диагонали просмотра на 90° (направление диагонали — третий квадрант). Снова маркируются пиксели, лежащие на диагонали.

5. Координаты границ пятен сохраняются и могут использоваться на следующем этапе обработки данных.

В результате выполнения алгоритма формируется картина, вид которой показан на рис. 1.

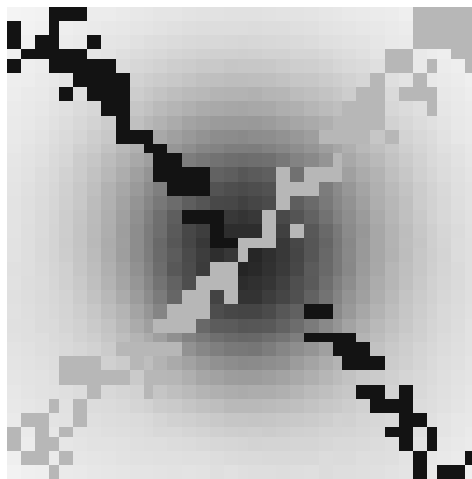


Рис. 1

Работа алгоритма может быть оптимизирована пользователем, если порог перепада интенсивности и шаги по диагонали будут заранее им определены.

К достоинствам данного алгоритма следует отнести простоту реализации и универсальность, а к недостаткам — большие затраты времени на обработку данных (вследствие двух проходов по изображению) и недостаточно точное определение границ пятна.

Метод поиска пятен „по прямой“. В основе данного метода поиска пятен рассеяния лежит предположение о том, что пятно рассеяния имеет форму эллипса. При последовательном анализе изображения слева направо верхний пиксел такого пятна будет находиться приблизительно над участком, интенсивность которого близка к максимальной яркости пятна рассеяния.

Для корректной работы алгоритма сначала необходимо определить интенсивность фона. Эту задачу можно решить несколькими способами:

- принять пиксел (0,0) за фон, что, однако, может вызвать случайные ошибки;
- предоставить выбор фона пользователю;
- произвести сканирование всего изображения и интенсивность подавляющего большинства пикселей принять за фон, что, однако, приведет к дополнительным затратам машинного времени.

Алгоритм (рис. 2).

1. Рассматривается пиксел (0,0).
2. Определяется интенсивность фона любым из указанных способов.
3. Проверяется близость значения интенсивности текущего пиксела (0,0) к интенсивности фона.
4. Если значения интенсивностей близки (шаг 3), то проверяется следующий пиксел (0,1).
5. Если пиксел отличается от фона по интенсивности, то записываются его координаты, и далее изменяется направление обработки снимка. При анализе изображения вниз по прямой — пиксели (1,1), (2,1) — проверяется их интенсивность, пока не достигается пиксел с фоновым значением интенсивности. В процессе анализа определяются координаты самого

яркого пиксела, запоминается самый нижний, отличающийся по интенсивности от фона пиксел и осуществляется возврат к самому яркому пикселу.

6. Осуществляется последовательный анализ изображения в левом направлении до достижения фонового значения интенсивности пиксела. Запоминаются координаты этого пиксела и при последовательном анализе в обратном направлении так же определяется положение крайнего правого фонового пиксела.

Таким образом становятся известны границы пятна рассеяния (рис. 2).

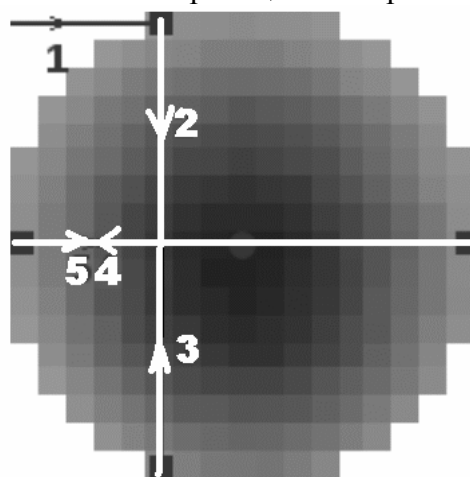


Рис. 2

На рис. 2 стрелками показано направление последовательного анализа при реализации алгоритма, цифрами обозначен порядок анализа.

В результате выполнения алгоритма формируются области, которые подлежат обработке для уточнения центров пятен и определения деформации волнового фронта.

Достоинства данного алгоритма — относительно высокая скорость поиска всех областей и примерных положений центров пятен, универсальность и простота реализации.

Анализ результатов. На рис. 3 представлены результаты обработки фрагментов гартманограммы с использованием метода поиска „по диагонали“ (а) и „по прямой“ (б).

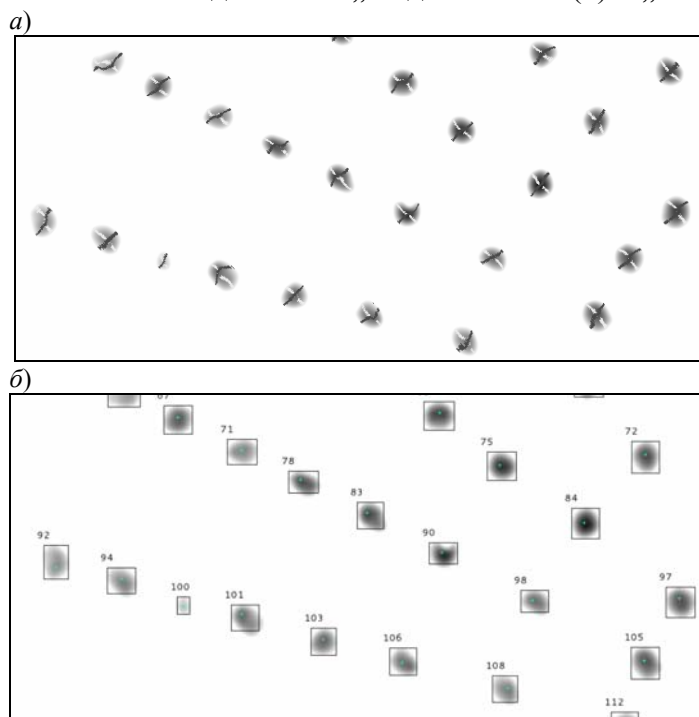


Рис. 3

Рассмотренные алгоритмы с высокой степенью достоверности определяют все пятна гартманогаммы. Однако при обработке одинаковых снимков метод „по диагонали“ в несколько раз уступает методу „по прямой“ по скорости работы.

Таким образом, при анализе гартманогамм для сепарации пятен рекомендуется использовать второй алгоритм — „по прямой“. Данный метод позволяет в автоматическом режиме определять местоположение пятен рассеяния, обеспечивая возможность автоматического анализа гартманогамм и получения достоверных сведений о деформациях главного зеркала большого телескопа альт-азимутального (БТА).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зверев В. А., Родионов С. А., Сокольский М. Н., Усоскин В. В. Технологический контроль главного зеркала БТА методом Гартмана // ОМП. 1977. № 3. С. 3—5.
2. Витриченко Э. А. Методы исследования астрономической оптики. М.: Наука, 1980. 152 с.
3. Tolstoba N. Analysis of Hartmann testing techniques for large-sized optics // Proc. of SPIE. 2001. Vol. 4451. P. 406—413.
4. Стороженко А. И., Толстова Н. Д. Измерение координат энергетических пятен рассеяния на матричном приемнике // Тр. Междунар. оптич. конгресса „Оптика—XXI век“. СПб: СПбГУ ИТМО, 2002.
5. Tolstoba N. D. Determination of aberrations by processing lenslet array image located on the CCD receiver // Proc. of SPIE. 2001. Vol. 4473.

Сведения об авторах

- Владимир Евгеньевич Малютин** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: scordion@mail.ru
- Надежда Дмитриевна Толстова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: nadinet@mail.ru
- Эдуард Владимирович Емельянов** — канд. техн. наук; Специальная астрофизическая обсерватория РАН, лаборатория обеспечения наблюдений, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика; науч. сотрудник; E-mail: eddy@sao.ru
- Григорий Владимирович Яковов** — канд. техн. наук; Специальная астрофизическая обсерватория РАН, служба эксплуатации комплекса БТА, п. Нижний Архыз, Карачаево-Черкесская Республика; ст. науч. сотрудник; E-mail: yakopov@sao.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики
НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ПРИБОРОВ

УДК 681.4.07

С. М. ЛАТЫЕВ, Буй Динь БАО

МЕТОДЫ ЦЕНТРИРОВКИ ЛИНЗ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Рассмотрены причины возникновения децентрировок линз в объективах, а также технологические и конструктивные методы их уменьшения и компенсации влияния на качество изображения.

Ключевые слова: центрировка линз и линзовых систем, компенсация децентрировок линз.

Децентрировки линз в оптических системах, особенно в объективах, существенно ухудшают качество создаваемого изображения. Наиболее значительное влияние они оказывают на величину такой аберрации, как „кома“. Выявление этой и других аберраций при сборке объективов обычно осуществляется по дифракционному изображению точечной диафрагмы.

На рис. 1 представлены схемы контроля качества изображения, формируемого фото- и микрообъективами, по дифракционному изображению точечной диафрагмы (а, б), а также виды дифракционных изображений при отсутствии и наличии различных аберраций (в—е).

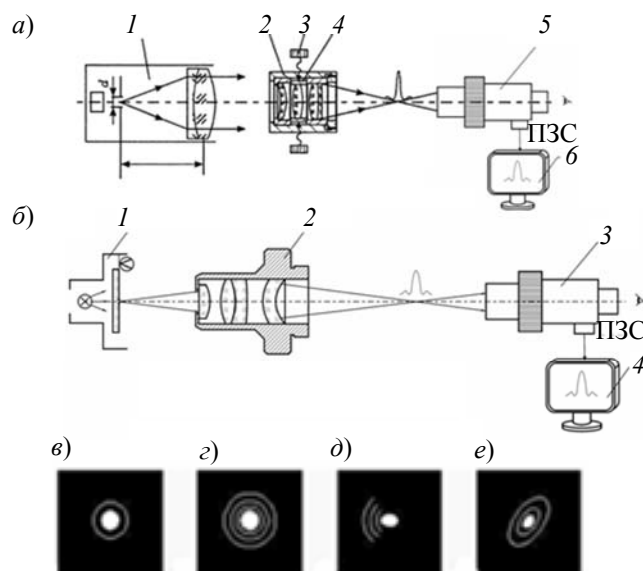


Рис. 1

Так, на рис. 1, а приведена схема контроля качества изображения, создаваемого фотообъективом 2, с помощью коллиматора 1, имеющего точечную диафрагму диаметром d , видеокамеры 5 и монитора 6. Компенсация влияния децентрировок осуществляется перемещением компонента 4 юстировочным винтом 3. Диаметр точечной диафрагмы коллиматора определяется из выражения

$$d \leq 120'' f' 5 \cdot 10^{-6} / D, \quad (1)$$

где f' — фокусное расстояние объектива коллиматора, D — диаметр входного зрачка фотообъектива.

Схема контроля качества изображения, создаваемого микрообъективом 2, по узлу 1 с точечной диафрагмой приведена на рис. 1, б (здесь 3 — видеокамера, 4 — монитор). Диаметр точечной диафрагмы в этом случае определяется исходя из дифракционной разрешающей способности контролируемого микрообъектива:

$$d \leq \lambda / (2A), \quad (2)$$

где λ — длина волны света, A — числовая апертура микрообъектива.

Изображение, представленное на рис. 1, б показывает присутствие в объективе комы, возникающей из-за технологических погрешностей изготовления и сборки его элементов.

Рассмотрим погрешности, возникающие в оптических и механических деталях и узлах объективов.

Одной из причин появления децентрировок является децентрировка собственно линз при их изготовлении. Под децентрировкой линзы в общем случае понимается смещение центра(ов) кривизны рабочей(их) поверхности(ей) относительно базовой оси линзы или перпендикулярность плоской рабочей поверхности линзы к ее базовой оси. Децентрировка задается позиционным допуском, разнотолщинностью по диаметру линзы или биением плоской поверхности [1]. Децентрировка линзы может привести при сборке к ее децентрировке относительно базовой оси оправы или корпуса объектива.

При склейке линз возникает децентрировка склейки, обусловленная децентрировкой склеиваемых компонентов, клиновидностью слоя клея, смещениями и наклонами приклеиваемой линзы относительно базовой оси склейки. При изготовлении оправы для линзы (склейки) также возникают погрешности, которые могут привести к децентрировке линзы относительно базовой оси оправы. Как правило, это погрешности расположения „гнезда под линзу“ (несоосность, биения, погрешности формы поверхностей и их шероховатость) относительно базовой оси оправы. В результате при креплении линзы (или склейки линз) в оправе такими способами, как приклеивание, завальцовка, резьбовое кольцо и др. [2] возникает ее децентрировка из-за погрешностей линз и оправ, а также радиальных смещений и наклонов линзы в посадочном зазоре.

Рассмотрим эти погрешности на примере соединения линзы с оправой приклеиванием. На рис. 2, а представлена упрощенная конструкция крепления в оправе плосковыпуклой линзы, а на рис. 2, б — двояковыпуклой. В первом случае требуется, чтобы центр кривизны сферической поверхности F линзы находился на базовой оси EA оправы (образованной ее базовыми поверхностями A и E), а плоская поверхность линзы была ей перпендикулярна. Однако из-за децентрировки самой линзы, наклона (биения) опорного фланца G оправы и его шероховатости, смещения линзы в зазоре посадки по диаметру D_1 и эксцентриситета отверстия $\varnothing D_1$ относительно базовой оси указанные требования не выполняются.

Во втором случае (см. рис. 2, б) требуется, чтобы центры кривизны обеих рабочих поверхностей линзы лежали на базовой оси оправы. Здесь смещение центров кривизны возникает из-за децентрировки самой линзы, наклона опорного фланца G , погрешности формы (грата) торцевой кромки, образованной поверхностью фланца G и отверстием $\varnothing D_2$ оправы, эксцентриситета отверстия $\varnothing D_2$ относительно базовой оси оправы и разворота (наклона) линзы в пределах зазора посадки по диаметру D_1 .

Переход от соединения по схеме, приведенной на рис. 2, а, к соединению по схеме рис. 2, б осуществляется при выполнении следующего условия:

$$D_2 / (2R_B) \geq \mu, \quad (3)$$

где μ — коэффициент трения материалов оправы и линзы, R_B — радиус опорной поверхности линзы (см. [2]).

Заметим, что не параллельность поверхности L оправы относительно базовой поверхности A не влечет за собой децентрировку данной линзы, но может в дальнейшем привести к наклону другого линзового узла, который сопрягается с этой поверхностью. Все перечисленные погрешности носят векторный характер, поэтому характеризуются не только величиной, но и направлением (азимутом разворота, вокруг базовой оси).

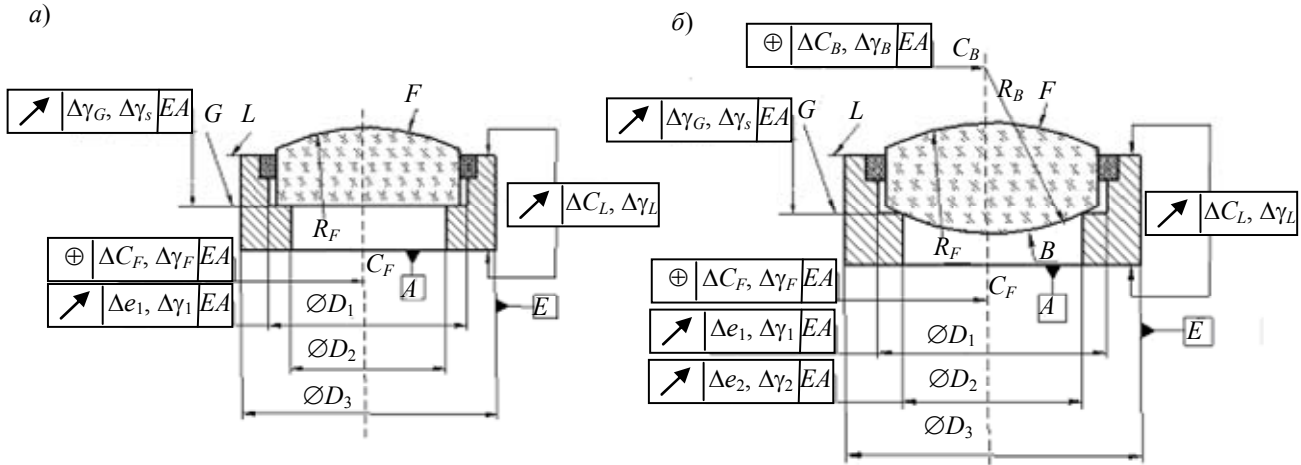


Рис. 2

Уменьшение этих погрешностей и компенсация их влияния на качество изображения при сборке линзы и оправы возможны путем юстировки линзы в оправе (при сдвиге или наклоне ее в увеличенном зазоре посадки относительно базовой оси оправы в процессе закрепления) либо результативной обработки наружных поверхностей оправы в номинальный размер с использованием в качестве базы оптической оси закрепленной линзы [2].

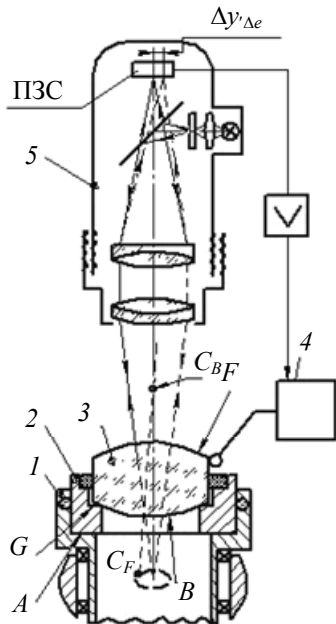


Рис. 3

Автоматизированное оборудование, имеющееся в настоящее время, позволяет осуществлять эти операции. Например, фирма TRIOPTICS (Германия) производит автоматизированную станцию OptiCentric [3], которая осуществляет центровку линзы 3 при ее вклейке в оправу 2 быстроотвердевающим клеем под действием ультрафиолетового излучения: см. рис. 3, здесь 1 — патрон (цанга) для крепления оправы, 4 — автоматизированный манипулятор для смещения линзы, 5 — автоматизированный автоколлиматор.

Недостаток этой и подобных станций заключается в том, что здесь производится центровка только одной поверхности линзы. Поэтому если опорный торец G не перпендикулярен базовой оси оправы или отверстие $\text{Ø}D_2$ (для случая, подчиняющегося условию (3)) выполнено эксцентричным к базовой оси, то вторая (опорная) поверхность линзы остается децентрированной. Например, если опорный торец G имеет наклон (биение) на угол $\Delta\phi$, то центр кривизны C_B поверхности B будет смещен относительно базовой оси оправы на величину

$$\Delta C_B \approx (R_B - h) \Delta\phi,$$

где h — стрелка прогиба поверхности линзы при опоре на торец G .

Данные факторы обуславливают необходимость минимизации указанных погрешностей поверхности G и отверстия $\text{Ø}D_2$ при изготовлении оправы. Кроме того, существенное влияние на точность центровки поверхности B имеет несоосность Δe внутреннего диаметра патрона относительно оси его вращения в аэростатических подшипниках: $\Delta C_B = \Delta e$.

На рис. 4, а, б соответственно представлены фотоизображение станции OptiCentric и конструкция проекционного объектива для рентгеновской аппаратуры, клейка и центровка линзовых компонентов 1—7 которого осуществлены на этой станции, что позволило существенно повысить производительность сборки объектива и в ряде случаев исключить необходимость его юстировки для компенсации остаточных децентрировок компонентов.

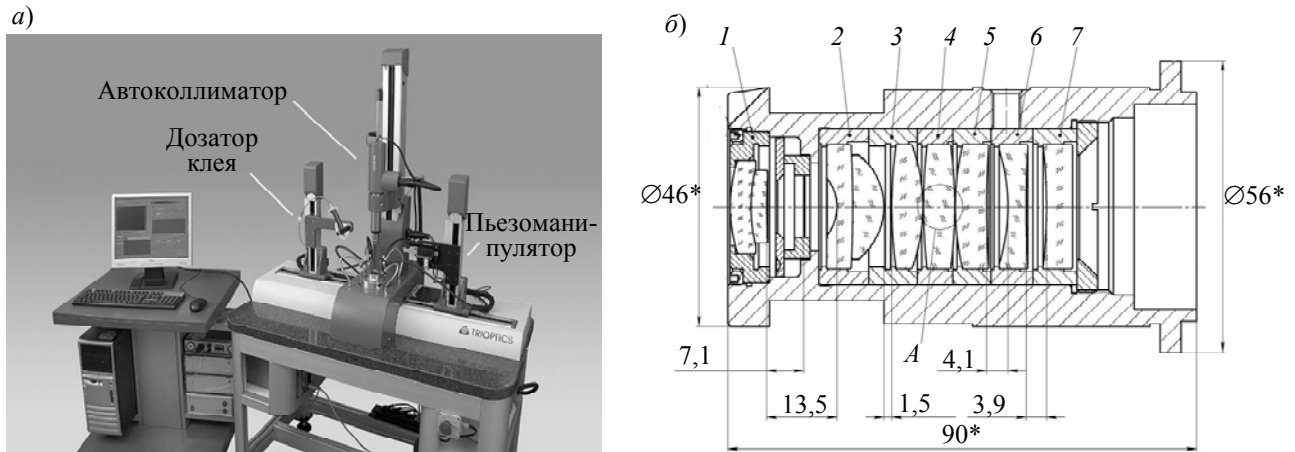


Рис. 4

Результативная обработка наружных поверхностей оправы позволяет получить более высокую точность центровки линзы. Обработка осуществляется на специализированных станках (станциях), некоторые из которых снабжены также трехкоординатными измерительными устройствами, позволяющими определить погрешность линейных размеров оправы после ее обработки. На рис. 5 представлена функциональная схема подобного станка, используемого фирмой „Carl Zeiss“ (Германия) [4]; здесь 1 — шпиндель станка, 2 — патрон для автоматизированной центровки оправы с линзой 3, 4 — „суппорт“ станции, содержащий автоколлиматор 5, щуп измерительной машины 6 и резец 7. Несмотря на возможность обеспечения на таких станках высокой точности центрирования отдельных линз (и склеек линз) в оправках, для ряда многокомпонентных высококачественных объективов (фотолитографических, фотограмметрических, проекционных) не удается достичь требуемого качества изображения из-за остаточных децентрировок линзовых компонентов, их радиального смещения в зазорах с корпусом и наклонов.

В таких объективах предусматривается конструктивная компенсация влияния децентрировок компонентов или взаимоцентрировка всех или отдельных компонентов в корпусе объектива. Схема унифицированной конструкции микрообъектива [5—7], в котором предусмотрена подобная юстировка, представлена на рис. 6. Здесь для компенсации влияния децентрировок линзовых компонентов при неавтоматизированной сборке микрообъектива предусмотрена возможность радиального смещения линзового компонента 1 с помощью технологических винтов, завинчиваемых в резьбовые отверстия общей оправы 2. При смещении этого компонента возникает aberrация противоположного знака, компенсирующая aberrацию (кому) из-за децентрировок других компонентов. Подробное описание конструкции унифицированного микрообъектива приведено в работе [8].

Так как процесс юстировки трудно автоматизировать, то при автоматизированной сборке микрообъектива предусмотрена установка каждого линзового узла с разворотом (вокруг оси отверстия общей оправы 2) на определенный угол, что обеспечивает отсутствие комы

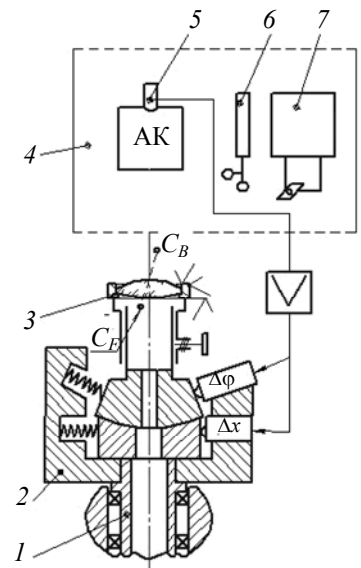


Рис. 5

в собранном микрообъективе. Естественно, что децентрировки оптических поверхностей линзовых компонентов узлов, а также погрешности, определяющие значение радиального смещения в зазорах, должны быть заранее измерены [7].

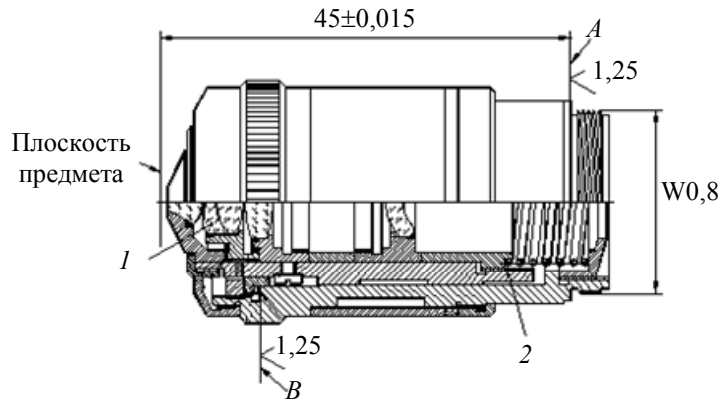


Рис. 6

В некоторых сложных объективах для обеспечения требуемого качества изображения достаточно центрировать при сборке только несколько компонентов. Примером такого решения может служить объектив „Агат-14“ (см. рисунок в таблице) с переменным фокусным расстоянием, содержащий 8 компонентов, в котором осуществляется взаимная центровка только трех последних компонентов, имеющих наибольшее значение коэффициента влияния A_q на кому (см. таблицу).

Порядковый номер компонента	Компонент		Коэффициент влияния A_q	
	Номер поверхности	A_q	Номер поверхности	A_q
1	1	$0,15 \cdot 10^{-2}$	10	$-0,12 \cdot 10^{-2}$
2	2	$0,3 \cdot 10^{-6}$	11	0,15 мкм/рад
3	3	$0,3 \cdot 10^{-3}$	12	0,15 мкм/рад
4	4	$0,4 \cdot 10^{-3}$	13	$0,1 \cdot 10^{-1}$
5	5	$-0,44 \cdot 10^{-2}$	14	0,001 мкм/рад
6	6	$-0,7 \cdot 10^{-3}$	15	-0,44
7	7	$-0,6 \cdot 10^{-6}$	16	-0,39
8	8	$-0,46 \cdot 10^{-3}$	17	0,16
9	9	$0,96 \cdot 10^{-2}$	18	0,57

Примеры центровки линзовых компонентов и компенсации влияния aberrаций посредством наклона и разворота компонентов объективов [2, 9] представлены на рис. 7, 8. Так, в конструкции зеркально-линзового телескопа Максутава (см. рис. 7) для центровки линзовых компонентов предусмотрен наклон зеркала 1 винтами 2.

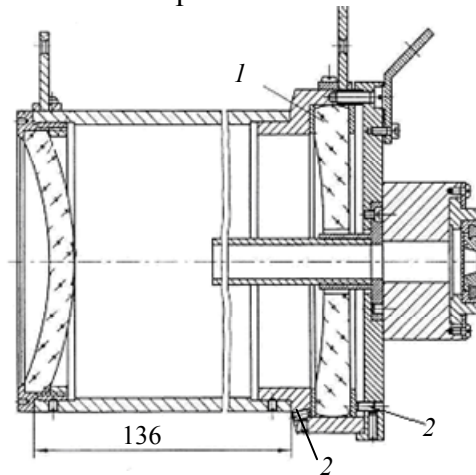


Рис. 7

Центрировка фотограмметрического объектива М. М. Русинова (см. рис. 8, а) осуществляется при развороте первого 1 и последнего 3 менисков относительно неподвижных средних компонентов — склеек 2, при этом суммарный вектор ΔC_{Σ} тангенциальной дисторсии равен нулю (см. рис. 8, б). Это возможно, если модуль одного из векторов не больше суммы модулей двух других.

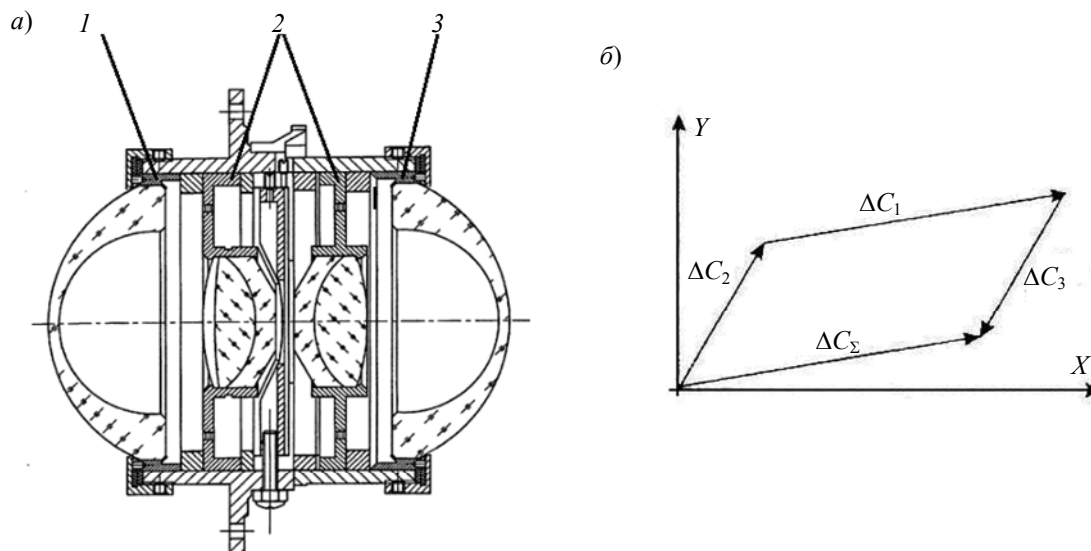


Рис. 8

На рис. 9, а, б [10] представлены „штабельные“ конструкции фотолитографических объективов, позволяющие осуществлять „последовательную“ центрировку компонентов при сборке с помощью радиального сдвига и разворота в пределах „бобовидных“ отверстий в оправе под шпильки или винты.

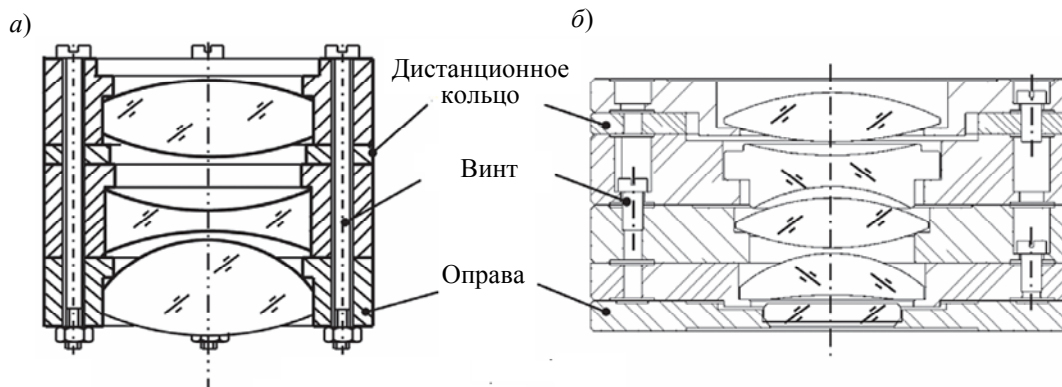


Рис. 9

Конструкция с винтами (рис. 9, б) является более рациональной и технологичной для осуществления центрировки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 2.412-81. Правила выполнения чертежей и схем оптических изделий. Введ. с 01.01.83. М.: Изд-во стандартов, 2002.
2. Латышев С. М. Конструирование точных (оптических) приборов. СПб: Политехника, 2007. 580 с.
3. Automated Centering and Bonding Machine [Электронный ресурс]: <<http://www.trioptics.com>>.
4. Frank S. Justierdrehen- eine Technologie fuer Hohleistungsoptik // Bericht IMK. N 14; Techn. Univ. Ilmenau, 2008. 150 с.

5. Табачков А. Г., Латыев С. М., Фролов Д. Н. Унификация конструкций линзовых микрообъективов // Оптич. журн. 2011. № 1. С. 38—44.
6. Латыев С. М., Смирнов А. П., Фролов Д. Н. и др. Обеспечение целевых показателей качества при автоматизации сборки микрообъективов // Там же. 2010. № 1. С. 49—53.
7. Смирнов А. П., Латыев С. М. Математическая модель автоматизированной сборки микрообъективов // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 22—28.
8. Латыев С. М., Табачков А. Г., Фролов Д. Н., Резников А. С. Унификация оптических и механических конструкций линзовых микрообъективов // Там же. 2011. Т. 54, № 11. С. 14—21.
9. Латыев С. М. Компенсация погрешностей в оптических приборах. Л.: Машиностроение, 1985. 246 с.
10. *Sondermann M.* Mechanische Verbindungen zum Aufbau optischer Hohleistungssysteme // Bericht IMGK. В. 19; Techn. Univ. Ilmenau, 2011. 165 s.

Сведения об авторах

- Святослав Михайлович Латыев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; заведующий кафедрой; E-mail: smlatyev@yandex.ru
- Буй Динь Бао** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

М. Б. ЛЕОНОВ, И. Т. РАЗУМОВСКИЙ

КОНЦЕПТУАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХКООРДИНАТНОГО ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННОГО ЦЕЛЕУКАЗАТЕЛЯ

Рассматривается концепция разработки трехкоординатного оптико-электронного целеуказателя. Показано, что использование в измерительных каналах целеуказателя типовых электронных датчиков позволяет значительно повысить оперативность измерений, снизить габариты прибора, а также себестоимость его разработки и изготовления.

Ключевые слова: целеуказатель, топографические приборы, тахеометры, дальномеры, энкодеры, датчик угла наклона.

В настоящее время для определения координат объектов используются такие измерительные инструменты, как светодальномеры, буссоли, гироазимуты, тахеометры.

Для целеуказания на равнинной местности достаточно знать в полярной системе координат две координаты объекта — дальность до объекта D и его азимут A . В случае холмистой или горной местности для целеуказания может потребоваться третья координата объекта, а именно угол его места ε над уровнем горизонта. Схема целеуказания наблюдаемого объекта приведена на рис. 1.

Применяемые для целеуказания топографические инструменты обладают высокой точностью измерения углов и дистанций, однако характеризуются значительными временными затратами при определении координат объекта и имеют высокую стоимость. Для обеспечения оперативности измерений в 2001 г. был предложен наблюдательный оптико-электронный прибор „NORD“ [1]. Функция определения дальности в этом приборе совмещена с указанием направления на „Север“, но поставленную задачу — целеуказания трех координат — прибор, тем не менее, не выполняет.

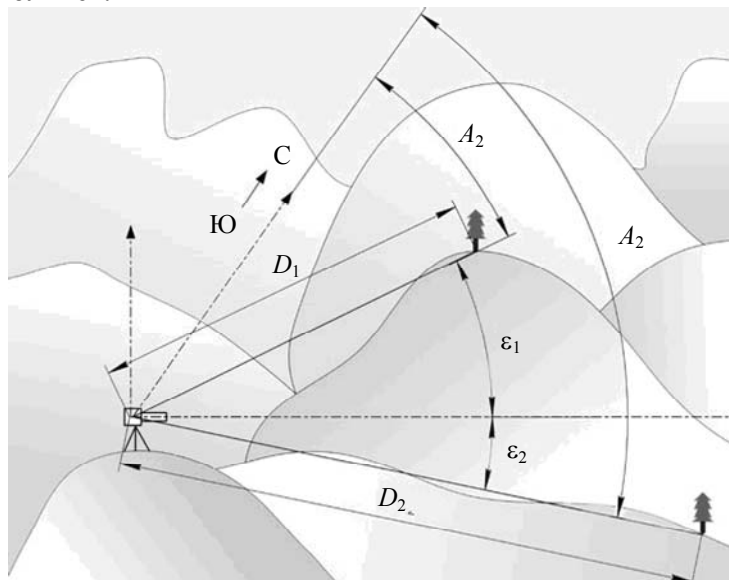


Рис. 1

Современные достижения в электронике обусловили возможность создания компактного и вместе с тем быстродействующего универсального трехкоординатного целеуказателя, способного оценивать не только дальность до объекта, но и вычислять его азимут синхронно с измерением угла места. Концептуальная модель такого устройства, предлагаемого авторами настоящей статьи, показана на рис. 2, где 1 — визирная труба; 2 — лазерный дальномер; 3 —

ПЗС-приемник, передающий изображение визирного канала дальномера на экран; 4 — цифровой компас; 5 — цифровой датчик угла наклона; 6 — экран отображения визуальной информации и данных измерений; 7 — пузырьковый шаровой уровень для выверки датчика угла наклона; 8 — привод визира; 9 — поворотный столик; 10 — наблюдаемый объект.

Модель конструируется из функционально законченных готовых модулей.

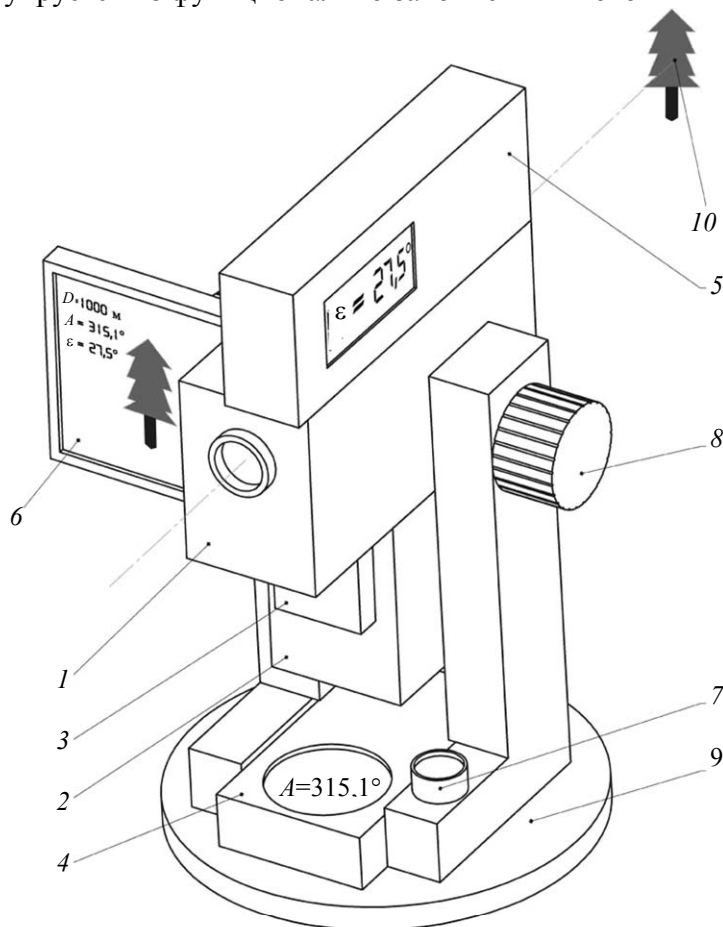


Рис. 2

В список возможных функций разрабатываемого прибора входят:

- 1) контроль окружающего пространства;
- 2) измерение дальности до объекта;
- 3) азимутальное ориентирование на местности;
- 4) определение угла места;
- 5) проведение геологических (поисково-съёмочных) маршрутов;
- 6) ориентировочное определение мест залегания выходов пластов горных пород для создания геологических карт.

Следует отметить, что ранее задачи 5, 6 решались с использованием горно-геологических компасов, которые не обеспечивают синхронное измерение угла места и дальности до объекта, а также не позволяют выполнять работы с удаленными объектами в связи с отсутствием визирной трубы.

Таким образом, предлагаемый прибор будет представлять собой многоцелевой инструмент, способный определять три координаты объекта и который можно применять как для ориентирования на местности, так и для решения специальных задач. Прибор является аналогом горно-геологического компаса с расширенными функциональными возможностями, что

делает его также и аналогом многофункциональных измерительных приборов (тахеометров, буссолей).

В модели трехкоординатного целеуказателя для определения дальности D предлагается использовать штатный импульсный лазерный дальномер (например, Yukon Extend LRS-1000), структурная схема которого представлена на рис. 3 [2]. Принцип его работы основан на измерении времени прохождения светового импульса до цели и обратно.

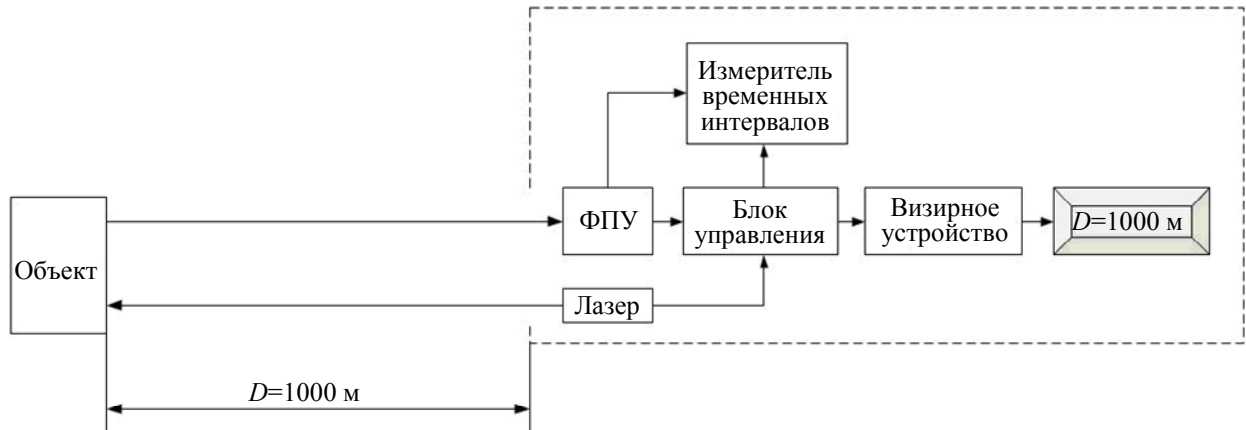


Рис. 3

Для определения азимута A в целеуказателе намечено применить готовый цифровой компас “Adrenalin DC-01” на основе магнитного энкодера. Система измерения угла поворота в нем представляет собой поворотный микромагнит (рис. 4), размещенный над однокристальной микросхемой (например, AS5030) [3].

Структурная схема цифрового компаса на основе магнитного энкодера приведена на рис. 5. Внутри микросхемы на кристалле расположены четыре датчика Холла $H_1—H_4$, которые фиксируют значения напряженности магнитных полей по двум ортогональным направлениям. Электрические сигналы датчиков H_1 и H_3 , пропорциональные напряженности магнитных полей, поступают на дифференциальный усилитель $ДУ_1$, а сигналы датчиков H_2 и H_4 — на дифференциальный усилитель $ДУ_2$. Сигналы датчиков H_1 и H_3 определяют значение синуса угла поворота микромагнита, а сигналы датчиков H_2 и H_4 — значение косинуса угла поворота.

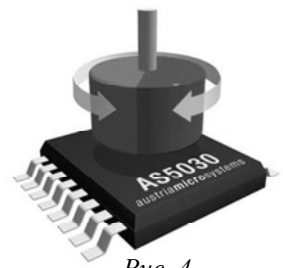


Рис. 4

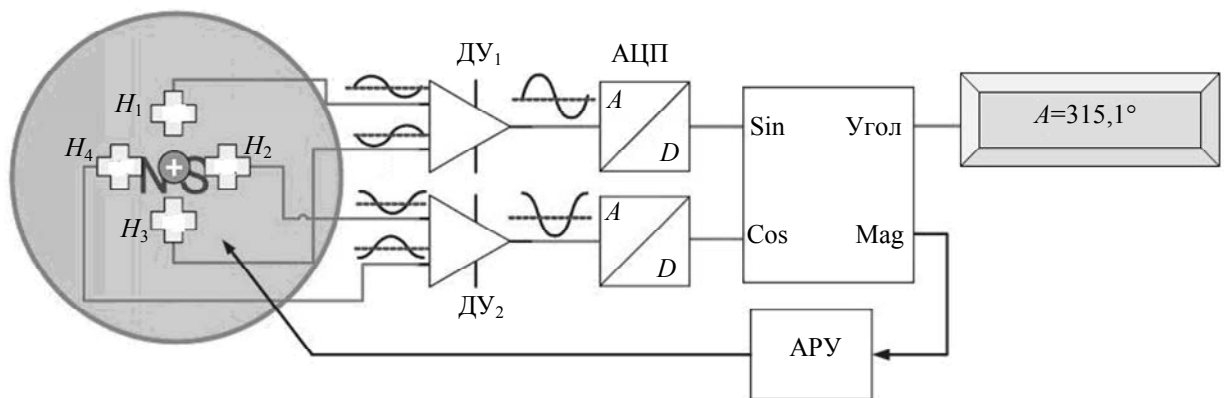


Рис. 5

Далее сигналы с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) переводятся в двоичную форму, а с помощью сигнального процессора (ЦСП) пересчитываются в абсолютный угол поворота микромагнита — азимут — по формуле $A = \arctg[(H_1 - H_3)/(H_2 - H_4)]$. Модуль автоматической регулировки усиления (АРУ), используя измеренное значение напряженности магнитного поля “Mag” (в блоке ЦСП), позволяет обеспечить компенсацию отрицательных

воздействий внешней температуры и вариаций расстояния между магнитом и микросхемой на сигналы датчиков $H_1—H_4$ [4].

Погрешность измерения азимута, приводимая в паспорте на компас, составляет 30—60' при угловой чувствительности самого энкодера 5—6'.

Для определения угла места ε объекта целесообразно использовать цифровой датчик угла наклона “S-Digit Mini”, устанавливаемый на визирную поворотную трубу. Чувствительным элементом такого датчика является двухкоординатный (в плоскости горизонта X и Y) акселерометр. Упрощенная структурная схема датчика угла наклона представлена на рис. 6.

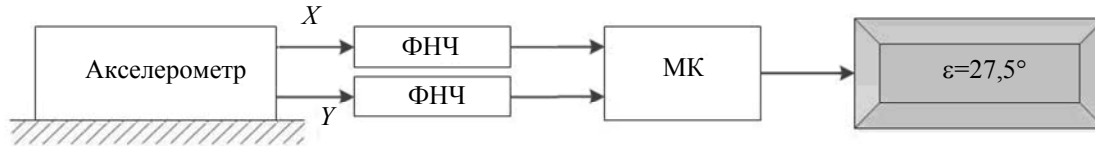


Рис. 6

Широтно-импульсные сигналы (ШИМ-сигналы) с выходов X и Y акселерометра проходят через фильтры низких частот (ФНЧ) и поступают на дискретные входы микроконтроллера (МК). Микроконтроллер с помощью соответствующих алгебраических и тригонометрических преобразований измеряет длительность и период импульсов ШИМ-сигналов, далее определяет текущий угол наклона акселерометра относительно плоскости Земли и выводит значение измеренного угла на цифровой индикатор [5]. Для начальной выверки и периодической проверки датчика угла наклона требуется наличие в устройстве шарового пузырькового уровня.

Двухкоординатный акселерометр представляет собой датчик линейного ускорения по типу, например, датчика ADXL202; его структурная схема приведена на рис. 7.

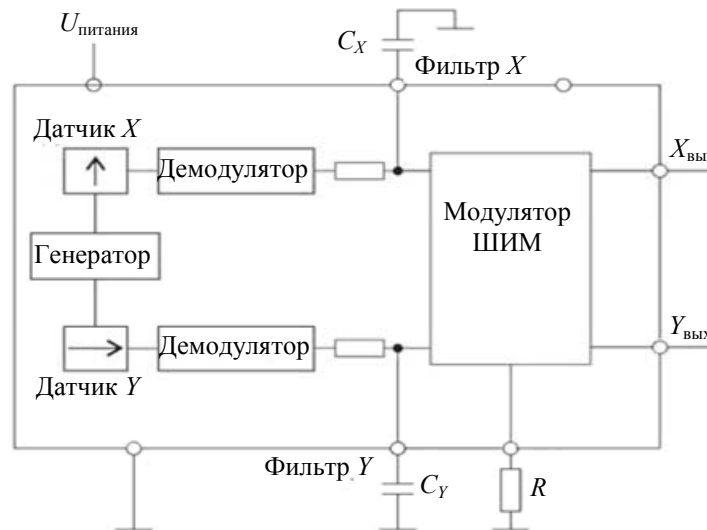


Рис. 7

Датчик линейного ускорения представляет собой совокупность дифференциальных конденсаторов, каждый из которых состоит из подвижной и неподвижной частей. Неподвижная часть является базой, относительно которой измеряется ускорение. Подвижная часть связана с неподвижной посредством полисиликоновой пружины. При приложении внешней силы подвижная часть перемещается относительно неподвижной, соответственно изменяя емкость конденсаторов. Сигнал датчика по каждой координате (X и Y) подается на контроллер обработки, который преобразует его в широтно-импульсный сигнал [6].

Функциональные возможности датчика угла наклона “S-Digit Mini” позволяют оценивать углы в вертикальной плоскости вплоть до 90° от горизонта, что является весомым достоинством при проведении целеуказаний в горных районах.

Основной проблемой при разработке оптико-электронного трехкоординатного целеуказателя остается создание конструкции визуального канала прибора с увеличением, достаточным для опознавания объекта ($3\text{—}6\times$), а также создание оптических или оптико-электронных систем ввода информации, поступающей с трех измерительных каналов, в одно поле зрения.

В результате планируется получить переносной универсальный прибор для определения координат объектов, более простой, компактный и эффективный, чем используемые в настоящее время.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Медведев А. В., Гринкевич А. В., Попов А. Г., Кисляков А. В.* Оптико-электронный наблюдательный прибор // Оптич. журн. 2002. Т. 69, № 8. С. 73—75.
2. *Старовойтов Е.* Лазерные системы для управления транспортными средствами и робототехникой // Современная электроника. 2010. № 6. С. 30—35.
3. *Щерба А.* Магнитный датчик угла поворота AS5030 производства Austriamicrosystems // Компоненты и технологии. 2007. № 4. С. 28—32.
4. *Щерба А.* Магнитные энкодеры производства Austriamicrosystems // Там же. 2008. № 7. С. 36—38.
5. *Ковшов В. Д., Хакимьянов М. И., Сакаев А. Ф.* Датчик угла наклона на основе интегрального акселерометра: реализация и исследование характеристик // Электротехнологии, электропривод и электрооборудование предприятий: Межвуз. сб. науч. статей. Уфа: Изд-во УГНТУ, 2005.
6. *Бузыкканов С.* Датчик наклона на основе твердотельного акселерометра // Современная электроника. 2004. № 12. С. 42—45.

Сведения об авторах

Михаил Борисович Леонов

— магистрант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Игорь Тимофеевич Разумовский

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: itraz@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

А. Н. ИВАНОВ, В. Е. КИРЕЕВКОВ, М. Д. НОСОВА

ДИФРАКЦИОННЫЕ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрены дифракционные методы, позволяющие определить линейные и угловые перемещения объекта. Для измерения угловых перемещений используется способ наведения на точки инверсии фазы дифракционной картины, что позволяет увеличить чувствительность измерений до $0,05''$.

Ключевые слова: дифракция, фаза, измерение.

Введение. Развитие современных технологий требует значительного увеличения точности при измерениях малых линейных и угловых перемещений. Как показывает практика, для измерения таких перемещений целесообразно использовать бесконтактные оптические методы, обладающие высокой чувствительностью, точностью и скоростью измерений. Основу оптических методов составляют явления автоколлимации, интерференции и дифракции [1—3]. Сравнительный анализ этих методов показал, что весьма перспективным направлением является применение дифракционных схем контроля, которые обладают высокой точностью при относительно простых способах их реализации. К недостаткам таких схем можно отнести сложность математической модели, описывающей их работу, что не позволяет учесть факторы, влияющие на точность контроля.

Дифракционный метод угловых измерений. Сравнительный анализ дифракционных методов контроля показал, что для проведения угловых измерений перспективно использование метода двойной дифракции на щели [4]. Достоинство этого метода заключается в увеличении точности измерения до $0,1''$ для диапазона измерения угловых перемещений, равного $\pm 1'$.

Метод двойной дифракции основан на возможности с высокой точностью определить координаты точек минимумов дифракционной картины, формируемой щелью, используя факт изменения в них знака фазы сигнала. Если совместить с точкой минимума центр второй щели, то в дифракционной картине Френеля за ней возникает характерное распределение интенсивности, по которому можно оценить величину несовпадения центра щели с точкой минимума.

Измерение угловых перемещений методом двойной дифракции может быть выполнено с помощью схемы, приведенной на рис. 1. Лазерный пучок от источника 5 направляется светоделителем 1 на щель 2 шириной a и, отражаясь от зеркала 3, установленного на расстоянии l от щели и жестко связанного с объектом измерения, вторично дифрагирует на щели. На приемнике 4 формируется измерительный сигнал, зависящий от углового положения зеркала 3. Распределение амплитуды отраженного пучка в плоскости щели описывается выражением (при условии, что $l > a^2 / \lambda$)

$$U(x) = \text{sinc}(kax / 4l), \quad (1)$$

где k — волновое число, x — координата в плоскости щели.

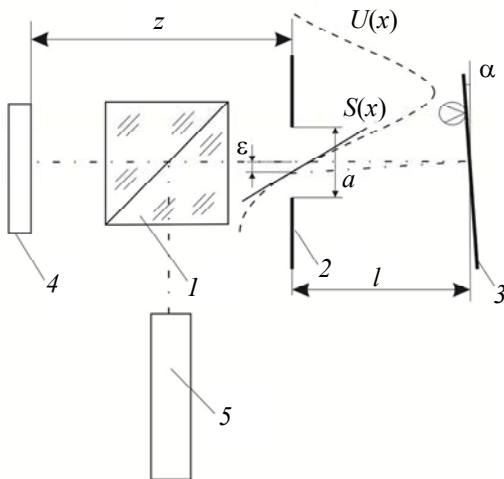


Рис. 1

В окрестности точки минимума, где $U(x) = 0$, можно, разложив выражение (1) в ряд Тейлора, получить в первом приближении линейную зависимость

$$S(x) = ax / 2Nl, \tag{2}$$

где N — порядок минимума.

При совмещении центра щели с минимумом порядка N первичной дифракционной картины распределение интенсивности сигнала на приемнике, установленном за щелью на расстоянии z в области дифракции Френеля, может быть определено из выражений

$$I(x_1) = U(x_1)\overline{U(x_1)};$$

$$U(x_1) = \left(\exp(ikz) / \sqrt{i\lambda z} \right) \int_{-a/2}^{a/2} S(x) \exp((ik(x_1 - x)^2 / 2z) dx, \tag{3}$$

где $\overline{U(x_1)}$ — комплексно-сопряженная функция, x_1 — координата в плоскости приемника.

Совместить точку минимума с центром щели можно направив излучение лазера на щель под углом $\varphi = \arctg(N\lambda / a)$, либо перемещая саму щель по координате x (при дифракции Фраунгофера дифракционная картина инвариантна смещению щели). Дифракционная картина Френеля в этом случае содержит два главных максимума, симметричные относительно центра щели (рис. 2).

Если развернуть зеркало на угол α , то точка минимума сместится относительно центра щели на расстояние $\varepsilon \approx 2l\alpha$. Тогда выражение (3) принимает вид

$$U(x_1) = \left(\exp(ikz) / \sqrt{i\lambda z} \right) \int_{-a/2}^{a/2} S(x + \varepsilon) \exp((ik(x_1 - x)^2 / 2z) dx, \tag{4}$$

и в дифракционной картине происходит перераспределение интенсивности сигнала в ее главных максимумах (см. рис. 2). По разности интенсивностей можно определить смещение ε , так как $\Delta I = (I_2 - I_1) / I_0 = f(\varepsilon)$.

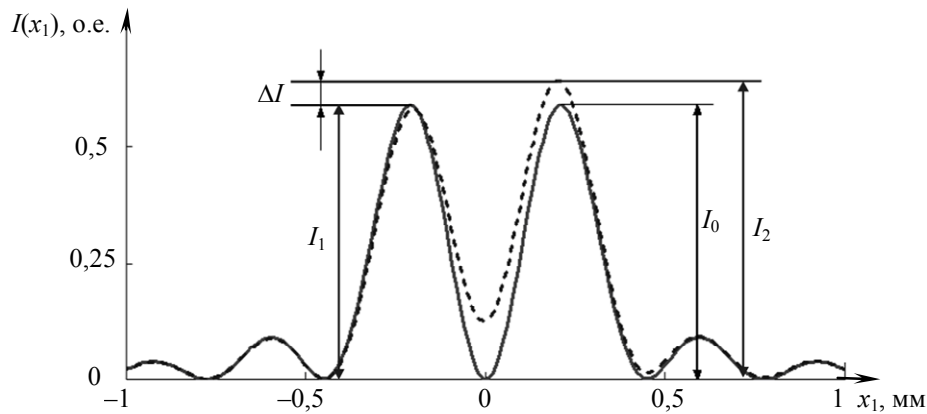


Рис. 2

Численное моделирование работы устройства, реализующего измерительную схему, при $a = 0,1$ мм, $\lambda = 0,632$ мкм, $l = 50$ мм и различных значениях z позволило получить функцию, описывающую зависимость перераспределения интенсивности на фотоприемнике от величины смещения ε точки минимума: $\Psi(z) = \delta(\Delta I(\varepsilon, z)) / \delta\varepsilon$, согласно которой эта функция возрастает с уменьшением z . Линейная область работы измерительной схемы: $\varepsilon \approx \pm a / 4 = \pm 0,025$ мм (нелинейность на краю диапазона ≈ 1 %), угловая: $\pm a / 8l = \pm 2,5 \cdot 10^{-4} \approx \pm 50''$. При $z = 20$ мм функция $\Psi(z) = 26,5$, и тогда при разрешении приемника $\Delta I = 0,002$ угловое разрешение измерителя будет $\Delta\alpha = \Delta I / 2\Psi l = 0,75 \cdot 10^{-6} = 0,15''$; при уменьшении z до 10 мм и увеличении l до 120 мм разрешение может быть увеличено до $0,05''$.

Дифракционный метод измерения расстояний. В работе [5] описываются варианты построения схем дальномеров дифракционного типа, базирующиеся на когерентно-оптическом методе формирования параллактического треугольника. Анализ погрешности измерения расстояния z от выходной щели дифракционного измерителя до контролируемого объекта показывает, что основные ее составляющие — это погрешность измерения расстояния между характерными точками дифракционной картины и погрешность задания ширины дифракционной марки (щели): $\delta z/z = \delta X/X + \delta a/a$. Погрешность $\delta X/X$ может быть уменьшена до 0,02 % при использовании соответствующего алгоритма обработки дифракционной картины [4, 6]. Уменьшение погрешности $\delta a/a$ до значения, меньшего чем 0,2 %, сопряжено с большими трудностями. В этой связи была разработана схема дифракционного измерителя расстояний, позволяющая устранить влияние погрешности $\delta a/a$ на погрешность δz .

Предлагается способ регистрации фотоприемником 3 двух дифракционных картин на щели 2 шириной a при ее исходном положении и смещении на величину Δ в направлении распространения лазерного излучения от источника 1 (рис. 3). Если X_1 и X_2 — расстояния между минимумами одного порядка для этих дифракционных картин, то расстояния z_1 и $z_2 = z_1 - \Delta$ могут быть выражены отношением

$$X_1/z_1 = X_2/z_2 = X_2/(z_1 - \Delta), \quad (5)$$

отсюда расстояние z_1 определяется как

$$z_1 = X_1 \Delta / (X_1 - X_2). \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что погрешность измерения $\delta z_1/z \approx \delta \Delta/\Delta$.

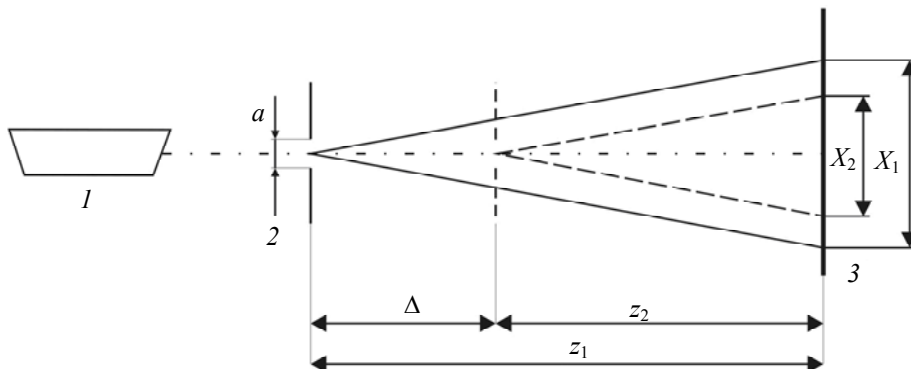


Рис. 3

Современные линейные трансляторы NANO позволяют перемещать объект на расстояние до 100 мм с предельной погрешностью не выше 0,5 мкм, что обеспечивает минимизацию влияния погрешности перемещения щели до 0,0005 %.

Экспериментальные исследования. Для экспериментальной проверки принципа работы дифракционного углового измерителя был собран макет на базе оптической скамьи ОСК-2 при следующих параметрах измерителя: $l=60$ мм, $a=0,2$ мм, $z=60$ мм, $\lambda=0,632$ мкм. В качестве приемника использовалась ПЗС-камера ЭВС VEI-535 с разрешением 1280×960 пкс и диагональю $1/2''$. Для поворота зеркала был применен клиновинтовой механизм с чувствительностью порядка $0,005'$. Численная модель дифракционной картины при $\varepsilon=0$ и экспериментально полученные дифракционные картины при $\alpha=0$ и α , равном $0,25'$ и $0,5'$, приведены на рис. 4, $a—z$ соответственно.

Макет установки для измерения положения объекта также был собран на базе оптической скамьи. Спектральная щель с шагом раскрытия 1 мкм устанавливалась на линейный

транслятор и перемещалась на 100 мм с предельной погрешностью 10 мкм, что обеспечивало предельную погрешность $\delta\Delta/\Delta$, сопоставимую с погрешностью $\delta X/X$. Объектом, до которого измерялось расстояние, служил ПЗС-приемник VEI-535.

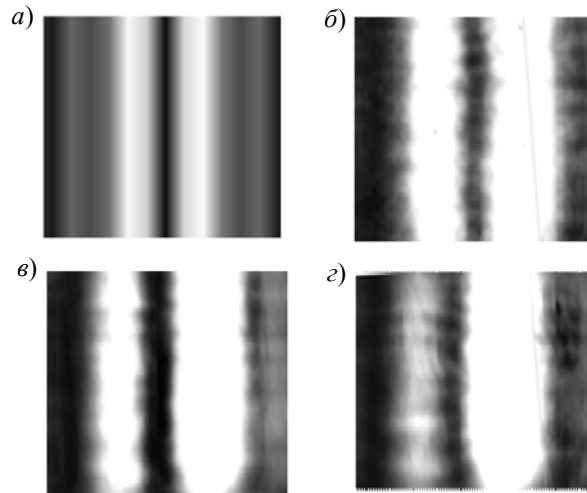


Рис. 4

Дифракционные картины регистрировались в области порядков минимума $N > 5$, расстояние X измерялось как $X = 4T$, где T — период дифракционных полос. Для более точного измерения X был применен метод наименьших квадратов. Сечения дифракционных картин приведены на рис. 5. Экспериментально полученное значение расстояния z_1 составило 603,5 мм при начально заданном $z_1 = 600$ мм.

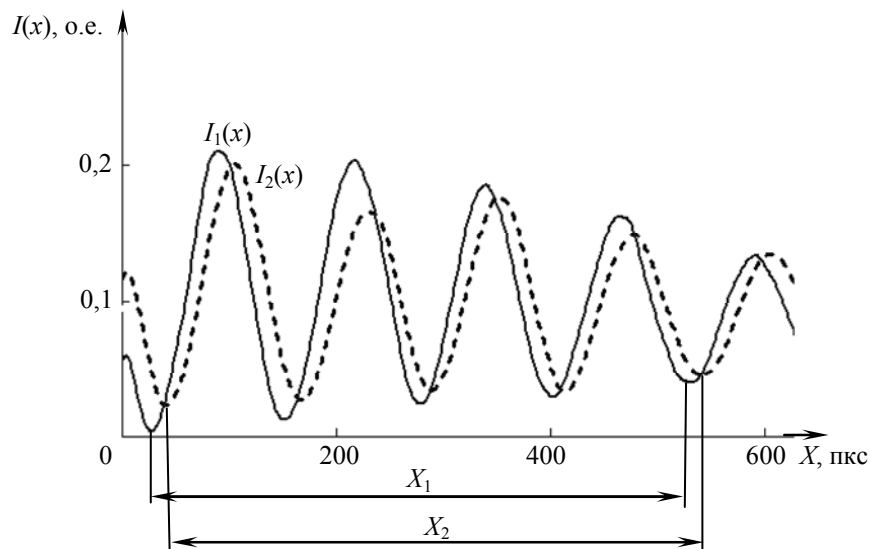


Рис. 5

Заключение. Использование предложенных дифракционных методов контроля линейных и угловых величин позволяет добиться увеличения чувствительности и точности измерений при относительно несложной измерительной схеме. Изменяя конструктивные параметры измерителя, можно в широких пределах изменять диапазон и точность измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аникст Д. А., Константинович К. М., Меськин И. В. и др. Высокоточные угловые измерения. М.: Машиностроение, 1987.
2. Кортаев В. В., Прокофьев А. В., Тимофеев А. Н. Оптико-электронные преобразователи угловых и линейных перемещений: Учеб. пособие. СПб: СПбНИУ ИТМО, 2012. Ч. 1.

3. *Козыцкий В. А., Корольков В. И., Соколов Ю. М.* Оптоэлектронные дифракционные датчики малых угловых перемещений // Фотоника. 2011. Т. 25, № 1. С. 16—19.
4. *Линьков А. Е., Назаров В. Н.* Дифракционные методы контроля геометрических параметров и пространственного положения объектов // Оптич. журн. 2002. Т. 69. № 2. С. 76—81.
5. *Назаров В. Н.* Исследование оптической системы обработки информации $[\hat{F} - \hat{\Phi}]$ для дифракционных измерений: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Л.: ЛИТМО, 1978.
6. *Иванов А. Н.* Контроль геометрических параметров объекта по положению точек перегиба дифракционной картины Фраунгофера // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 11. С. 49—53.

Сведения об авторах

- Александр Николаевич Иванов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: i_off@mail.ru
- Валерий Евгеньевич Киреев** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов
- Марьяна Дмитриевна Носова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: crazygirl1703@gmail.com

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

И. Н. ИВУКИН, А. Ю. БЕЛОВ, В. Е. БУГРОВ, А. Р. КОВШ,
М. А. ОДНОБЛЮДОВ, А. Е. РОМАНОВ

ОПТИМИЗАЦИЯ РАДИАТОРА РЕТРОФИТНОЙ СВЕТОДИОДНОЙ ЛАМПЫ

Исследовано влияние формы радиаторов из теплопроводящих пластиков на теплоотвод ретрофитной лампы. Приведены результаты численного моделирования свободно-конвективного течения газа вокруг радиатора и теплообмена в частях системы теплоотвода.

Ключевые слова: светодиоды, тепловой режим, радиаторы, ретрофитные лампы.

Введение. Обеспечение теплового режима светодиодных ламп является ключевым фактором, позволяющим повысить их эффективность и увеличить долговечность. Это обусловлено тем, что повышение температуры активной зоны светодиода влечет за собой снижение его эффективности и сокращение времени службы.

Белые светодиоды содержат крайне уязвимый для высоких температур элемент — люминофор, который обладает эффектом термического гашения, что препятствует работе светодиода при повышении температуры. Эффект термического гашения наблюдается уже при 80—100 °С [1]. Высокие температуры приводят к ускоренной деградации люминофоров в белых светодиодах [2].

В настоящей статье представлены результаты работ по качественному и количественному исследованию влияния формы радиатора на теплоотвод ретрофитной лампы. В ходе исследований была проведена оценка эффективности теплоотвода пластиковых радиаторов ретрофитных ламп и разработаны предложения по его повышению.

Описание модели. Для корректного моделирования процесса теплообмена рассчитывалось свободно-конвективное течение газа в окрестности радиатора. Расчетная область соответствовала примерно 7 диаметрам радиатора в поперечном направлении и 20 — в продольном. Расчет параметров газовой среды осуществлялся с учетом объемных сил (сил плавучести), также был произведен совместный расчет теплообмена в твердых телах.

Ламинарное течение несжимаемой теплопроводной среды описывается системой трехмерных уравнений Навье — Стокса [3]. Для ее решения использовался метод конечных объемов, реализованный в программном комплексе ANSYS CFX. Для моделирования силы плавучести использовалось приближение Буссинеска — линейное замещение плотности газа его температурой: $\rho(T) = \rho_0(1 - \beta T)$, где β — коэффициент объемного расширения жидкости, ρ_0 — плотность газа при некоторой температуре $T_0 = 25$ °С, T — отклонение температуры от значения T_0 ; гравитационная постоянная $g = 9,8$ м/с² [4].

Расчетная область представляет собой двухкомпонентный радиатор и закрепленный на нем светодиодный модуль. Радиатор состоит из оребренного тела из теплопроводящего

пластика и алюминиевой пластины, соединяющей светодиодный модуль и радиатор (рис. 1). Значения теплопроводности λ используемых в радиаторе материалов представлены в таблице.



Рис. 1

Материал	λ , Вт/(м·К)
Алюминий	237
Теплопроводящий пластик	8
Материал светодиодного модуля	0,5

Граничное условие для величины теплового потока задается на поверхности алюминиевой пластины, расположенной под светодиодным модулем; суммарное значение теплового потока $Q=0,9$ Вт, что соответствует $Q'=3,6$ Вт для полной модели лампы. Расчет производился для одной четверти конструкции. Для плоскостей симметрии задавалось граничное условие симметрии; на выходных границах расчетной области были заданы „мягкие“ граничные условия для скорости течения газа при температуре 25 °С.

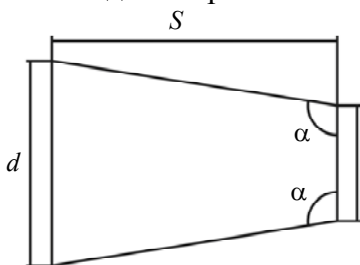


Рис. 2

Параметризация формы радиатора осуществлялась за счет изменения формы сечения межреберного пространства (см. рис. 1), имеющей вид трапеции (рис. 2).

При моделировании в качестве варьируемых были выбраны следующие параметры: d — ширина межреберного пространства на внешней границе радиатора; α — угол наклона стенок ребер радиатора; N — количество ребер радиатора.

Фиксированные геометрические параметры: $H=40$ мм — высота радиатора; $h=2$ мм — высота алюминиевой пластины; $R=29,5$ мм — радиус верхней части радиатора; $r=20,25$ мм — радиус алюминиевой пластины; $S=15,5$ мм — длина трапеции.

Огибающая радиатора представляла собой форму стандартной (60 Вт) лампы накаливания.

Результаты и их обсуждение. Максимальная разность температур в пластиковом радиаторе достигает 12 °С, при этом максимальная температура наблюдается в области, расположенной под алюминиевой пластиной, а минимальная — в наиболее удаленной от пластины части радиатора. Поперечный градиент температур в ребрах значительно меньше продольного (рис. 3).

Для оценки эффективности конвективного теплоотвода использовалось число Нуссельта, характеризующее отношение интенсивностей конвективного q_k и диффузионного q_d теплообмена, рассчитанное по следующей формуле:

$$Nu = \frac{q_k}{q_d} = \frac{qL}{(T_{ст} - T_0)\lambda_B},$$

где q — тепловой поток, $T_{ст}$ — температура стенки, L — характерный размер, $\lambda_{в}$ — теплопроводность воздуха; $T_0 = 25$ °С.

В рассматриваемой задаче число Нуссельта отражает интенсивность теплоотвода в газовую среду.

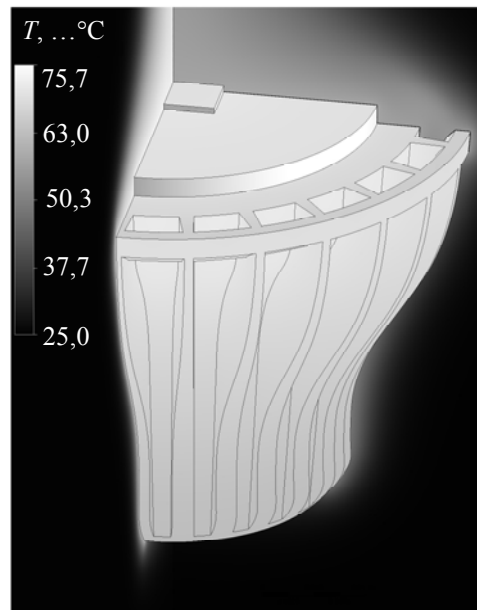


Рис. 3

Интенсивность теплоотвода с поверхности лампы, согласно числу Нуссельта, показывает, что наиболее интенсивный конвективный теплоотвод наблюдается на внешней части поверхности ребер радиатора (рис. 4).

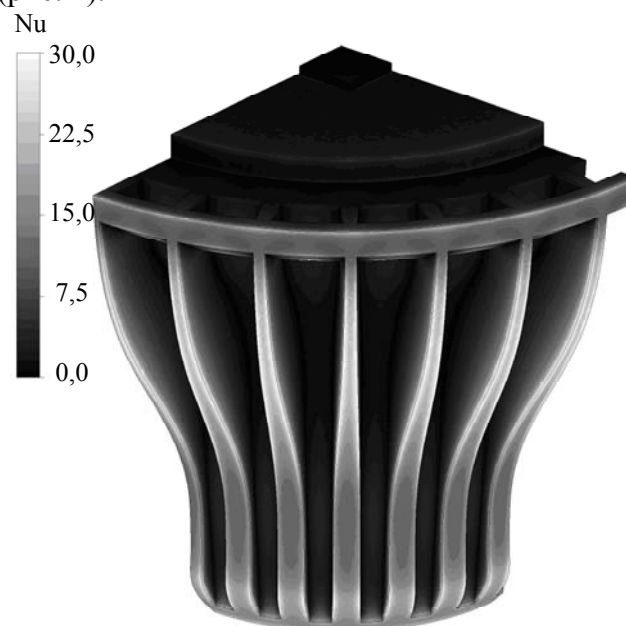


Рис. 4

Как показал сравнительный анализ распределения чисел Нуссельта при различных геометрических параметрах радиатора, определяющим фактором в свободно-конвективном теплоотводе является ширина межреберного пространства. Для обеспечения необходимого теплообмена внутри ребер достаточной является толщина ребра, равная ≈ 1 мм. (Ребра меньшей толщины не были рассмотрены ввиду сложности их изготовления в массовом производстве.)

На рис. 5 представлен график зависимости максимальной температуры радиатора от угла α наклона его ребер при $N=24$ и различной ширине межреберного пространства.

Как следствие из вышеизложенного, а также из анализа рис. 5, можно сделать вывод о том, что уменьшение межреберного пространства ведет к ухудшению конвективного теплоотвода и, следовательно, к увеличению температуры алюминиевой пластины, где расположен светодиодный модуль. Данный эффект не компенсируется увеличением теплопроводности ребер радиатора за счет увеличения их толщины.

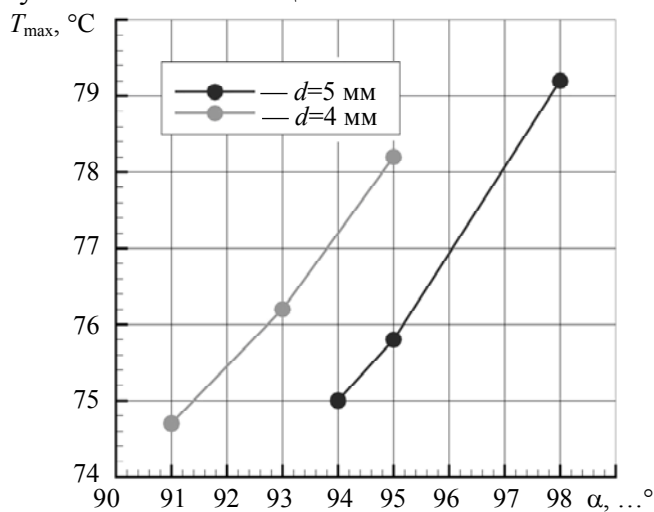


Рис. 5

Заключение. Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

— ширина межреберного пространства является ключевым фактором свободно-конвективного теплоотвода с ребер радиатора и имеет более существенное влияние на теплоотвод, чем толщина ребер;

— создание тонких ребер (≈ 1 мм) из теплопроводящего пластика не приводит к возникновению в них избыточного термического сопротивления, что позволяет использовать данные пластики для производства эффективных радиаторов;

— в радиаторах, выполненных из теплопроводящих пластиков, возникает проблема избыточного термического сопротивления вдоль радиатора, что значительно снижает качество работы его компонентов, удаленных от источника тепла; возможным решением данной проблемы может быть включение в конструкцию радиатора распределителей тепла.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования Российской Федерации в рамках комплексного проекта „Интеллектуальные системы энергоэффективного сельскохозяйственного производства в закрытом грунте с использованием светодиодного освещения“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lakshmanan A., Satheesh Kumar R., Sivakumar V., Jose M. T. Synthesis, photoluminescence and thermal quenching of YAG:Ce phosphor for white light emitting diodes // Indian J. of Pure & Applied Physics. 2011. Vol. 49. P. 303—307.
2. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008.
3. Лойцянский Л. Г. Механика жидкости и газа. М.: Дрофа, 2003.
4. Versteeg H. K., Malalasekera W. An Introduction to Computational Fluid Dynamics. Harlow, UK: Pearson Education Limited, 2007.

Иван Николаевич Ивукин

Сведения об авторах

- аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; E-mail: ivan.ivukin@optogan.com

- Александр Юрьевич Белов* — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт кристаллографии им. А. В. Шубникова РАН, Москва
- Владислав Евгеньевич Бугров* — д-р физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; исполнительный вице-президент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; заведующий кафедрой
- Алексей Русланович Ковш* — д-р физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; исполнительный вице-президент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор
- Максим Анатольевич Одноблюдов* — канд. физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; генеральный директор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор
- Алексей Евгеньевич Романов* — д-р физ.-мат. наук; ООО „Оптоган. Новые технологии света“, Санкт-Петербург; гл. науч. сотрудник; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; вед. науч. сотрудник

Рекомендована кафедрой
светодиодных технологий НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

УДК 628.9.03

К. А. Виноградова, В. Е. Бугров, А. Р. Ковш, М. А. Одноблюдов,
В. И. Николаев, А. Е. Романов

ДЕГРАДАЦИЯ БЕЛЫХ И СИНИХ СВЕТОДИОДОВ ПРИ ДЛИТЕЛЬНОМ ВРЕМЕНИ РАБОТЫ

Исследованы временные зависимости прямого падения напряжения на светодиодах, излучающих синий и белый свет, работающих длительное время, до 21 тыс. ч, на постоянном токе 20, 25 и 30 мА. Показано, что в белых светодиодах на основе силикатного люминофора с коррелированной цветовой температурой 4500 К наблюдается ускоренная деградация по сравнению со светодиодами синего света.

Ключевые слова: синий светодиод, белый светодиод, люминофор, деградация.

Понимание механизма деградации светодиодов является крайне важным для разработки новых высокоэффективных экономичных источников света. Обеспечение надежности светодиода — комплексная задача, которая включает в себя обеспечение требуемых характеристик всех элементов прибора: полупроводникового чипа, инкапсулянта, люминофора, электрических соединений. В условиях реальной эксплуатации светодиодов особенно важно обеспечить длительный срок службы всех его элементов с учетом протекающих в них физико-химических процессов, вызывающих постепенную деградацию характеристик, в частности, снижение светового потока и эффективности, а также изменение электрических параметров [1—6].

В настоящей статье представлены результаты исследований по оценке влияния концентрации люминофора в белом светодиоде на изменение электрических характеристик синего светоизлучающего чипа при длительной работе.

Объект исследований. Были исследованы семь групп светодиодов, выпущенных компанией „Оптоган“ (Санкт-Петербург), на основе чипов типоразмера $10 \times 23 \text{ mil}^2$ ($1 \text{ mil} = 25,4 \text{ мкм}$) синего света с пиковой длиной волны $\lambda = 449 \text{ нм}$. Процесс изготовления чипов описан в работе [7]. Светодиоды групп 1, 2 выполнены на основе чипов, гетероструктуры которых были выращены в ходе одного технологического процесса, и отличаются друг от друга наличием люминофора: светодиоды группы 1 не содержат люминофор. Белые светодиоды группы 2 характеризуются коррелированной цветовой температурой $\text{CCT} = 4500 \text{ К}$ ($\text{CCT} — \text{Correlated Color Temperature}$). Светодиоды групп 3—7, созданные на основе чипов, гетероструктуры которых выращивались в ходе различных технологических процессов, отличаются друг от друга концентрацией люминофора. Значения CCT для исследованных групп, измеренные в начальный момент включения устройства, и результаты изменения напряжения ΔU от начального значения по истечении 21 тыс. ч работы при различных значениях тока I приведены в таблице.

Номер группы	CCT, К	ΔU , %, при I , мА		
		20	25	30
1	—	7	6	9
2	4500	9	9	9
3	3850	1	0	1
4	4500	–4	–1	1
5	4500	–1	–1	0
6	4650	4	6	7
7	4700	0	0	1

Методика эксперимента. Каждая группа состояла из 15 образцов светодиодов, созданных в ходе следующих процессов: постановка чипа в стандартный корпус PLCC (Plastic Leaded Chip Carrier) размером $35 \times 28 \text{ мм}$, создание электрических межсоединений, инкапсуляция чипа и выводов. Каждые из пяти светодиодов были установлены на печатные платы, припаяны и подключены к источнику постоянного тока соответственно 20, 25 и 30 мА. Измерения характеристик проводились через каждые 168 ч в течение первых 3 тыс. ч работы, затем — через каждые 672 ч (один раз в месяц) до достижения 5 тыс. ч, а по истечении 5 тыс. ч — один раз в два месяца. Напряжение измерялось при помощи тестера путем приложения щупов к электрическим контактам каждого светодиода.

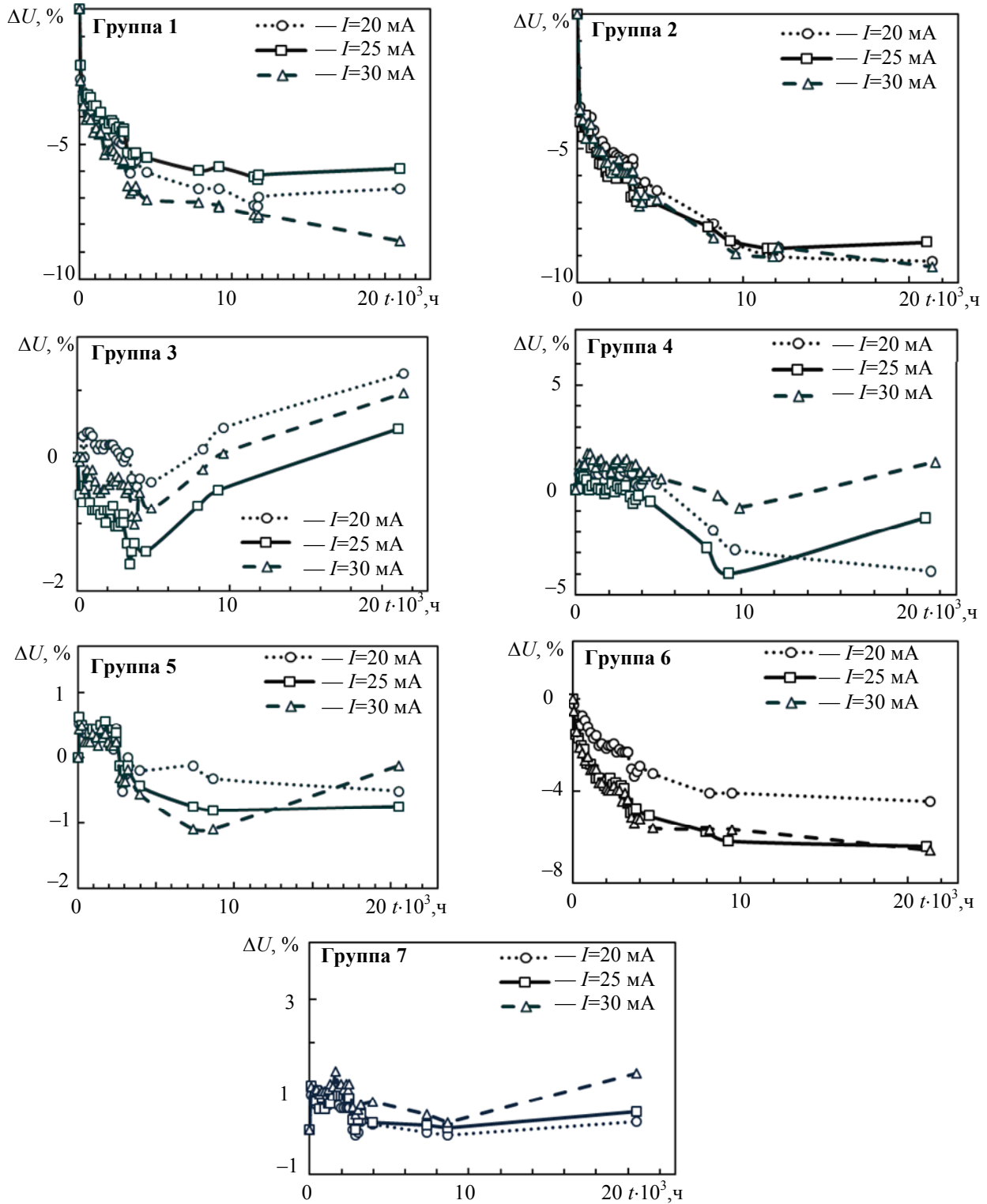
Для оценки изменения напряжения с течением времени работы светодиодов измеренные значения ΔU усреднялись по пяти образцам, работающим на одинаковом токе. Изменение напряжения от начального значения вычислялось по формулам

$$\Delta U_1 = \frac{\sum_{i=1}^5 U_{i0} - \sum_{i=1}^5 U_{i1}}{\sum_{i=1}^5 U_{i0}} \cdot 100\%, \dots, \Delta U_N = \frac{\sum_{i=1}^5 U_{i0} - \sum_{i=1}^5 U_{iN}}{\sum_{i=1}^5 U_{i0}} \cdot 100\%,$$

где $\Delta U_1, \Delta U_N$ — изменение напряжения от первоначального значения за время t работы светодиодов, равное 1 и N ч соответственно; U_{i0} — падение напряжения на i -м образце в момент первого подключения прибора; U_{i1}, U_{iN} — значения падения напряжения на i -м образце через временные интервалы $t = 1$ ч и $t = N$ ч соответственно.

Значение $\Delta U < 0$ свидетельствует о том, что падение напряжения, измеренное в момент времени t , увеличилось по сравнению с начальным значением.

Результаты и их обсуждение. На рисунке представлены результаты обработки измерений: зависимости изменения падения напряжения ΔU от времени работы светодиодов при различных значениях тока. Следует отметить разный характер кривых для исследованных групп светодиодов.



Рассмотрим графики для групп 1, 2. С увеличением времени работы значение ΔU уменьшается. На начальном участке, соответствующем 1 тыс. ч работы устройства — времени, используемому на производстве для оценки годности светодиодов и проведения теста на деградацию электрических и оптических характеристик (так называемый Life Time Test [1]),

наблюдается увеличение напряжения на 4 % в группе 1 и на 5 % в группе 2 для трех значений I . Такое изменение напряжения может быть связано либо с качеством светодиодного чипа, либо с качеством сварных соединений контактных площадок чипа и корпуса, либо с качеством припаивания светодиодов к печатной плате. Однако две последние причины должны быть исключены вследствие применения одинаковых технологических режимов для всех семи рассмотренных групп и отсутствия столь явного изменения напряжения светодиодов групп 3—7.

В светодиодах групп 1 и 2 обнаружено, что за 21 тыс. ч работы значение ΔU составило 7 и 9 % соответственно. Возможно, что наличие люминофора ведет к дополнительному нагреву чипа светодиода за счет стоксовых потерь и усугублению процесса деградации. В группах 3, 5 и 7 изменения практически отсутствуют и флуктуации связаны лишь с погрешностью прибора. Группа 6 имеет сходный с группами 1, 2 характер изменения характеристики. Изменение тока с 20 до 30 мА не оказывает существенного влияния на скорость деградации светодиодов всех рассмотренных групп.

Наиболее вероятно, что увеличение напряжения может быть обусловлено флуктуацией ширины запрещенной зоны, характерной для нитридов, высокоомностью p -слоя и паразитным падением напряжения в буферных слоях n -типа [2, 7], а также увеличением контактного сопротивления [3] и числа дефектов в полупроводниковом чипе [4]. Установить причину можно путем выявления отличий в технологических процессах при производстве светодиодных чипов и проведения дополнительных исследований. Как отмечено в работе [5], значения плотности тока, аналогичные примененным в описываемом исследовании, не оказывают сильного влияния на деградацию светодиодов. В работе [6] подтверждается факт „увеличенной“ деградации оптических свойств белых светодиодов, полученных с использованием нанесенного непосредственно на чип люминофора, вследствие более высокой температуры перехода по сравнению с белыми светодиодами, в которых люминофор расположен в отдалении от синего чипа.

Заключение. Проведенные исследования показали, что в белых светодиодах с ССТ = 4500 К в течение 21 тыс. ч работы на постоянном токе наблюдается небольшое, на 3 %, увеличение падения напряжения по сравнению с синим светодиодом, инкапсуляция которого проводилась без использования люминофора.

При тестировании светодиодов подтверждено, что временной интервал в 1 тыс. ч является достаточным для того, чтобы спрогнозировать изменение напряжения.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках контракта № 14.516.11.0085.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SSL Standards JESD22-A108D. Temperature Bias and Operating Life. 2010 [Электронный ресурс]: <<http://www.jedec.org/standards-documents/docs/jesd-22-a108c>>.
2. Шуберт Ф. Е. Светодиоды. М.: Физматлит, 2008.
3. Moon S.-M., Kwak J. S., High-current electro-optical degradation of InGaN/GaN light-emitting diodes fabricated with Ag-based reflectors // J. of Korean Phys. Society. 2009. Vol. 55, N 3. P. 1128—1131.
4. Jianzheng H. et al. Electrical, optical and thermal degradation of high power GaN/InGaN light emitting diodes // J. Phys.D: Applied Physics. 2008. Vol. 41, N 3.
5. Meneghini M. et al. Extensive analysis of the degradation of phosphor-converted LEDs // Proc. of SPIE. 2009. Vol. 7422.
6. Narendran N. et al. Solid-state lighting: failure analysis of white LEDs // J. of Crystal Growth. 2004. Vol. 268. P. 449—456.
7. Törmä P.T. et al. Maskless roughening of sapphire substrates for enhanced light extraction of nitride based blue LEDs // Solid State Electronics. 2009. Vol. 53, Iss. 2. P. 166—169.

Сведения об авторах

- Ксения Анатольевна Виноградова** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; ассистент; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН; Санкт-Петербург; ст. лаборант; E-mail: kseniia.vinogradova@gmail.com
- Владислав Евгеньевич Бугров** — д-р физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; исполнительный вице-президент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; заведующий кафедрой
- Алексей Русланович Ковш** — д-р физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; исполнительный вице-президент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор
- Максим Анатольевич Одноблюдов** — канд. физ.-мат. наук; ЗАО „Оптоган“, Санкт-Петербург; генеральный директор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор
- Владимир Иванович Николаев** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; доцент; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН; Санкт-Петербург; науч. сотрудник
- Алексей Евгеньевич Романов** — д-р физ.-мат. наук; ООО „Оптоган. Новые технологии света“, Санкт-Петербург; гл. науч. сотрудник; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра светодиодных технологий; профессор; Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург; вед. науч. сотрудник

Рекомендована кафедрой
светодиодных технологий НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И МОНИТОРИНГ

УДК 681.2

М. В. БЕДНОВА, Л. А. КОНОПЕЛЬКО

АТТЕСТАЦИЯ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ ПОВЕРОЧНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРНОГО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОГО РЕФРАКТОМЕТРА

Рассматривается применение лазерного интерференционного рефрактометра „ЛАЗИР-2МК“ для аттестации стандартных образцов поверочных газовых смесей. Описываются принцип действия и оптическая схема рефрактометра.

Ключевые слова: лазерный интерференционный рефрактометр, стандартный образец, оптическая схема.

Количественное определение состава газовых смесей — одна из актуальных задач аналитических измерений, имеющая важное значение в различных сферах деятельности человека — начиная от промышленных производств (в частности, при поверке и градуировке промышленных газоанализаторов, выпуске поверочных газовых смесей) и заканчивая проблемами здравоохранения (при определении предельно допустимых концентраций опасных веществ в атмосфере, воздухе рабочей зоны). При этом важно, чтобы анализ производился с высокой степенью достоверности и не требовал больших временных затрат. Другое, не менее важное требование заключается в том, чтобы при косвенном определении количественного состава газовой смеси измеряемый параметр был тесно связан с концентрацией определяемого компонента.

Требования к метрологическим характеристикам государственных стандартных образцов составов газовых смесей 1-го и 2-го разряда, находящихся в баллонах под давлением, приведены в ГОСТ 8.578-2008 [1] и ТУ 6-16-2956-92 [2].

На предприятиях, осуществляющих выпуск стандартных образцов газовых смесей 1-го и 2-го разряда, основным компонентом которых являются CH_4 , C_3H_8 , H_2 , Ar , N_2 , для аттестации бинарных стандартных образцов используется автоматический лазерный интерференционный рефрактометр „ЛАЗИР-2МК“.

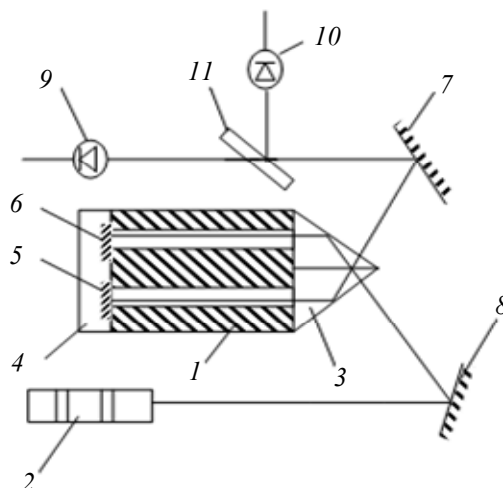
Диапазон концентраций определяемого компонента, измеряемых с помощью интерференционного рефрактометра, составляет от 0,1 до 99,9 % без перенастройки и смены фотоприемников. Объемный расход газа при однократном измерении — не более 10^{-3} м^3 , а длительность цикла не превышает 3 мин.

Принцип действия прибора основан на определении смещения интерференционной картины при изменении показателя преломления газа, заполняющего рабочую кювету.

Конструкция прибора включает в себя оптико-механический и газораспределительный блоки, персональный компьютер со встроенным в системный блок модулем сбора аналоговой информации. Газораспределительный блок обеспечивает возможность поочередной подачи

сравнительного и анализируемого газа в рабочую кювету, контроля объемного расхода газа, подсоединения рабочей кюветы и отсоединения ее от линии сброса. Управление процессом измерений и обработка информации осуществляются с помощью компьютера по программе „Рефрактометр“, которая позволяет производить многократные измерения концентрации, запоминать их результаты, формировать и выдавать итоговый протокол.

Оптическая схема лазерного интерференционного рефрактометра „ЛАЗИР-2МК“ приведена на рисунке.



В качестве источника монохроматического света в приборе используется He—Ne-лазер типа ЛГН-2071-2Р с длиной волны излучения $\lambda=0,632991$ мкм. Излучение лазера 2 при помощи зеркала 8 направляется в двулучевой интерферометр 1. Интерферометр представляет собой моноблок из ситалла, в котором просверлены два канала, образующие кюветы — измерительную (рабочую) и сравнительную. На одном конце моноблока закреплена светоделительная призма Кестерса 3, а на другом — отражательный блок 4 с двумя зеркалами 5 и 6 для каждой кюветы. Пройдя через призму, поток излучения делится на два световых пучка — измерительный и опорный. Опорный пучок направляется на зеркало 5, а измерительный — на зеркало 6 отражательного блока. Отражаясь от зеркал, световые потоки вновь направляются на призму Кестерса 3, смешиваются и образуют интерференционную картину. Интерференционная картина при помощи зеркала 7 и светоделительной пластинки 11 регистрируется двумя фотоприемниками 9 и 10 типа ФД - 256.

Таким образом, световые пучки дважды проходят опорную и измерительную кюветы. Если в последней происходит процесс замещения газовой смеси с показателем преломления n_1 другой газовой смесью с показателем n_2 , то в плоскости фотоприемников наблюдается перемещение интерференционных полос. Регистрация смещения интерференционной картины осуществляется с точностью до 1/100 интерференционной полосы.

Измеряемая величина — объемная доля (концентрация C) компонента A в анализируемой газовой смеси, состоящей из компонентов A и B , определяемая выражением

$$C_A^a = C_A^{cp} \pm \frac{100\lambda P_0 T (N_a - N_{cp})}{2L_p (n_B - n_A) P T_0},$$

где C_A^a и C_A^{cp} — объемные доли компонента A в анализируемом и сравнительном газе, %; $L_p = 249100$ мкм — длина рабочей кюветы; $P_0 = 101,3$ кПа — атмосферное давление при нормальных условиях; P — атмосферное давление при проведении анализа; $T_0 = 273,2$ К — температура газа при нормальных условиях; T — температура газа при проведении анализа;

n_A и n_B — показатели преломления чистых газов A и B при λ , P_0 , T_0 ; N_a и N_{cp} — число интерференционных полос при заполнении рабочей кюветы анализируемым и сравнительным газом.

Знак „+“ перед вторым членом приведенной формулы получается при $N_a > N_{cp}$, знак „-“ — при $N_a < N_{cp}$. При отсутствии компонента A в сравнительном газе $C_A^{cp} = 0$.

Длина рабочей кюветы для конкретного экземпляра прибора измеряется с высокой точностью путем сравнения с концевой мерой длины 1-го разряда. Абсолютная погрешность измерения величины L_p составляет 0,3 мкм, относительная погрешность не более $0,6 \cdot 10^{-5} \%$. Относительная погрешность оценки расчетных значений показателей преломления чистых газов составляет менее $6 \cdot 10^{-3} \%$.

Для измерения температуры в рабочем пространстве в прибор может быть встроен малогабаритный цифровой термометр с термопреобразователем типа ТСМ-50, аттестованным в диапазоне рабочих температур от 0 до 50 °С с погрешностью 0,1 °С.

Прибор „ЛАЗИР-2МК“ работает при атмосферном давлении, т.е. при уравнивании давления в измерительной кювете с атмосферным. Измерение давления может проводиться с помощью образцового цифрового барометра типа БОП-1 с предельной погрешностью, не превышающей 10 Па, относительная погрешность при этом составляет $1 \cdot 10^{-2} \%$.

Таким образом, как видно из анализа приведенной формулы, погрешность измерения концентрации определяется в основном внешними условиями. Проверка границ погрешности измерений показала, что исходя из оценок составляющих погрешностей и анализа приведенной формулы можно определить границы абсолютной погрешности при аттестации двухкомпонентных газовых смесей. Для некоторых наиболее часто применяемых газовых смесей расчетные данные приведены в таблице.

Компонентный состав газовой смеси (определяемый компонент/газ-разбавитель)	Диапазон концентраций определяемого компонента, %	Границы абсолютной погрешности, %
H ₂ /N ₂	0,3—1,0	± 0,02
	1,1—4,0	± 0,03
	4,1—6,0	± 0,05
	6,1—10,0	± 0,08
	10,1—20,0	± 0,20
	20,1—50,0	± 0,30
	50,1—90,0	± 0,30
H ₂ /N ₂	90,1—95,0	± 0,08
	95,1—99,2	± 0,04
CH ₄ /Ar	4,0—10,0	± 0,15
	10,1—20,0	± 0,30
CH ₄ /N ₂	10,1—20,0	± 0,20
	20,1—50,0	± 0,30
	50,1—90,0	± 0,30
	20,1—50,0	± 0,20
	50,1—99,0	± 0,20

Широкая номенклатура определяемых газовых компонентов, большой диапазон измеряемых концентраций, быстрота и точность анализа позволяют применять данный лазерный интерференционный рефрактометр для аттестации стандартных образцов состава газовых смесей 1-го и 2-го разряда, содержащихся в баллонах под давлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 8.578-2008. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах. Введ. с 01.03.2009. М.: Стандартинформ, 2008.
2. ТУ 6-16-2956-92. Смеси газовые поверочные — стандартные образцы состава; с учетом изменений № 1—7. СПб: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 2008—2011.

Сведения об авторах

- Мария Валериевна Беднова** — Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург; кафедра экологического приборостроения и мониторинга НИУ ИТМО; инженер;
E-mail: bednova@b10.vniim.ru
- Леонид Алексеевич Конопелько** — д-р техн. наук, профессор; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург; кафедра экологического приборостроения и мониторинга НИУ ИТМО;
E-mail: lkonop@b10.vniim.ru

Рекомендована кафедрой
экологического приборостроения и
мониторинга НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

УДК 389

М. В. БЕДНОВА, Л. А. КОНОПЕЛЬКО

ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ СТАНДАРТНЫХ ОБРАЗЦОВ НАРКОТИЧЕСКИХ ГАЗОВ ПРИ ПОВЕРКЕ МЕДИЦИНСКОЙ АППАРАТУРЫ

Приведено описание стандартных образцов наркотических газов, применяемых в качестве средств метрологического обеспечения газоаналитических блоков прикроватных мониторов.

Ключевые слова: прикроватные мониторы, наркотические газы, фторотан, изофлюран, севофлюран, энфлюран.

В настоящее время в медицинских учреждениях получают применение прикроватные мониторы — автоматические системы, предназначенные для регистрации и измерения параметров состояния пациента, таких как температура тела, частота пульса, частота дыхания, артериальное давление и др.

Среди контролируемых параметров состояния пациента особую значимость имеет показатель, характеризующий содержание в выдыхаемом пациентом воздухе анестетических компонентов, применяемых при операциях в качестве наркоза. Для измерения объемной доли анестетических компонентов в выдыхаемом пациентом воздухе используется газоаналитический блок, встроенный в прикроватный монитор (или подключаемый к нему). С помощью этого блока также может осуществляться и идентификация подаваемого анестетического компонента. Работа газоаналитического блока базируется на методе инфракрасной спектроскопии.

Современное широкое применение систем мониторинга, позволяющих измерить объемную долю наркотических газов в выдыхаемом пациентом воздухе при анестезии, выявило необходимость разработки средств их метрологического обеспечения.

В качестве таких средств используются стандартные образцы, созданные на основе наркотических газов и представляющие собой бинарные газовые смеси анестетических компонентов

с воздухом, находящиеся в баллонах под давлением. Стандартные образцы на основе указанных веществ должны иметь стабильные метрологические характеристики, обеспечивающие необходимую точность измерения.

К созданию стандартных образцов наркотических газов предъявляются особые требования: в частности, чистота исходных компонентов и наличие разрешения Росздравнадзора на применение их в медицинских учреждениях на территории Российской Федерации. Вещества, применяемые для наркоза, регистрируются в реестре лекарственных средств РФ. Данные о чистоте анестетических компонентов приводятся в соответствующих фармакопейных статьях — нормативно-технических документах, в которых устанавливаются требования к способам приготовления и качеству лекарственного сырья или средства, его упаковке, условиям и сроку хранения, методам контроля качества, а также указывается название лекарственного сырья как на русском, так и на латинском языке (при этом латинское название выполняет функцию международного названия). Фармакопейная статья утверждается уполномоченным федеральным органом исполнительной власти и носит характер государственного стандарта.

В современной медицине в качестве применяемых при наркозе анестетических компонентов, соответствующих указанным требованиям, используются следующие вещества: закись азота, ксенон, фторотан (галотан), энфлуран, изофлуран, севофлуран, десфлуран.

Во Всероссийском НИИ метрологии им. Д. И. Менделеева (Санкт-Петербург) разработаны шесть стандартных образцов наркотических газов, находящихся в баллонах под давлением. Эти образцы, выполняющие согласно ГОСТ 8.578-2008 [см. лит.] функцию рабочего эталона 1-го разряда, соответствуют Государственному первичному эталону единицы молярной доли и массовой концентрации компонентов в газовых средах (ГЭТ-154). Использование разработанных стандартных образцов позволяет при измерении объемной доли анестетического компонента в воздухе обеспечить относительную погрешность, не превышающую 6 %.

Новые стандартные образцы наркотических газов имеют широкое применение при поверке прикроватных мониторов и других средств измерения, используемых в медицине, а также при контроле метрологических характеристик медицинской аппаратуры в процессе ее эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

ГОСТ 8.578-2008. Государственная поверочная схема для средств измерений содержания компонентов в газовых средах. Введ. с 01.03.2009. М.: Стандартинформ, 2008.

Сведения об авторах

- Мария Валериевна Беднова** — Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург; кафедра экологического приборостроения и мониторинга НИУ ИТМО; инженер;
E-mail: bednova@b10.vniim.ru
- Леонид Алексеевич Конопелько** — д-р техн. наук, профессор; Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург; кафедра экологического приборостроения и мониторинга НИУ ИТМО;
E-mail: lkonop@b10.vniim.ru

Рекомендована кафедрой
экологического приборостроения и
мониторинга НИУ ИТМО

Поступила в редакцию
07.02.13 г.

SUMMARY

P. 7—10.

INFORMATION LOSSES UNDER FIELD TRANSFORMATION IN OPTICAL PATH OF AN OPTOELECTRONIC INSTRUMENT

Loss in normalized entropy of spatial distribution of radiation flux in optical path of an optoelectronic instrument with matrix photo-detector is considered.

Keywords: loss in information, transformation of optical information field.

Data on authors

- Elena N. Zvereva* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Senior Lecturer
- Evgeny G. Lebedko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: eleb@rambler.ru
- Phi Huang Tung* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems

P. 11—14.

INVESTIGATION OF IRRADIANCE OF VIGNETTED IMAGE IN AUTOCOLLIMATION SYSTEM WITH THE USE OF COMPUTER MODELING

Specific features of image vignetting in autocollimation system are analyzed. Algorithmic methods of compensation for systematic error are considered. Basic principles of a computer model developed with the use of computer simulation.

Keywords: autocollimation, swing angle measurement, computer modeling, vignetting error.

Data on authors

- Andrey A. Smekhov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: myfearismyblue@gmail.com
- Igor A. Konyakhin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: igor@grv.ifmo.ru

P. 15—20.

OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM FOR RAPID ANALYSIS OF MINERAL RAW MATERIALS BY COLOR SORTING METHOD

Principles of design of optical-electronic system for mineral raw materials rapid analysis are considered. Experimental results are presented to confirm the efficiency of the developed system application in mining industry.

Keywords: optical-electronic system, color sorting, optical sorting, rapid analysis, ore dressing.

Data on authors

- Artem A. Alekhin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: temka-pk@mail.ru
- Elena V. Gorbunova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: vredina_ia@mail.ru
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Head of the Department; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Alexander M. Olkhovskiy* — JSC “Research and Production Enterprise “GeoTestService”, Moscow; General Director Deputy; E-mail: a_olh@mail.ru
- Darya B. Petukhova* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: petuxovadarja@yandex.ru
- Alexander N. Chertov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: a.n.chertov@mail.ru

P. 21—25.

SYNTHESIS OF REFLECTORS FOR THREE-DIMENSIONAL ANGULAR AUTOCOLLIMATORS WITH SUPERPOSED MATRIX DETECTORS

A method is proposed for calculation of trihedral mirror parameters to be used as reflectors in a simple-structure autocollimator for measurement of three angular coordinates. Examples of calculated reflector parameters for three-coordinate measurements are presented and discussed.

Keywords: autocollimator, three-dimension angular measurements, trihedral mirror reflector, invariant axis.

Data on authors

- Alexey I. Konyakhin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: aligkon@yandex.ru
- Feodor V. Molev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems
- Alexander N. Timofeev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: timofeev@grv.ifmo.ru

P. 26—29.

ALGORITHMS OF SMOKE-BLACKENED IMAGE FILTERING

The problem of reduction of smoke-induced defects of images in wildfire detection and monitoring system is considered. Comparative analysis of various filtering algorithms applied to smoke-blackened images is carried out.

Keywords: image filtering, smoke reduction, optical-electronic system, forest fire detection and monitoring system, television camera.

Data on authors

- Alexander S. Vasilyev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: yoshikawa06@gmail.com
- Andrey V. Krasnyashchikh* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: crus@mail.ru
- Oleg Yu. Lashmanov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: o.lashmanov@gmail.com

P. 29—32.

OPTICAL-ELECTRONIC SYSTEM FOR CONTROL OVER POSITION OF PISTON IN THE VALVE

Principles of construction of an optical-electronic system for control over transversal displacement of piston in the valve are described. Results of laboratory tests of the system are presented.

Keywords: optical-electronic system, noncontact measurement, image analysis, control of movements.

Data on authors

- Alexey A. Gorbachev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: gorbachev@grv.ifmo.ru
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Head of the Department; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Ekaterina N. Pantiushina* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: enkuleshova@mail.ru

P. 33—38.

EFFECTIVENESS OF ALGORITHMS OF GENERATION AND PROCESSING OF INTERFRAME DIFFERENCE SIGNAL IN OBJECT DETECTION UNDER COMPLEX OBSERVATION CONDITIONS

An algorithm combining procedures of interframe and frame-by-frame analysis of signals in automated system of moving objects monitoring under complex observation conditions is studied. Results of statistical modeling are presented to demonstrate the developed algorithm efficiency.

Keywords: interframe difference signal, spatial filtering, signal accumulation, measurement area, virtual model, detection characteristics, parameters optimization.

Data on authors

- Andrey L. Andreev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: and-andr@yandex.ru

Aleksandra P. Varatkova — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: varatkova@mail.ru

P. 39—47.

TELESCOPIC LENS WITH AFOCAL DOUBLE-MIRROR OPTICAL ATTACHMENT

Replacement of a convex reflecting surface in afocal system of two spherical mirrors with a plane-convex mirror with internal reflection is shown to allow for compensation for residual spherical aberration of the image at a small residual deviation from isoplanatism conditions. Combination of two-component telescopic lens with the afocal attachment makes it possible to ensure plane-anastigmatic image correction.

Keywords: reflecting surface, afocal attachment, isoplanatism conditions, spherical aberration.

Data on authors

Viktor A. Zverev — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: post_vaz@rambler.ru

Galina V. Karpova — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics

Irina N. Tymoshchuk — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design; E-mail: tim_ir@rambler.ru

P. 47—50.

WAVE ABERRATION OF THE POINT SOURCE IMAGE AT THE CENTRAL SHIELDING OF ENTRANCE PUPIL

Conditions are defined under which wave aberration for both extreme rays at an entrance pupil of optical system and rays at the beam shielded part border equal zero. The conditions fulfillment is shown to reduce considerably residual wave aberration of the point source image.

Keywords: wave aberration, point source image, exit pupil, central shielding.

Data on authors

Elena V. Ermolaeva — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: ermolena@yandex.ru

Viktor A. Zverev — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: post_vaz@rambler.ru

Irina N. Tymoshchuk — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design; E-mail: tim_ir@rambler.ru

P. 50—54.**ALTERNATIVE SCHEMATICS OF REFLECTION OPTICAL SYSTEM WITH SPHERICAL MAIN MIRROR**

Alternative variants of reflection system based on an afocal assembly of two reflecting surfaces are analyzed. The schematics under consideration are obtained by transformation of Cassegrain and Gregory mirror systems.

Keywords: reflection system, reflecting surface, afocal system.

Data on authors

- Elena V. Ermolaeva* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: ermolena@yandex.ru
- Viktor A. Zverev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: post_vaz@rambler.ru
- Julia A. Podgornykh* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: julijapdg@gmail.com

P. 55—61.**CALCULATION METHOD FOR DESIGN OF CONCENTRIC MIRROR, MIRROR-LENS, AND LENS SYSTEMS**

On the base of requirement of spherical and chromatic aberration correction, formulas defining overall dimensions and structural parameters of an optical system with concentric refracting and reflecting surfaces are derived. Relations used to specify the optimal choice of material for lens elements are also obtained.

Keywords: aplanatic catadioptric lens, concentric lens, concentric achromatic lens, optimal installation plane.

Data on author

- Anna S. Kovaleva* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: anyuta_kov@mail.ru

P. 62—65.**AUTOMATION OF DATA PROCESSING IN OPTICAL SYSTEM TESTING WITH HARTMANN TECHNIQUES**

The problem of automatic processing required by Hartmann method of optical system testing is discussed. The stage of scattering spots separation is considered; algorithms developed for spots location are presented.

Keywords: Hartman method, hartmanogramm, separation, location.

Data on authors

- Vladimir E. Maliutin* — Master Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: scordion@mail.ru
- Nadezhda D. Tolstoba* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Applied and Computer Optics;
E-mail: nadinet@mail.ru
- Edward V. Emelyanov* — Cand. Techn. Sci.; Special Astrophysical Observatory of RAS, Observations Support Laboratory, Nizhniy Arkhyz, Karachai-Cherkessian Republic; Scientist; E-mail: eddy@sao.ru
- Grigory V. Yakopov* — Cand. Techn. Sci.; Special Astrophysical Observatory of RAS, BTA Technical Support Team, Nizhniy Arkhyz, Karachai-Cherkessian Republic; Senior Scientist;
E-mail: yakopov@sao.ru

P. 66—72.

METHODS OF LENS CENTERING IN OPTICAL SYSTEMS

The causes affecting lens centering in objectives are considered. Technological and constructional methods to compensate the resulting effect on image quality are analyzed.

Keywords: lens centering in optical systems, compensation for lens decentering.

Data on authors

- Svyatoslav M. Latyev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design; Head of the Department; E-mail: smlatyev@yandex.ru
- Buy Din Bao* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design

P. 73—77.

CONCEPTUAL MODEL OF THREE-COORDINATE OPTOELECTRONIC DESIGNATOR

Conception of three-coordinate optoelectronic designator development is discussed. Application of ready-made electronic sensors is shown to ensure a significant increase in the speed of measurement, while the device dimensions are decreased and development and production cost is reduced.

Keywords: designators, topographic instruments, tachometers, range finders, encoders, tilt sensors.

Data on authors

- Mikhail B. Leonov* — Master Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design
- Igor T. Razumovskiy* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design; E-mail: itraz@rambler.ru

P. 78—82.

DIFFRACTION METHODS FOR CONTROL OF OBJECT POSITION

Diffraction methods adapted for measurement of object linear and angular movements are proposed. The phase inversion points are used for angle measurement, which allows for improvement in measurement sensitivity up to 0,05".

Keywords: diffraction, phase, measurement.

Data on authors

- Alexander N. Ivanov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design; E-mail: i_off@mail.ru
- Valery E. Kireyankov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design
- Mariana D. Nosova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Devices Computerization and Design; E-mail: crazygirl1703@gmail.com

P. 83—87.

OPTIMIZATION OF RETROFIT LED LAMP RADIATOR

Effect of radiator shape on retrofit LED lamp heat sink is studied. Results of computer simulation of free convective gas flow in the radiator vicinity and of heat exchange in heat sink system elements are presented.

Keywords: light emitting diodes, heat regime, radiator, retrofit lamp.

Data on authors

- Ivan N. Ivukin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies; CJSC Optogan; St. Petersburg; E-mail: ivan.ivukin@optogan.com
- Alexander Yu. Belov** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; A.V. Shubnikov Institute of Crystallography of RAS, Moscow
- Vladislav E. Bougrov** — Dr. Phys.-Math. Sci.; CJSC Optogan; St. Petersburg; Executive Vice-President; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies; Head of the Department
- Alexey R. Kovsh** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; CJSC Optogan; St. Petersburg; Executive Vice-President; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies
- Maxim A. Odnoblyudov** — Cand. Phys.-Math. Sci., Professor; CJSC Optogan; St. Petersburg; General Manager; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies
- Alexey E. Romanov** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; OJSC Optogan NTL, St. Petersburg; Chief Scientist; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies; Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, St. Petersburg; Leading Researcher

P. 87—91.

DEGRADATION OF WHITE AND BLUE LEDS AT PROLONGED OPERATION TIME

Time dependences of forward voltage drop in blue and white LEDs operating at 20, 25, and 30 mA during 21,000 hours are investigated. White LEDs based on a silicate phosphor with CCT of 4500 K is shown to enhanced degradation.

Keywords: blue LED, white LED, phosphor, degradation.

Data on authors

- Kseniya A. Vinogradova** — Master of Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies; Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, St. Petersburg; Senior Laboratory Assistant; E-mail: ksenia.vinogradova@gmail.com
- Vladislav E. Bougrov** — Dr. Phys.-Math. Sci.; CJSC Optogan; St. Petersburg; Executive Vice-President; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies; Head of the Department
- Alexey R. Kovsh** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; CJSC Optogan; St. Petersburg; Executive Vice-President; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies
- Maxim A. Odnoblyudov** — Cand. Phys.-Math. Sci., Professor; CJSC Optogan; St. Petersburg; General Manager; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies
- Vladimir I. Nikolaev** — Cand. Phys.-Math. Sci., St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies; Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, St. Petersburg; Researcher
- Alexey E. Romanov** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; OJSC Optogan NTL, St. Petersburg; Chief Scientist; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Light Diode Technologies; Ioffe Physical-Technical Institute of RAS, St. Petersburg; Leading Researcher

P. 92—95.**CERTIFICATION OF REFERENCE SAMPLES OF CALIBRATION GAS MIXTURES WITH LASER INTERFEROMETRIC REFRACTOMETER**

Application of laser interferometric refractometer “LAZIR-2MK” for reference materials - calibration gas mixtures attestation is considered. Principle of the refraktometer operation is described; optical schematic of the instrument is presented.

Keywords: laser interferometric refractometer, standard sample, optical schematic.

Data on authors

- Maria V. Bednova*** — All-Russia D. I. Mendeleev Scientific and Research Institute for Metrology, St. Petersburg; Engineer; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Environmental Instrument-Making and Monitoring; E-mail: bednova@b10.vniim.ru
- Leonid A. Konopelko*** — Dr. Techn. Sci., Professor; All-Russia D. I. Mendeleev Scientific and Research Institute for Metrology, St. Petersburg; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Environmental Instrument-Making and Monitoring; E-mail: lkonop@b10.vniim.ru

P. 95—96.**APPLICATION OF NEW REFERENCE SAMPLES OF ANESTHETIC GASES FOR VERIFICATION OF MEDICINE APPARATUS**

Reference samples of anesthetic gases applied for metrological maintenance of gas analysis units of bedside monitors are described.

Keywords: bedside monitor, anesthetic gas, ftorotan, isoflurane, sevoflurane, enflurane.

Data on authors

- Maria V. Bednova*** — All-Russia D. I. Mendeleev Scientific and Research Institute for Metrology, St. Petersburg; Engineer; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Environmental Instrument-Making and Monitoring; E-mail: bednova@b10.vniim.ru
- Leonid A. Konopelko*** — Dr. Techn. Sci., Professor; All-Russia D. I. Mendeleev Scientific and Research Institute for Metrology, St. Petersburg; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Environmental Instrument-Making and Monitoring; E-mail: lkonop@b10.vniim.ru