

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Фесько Ю. А., Кудряшов К. В., Луговских С. В.** Методика расчета звездной величины Международной космической станции 5
- Смирнова М. В., Воронин А. А., Бурбаев А. М.** Способ повышения разрешающей способности спектрофотометра с вогнутой дифракционной решеткой 10
- Алексеев С. А., Матвеев Н. В.** Способ измерения поляризационной чувствительности приемников оптического излучения 14
- Большаков О. П., Котов И. Р., Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т.** Анализ влияния перекрестной интерференции на погрешность интерферометра сдвига 18
- Яковлева Т. В., Арефьева Н. Н.** Расчет геометрических параметров канальных волноводов для электрооптических модуляторов 22
- Белов Н. П., Грисимов В. Н., Шерстобитова А. С., Яськов А. Д.** Моделирование интегрирующей сферы с экраном 25
- Горбунова Е. В., Коротаев В. В., Перетягин В. С., Чертов А. Н.** Моделирование многокомпонентного источника излучения 31
- Араканцев К. Г., Горбачёв А. А., Серикова М. Г.** Стереоскопическая система контроля фактического положения железнодорожного пути 34
- Головков В. А., Емельянов В. Н., Солк С. В.** Обнаружение нагретых движущихся малоразмерных объектов в ИК-диапазоне 40

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Духанов А. В., Болгова Е. В., Гервич Л. Р., Колпаков В. Г., Кравченко Е. Н., Курочкин И. И., Масленников Е. Д., Офёркин И. В., Рубцов А. О., Смирнов С. А., Штейнберг О. Б., Юрушкин М. В.** Предметно-ориентированные технологии создания виртуальных рабочих пространств в среде облачных вычислений CLAVIRE 45
- Воронюк М. Н.** Математическое моделирование процессов фильтрации в перколяционных решетках с использованием вычислительных систем сверхвысокой производительности 52
- Лямкин А. А., Микуленко Н. П., Тревгода Т. Ф.** Язык описания процессов обработки информации в технических системах 58
- Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю.** Фрактальные методы сегментации текстурных изображений 63

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

- Пилипенко Н. В., Польщиков Г. В., Сиваков И. А.** Установка для определения динамических характеристик сенсоров теплового потока 71
- Баёва Ю. В., Ханков С. И.** Обеспечение термостабильности телескопа дистанционного зондирования Земли за счет выбора параметров бленды 76
- Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А.** Прогноз и коррекция теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа 79

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Яковлева С. А., Щербак А. Г., Беляев С. Н.** Методы формообразования аэродинамического профиля газового подшипника 85
- Мешковкий И. К., Варжель С. В., Беликин М. Н., Куликов А. В., Брунов В. С.** Термический отжиг решеток Брэгга при изготовлении волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков 91
- Кинжагулов И. Ю., Быченко В. А.** Методика лазерно-ультразвукового контроля качества изготовления паяных соединений 94

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Марцуков А. А., Воронин А. А., Бурбаев А. М.** Анализ технических средств для обнаружения посторонних объектов 99

ИНФОРМАЦИЯ 102

SUMMARY (перевод Ю. И. Копилевича) 105

CONTENTS

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Tymkul V. M., Tymkul L. V., Fesko Yu. A., Kudryashov K. V., Lugovskyh S. V. Method for Evaluation of the Magnitude of Solar Radiation Reflected by International Space Station	5
Smirnova M. V., Voronin A. A., Burbaev A. M. Way to Improve Resolution of Spectrophotometer with Concave Diffraction Screen	10
Alekseev S. A., Matveev N. V. Method to Measure Polarization Sensitivity of Optical Radiation Detector	14
Bolshakov O. P., Kotov I. R., Mayorov E. E., Prokopenko V. T. Analysis of the Effect of Cross-Interference on Shearing Interferometer Accuracy	18
Yakovleva T. V., Arefeva N. N. Design of Channel Waveguides Geometry for Electro-Optical Modulators	22
Belov N. P., Grisimov V. N., Sherstobitova A. S., Yaskov A. D. Modeling of Integrating Sphere with a Baffle	25
Gorbunova E. V., Korotaev V. V., Peretyagin V. S., Chertov A. N. Modeling of Multi-Element Radiation Source	31
Arakantsev K. G., Gorbachev A. A., Serikova M. G. Stereoscopic System for Railway Track Position Control	34
Golovkov V. A., Emelyanov V. N., Solk S. V. Detection of Heated Small-Sized Object in IR-Spectral Range	40

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Dukhanov A. V., Bolgova E. V., Gervich L. R., Kolpakov V. G., Kravchenko E. N., Kurochkin I. I., Maslennikov E. D., Oferkin I. V., Rubtsov A. O., Smirnov S. A., Shteinberg O. B., Yurushkin M. V. Object-Oriented Technology for Creation of Virtual Working Places using Cloud Computing Environment CLAVIRE	45
Voronyuk M. N. Application of Supercomputers to Mathematical Modeling of Filtration Processes in Percolation Lattice	52
Lyamkin A. A., Mikulenko N. P., Trevgoda T. F. Language for Describing Information Processing Algorithms in Engineering Systems	58
Fisenko V. T., Fisenko T. Yu. Segmentation of Textured Images using Fractal Methods	63

HEAT REGIMES OF INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Pilipenko N. V., Polschikov G. V., Sivakov I. A. Setup for Determination of Dynamic Characteristics of Heat Flux Sensors	71
Bayova Yu. V., Khankov S. I. Maintaining Thermal Stability of the Earth Remote-Sensing Space-Based Telescope by the Lens Hood Parameters Optimization	76
Vahrameev E. I., Galyagin K. S., Ivonin A. S., Oshivalov M. A. Prediction and Correction of Fiber-Optic Gyroscope Thermal Drift	79

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

Yakovleva S. A., Scherbak A. G., Belyaev S. N. Methods of Formation of Aerodynamic Profile of Gas Bearing.....	85
Meshkovsky I. K., Varzhel S. V., Belikin M. N., Kulikov A. V., Brunov V. S. Thermal Annealing of Bragg Grating on Manufacturing of Fiber-Optic Phase Sensor.....	91
Kinzhagulov I. Yu., Bychenok V. A. Method of Laser Ultrasonic Quality Control of Soldered Joint.....	94
BRIEF NOTES	
Martsukov A. A., Voronin A. A., Burbaev A. M. Analysis of Means for Unauthorized Object Detection.....	99
INFORMATION	102
SUMMARY	105

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 524.3

В. М. ТЫМКУЛ, Л. В. ТЫМКУЛ, Ю. А. ФЕСЬКО,
К. В. КУДРЯШОВ, С. В. ЛУГОВСКИХ

МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЗВЕЗДНОЙ ВЕЛИЧИНЫ МЕЖДУНАРОДНОЙ КОСМИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ

Рассматривается методика расчета звездной величины Международной космической станции по отраженному солнечному излучению. Методика основана на использовании коэффициента габаритной яркости как оптической характеристики отраженного излучения станции и представлении ее поверхности в виде суперпозиции цилиндрических, конических, сферических и плоских поверхностей. Составлены алгоритм и программа расчета звездной величины станции в зависимости от углов ее ориентации на Солнце и наблюдателя. Приведены результаты расчета и их сравнительный анализ с данными из сети Интернет и результатами эксперимента.

Ключевые слова: звездная величина, Международная космическая станция, отражение, коэффициент габаритной яркости.

В Международном космическом эксперименте уже несколько лет принимает участие Международная космическая станция (МКС) — самый крупный из имеющихся искусственных спутников Земли (ИСЗ), звездная величина m которого достигает значений, сравнимых с звездной величиной, например, Сириуса ($m = -1,47$) и Канопуса ($m = -0,72$). Однако звездная величина МКС не является постоянной за счет изменения ориентации станции относительно точки наблюдения и Солнца.

Знание звездной величины как МКС, так и других крупногабаритных ИСЗ необходимо, в первую очередь, при расчетах и проектировании оптико-электронных систем ориентации и навигации [1, 2]. Кроме того, звездная величина искусственных космических объектов представляет интерес для исследований в астрономии и астрофизике, а также ряде разделов прикладной физики и оптики. Так, например, в работе [3] рассматривается проблема использования в космической геодезии свойств отражения солнечного света поверхностями крупногабаритных космических аппаратов и ИСЗ, в том числе спутников системы ГЛОНАСС, для анализа влияния светового давления на их орбиты.

Настоящая статья посвящена разработке методики определения звездной величины МКС в зависимости от ее ориентации в пространстве. Для решения поставленной задачи геометрическая модель поверхности МКС представляется как суперпозиция локальных элементов цилиндрической, конической, сферической и плоской поверхностей. При этом отражение солнечного излучения элементами корпуса станции носит диффузный или направленно-рассеивающий характер, а отражение от элементов солнечных батарей является зеркальным.

Поток солнечных лучей отражается от освещенных элементов поверхности МКС и достигает наблюдателя, находящегося на поверхности Земли. Благодаря этому наблюдатель может видеть солнечный свет, отраженный станцией. Используя такую оптическую характеристику отражения от объемных тел, как коэффициент габаритной яркости (КГЯ) [4], можно определить силу отраженного станцией света через освещенность Солнца вне атмосферы (E_C) по формуле

$$I_{\Sigma}(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) = \frac{E_C}{\pi} \sum_{i=1}^k \rho_i \bar{\beta}_i(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) A_i(\Theta_H, \varphi_H), \quad (1)$$

где ρ_i — коэффициент отражения i -го элемента МКС; A_i — площадь проекции i -го элемента МКС в направлении наблюдателя; $\bar{\beta}_i$ — нормированный КГЯ i -го элемента МКС; $\Theta_H, \Theta_C, \varphi_H, \varphi_C$ — сферические координаты направлений на Солнце (Θ_C, φ_C) и на наблюдателя (Θ_H, φ_H).

Зная расстояние l от МКС до поверхности Земли, можно перейти от силы света к освещенности E_a , формируемой станцией в точке наблюдения и определяемой по формуле

$$E_a = I_{\Sigma} \tau_a / l^2, \quad (2)$$

где τ_a — коэффициент пропускания атмосферы Земли.

На основании закона Погсона [5], который устанавливает логарифмическую зависимость ощущения глаза от раздражения его светом, звездная величина МКС, регистрируемая на уровне моря, выражается через освещенность E_a :

$$m = -14,01 - 2,51 \cdot \lg E_a. \quad (3)$$

В формуле (1) присутствуют нормированные значения коэффициента $\bar{\beta}$ локальных поверхностей, определяемые для элементов корпуса с диффузным покрытием следующим образом. Так, индикатриса нормированного КГЯ для цилиндра с коэффициентом сжатия $t_{\text{ц}} = r_{\text{ц}}/h_{\text{ц}}$, где $r_{\text{ц}}$ и $h_{\text{ц}}$ — радиус основания и высота цилиндра, определяется как [6]

$$\begin{aligned} \bar{\beta}_{\text{ц}}(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) = & \frac{1}{2(2 \sin \varphi_H + \pi t_{\text{ц}} |\cos \varphi_H|)} \{ \sin \varphi_H \sin \varphi_C \cos \Theta_C \cos \Theta_H \times \\ & \times [\pi - (\Theta_C + \Theta_H) + (\sin \Theta_C \cos \Theta_C) + \sin \Theta_H \cos \Theta_H] + \sin \varphi_C \sin \varphi_H \sin(\Theta_C + \Theta_H) \times \\ & \times (-\cos^2 \Theta_H + \cos^2 \Theta_C) + \sin \varphi_H \sin \varphi_C \sin \Theta_C \sin \Theta_H \times \\ & \times [\pi - (\Theta_C - \Theta_H) - (\sin \Theta_C \cos \Theta_C - \sin \Theta_H \cos \Theta_H)] + 2\pi t_{\text{ц}} \chi(\varphi_H, \varphi_C) \cos \varphi_H \cos \varphi_C \}, \quad (4) \end{aligned}$$

где $\chi(\varphi_H, \varphi_C) = 1$, когда φ_C и φ_H одновременно заданы в области $[\pi/2, \pi]$; в противном случае $\chi(\varphi_H, \varphi_C) = 0$; φ_C, φ_H — угол между осью цилиндра, совпадающей с осью OZ декартовой системы координат станции и направлениями соответственно на источник света и на наблюдателя; Θ_C, Θ_H — угол между осью OX декартовой системы координат и проекцией данных направлений на координатную плоскость XOY .

Индикатриса нормированного КГЯ для усеченного конуса с коэффициентом сжатия $t_k = (r_2 - r_1)/h_k$ ($r_2 > r_1$), где r_1, r_2 — радиусы большого и малого оснований конуса, определяется выражением [6]

$$\bar{\beta}_k(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) = \frac{t_k}{\sqrt{t_k^2 + 1} |\cos \varphi_H|} \left[\frac{t_k^2}{2} \sin \varphi_H \sin \varphi_C \cos(\Theta_C - \Theta_H) + \cos \varphi_H \cos \varphi_C \right]. \quad (5)$$

При этом выполняются условия $\pi - \arctg t < \varphi_C$ и $\varphi_H \leq \pi$, т.е. освещается и визируется только боковая поверхность усеченного конуса.

Индикатриса нормированного КГЯ для сферы имеет вид [7]

$$\bar{\beta}_{\text{сф}}(\Theta_C, \varphi_C, \Theta_H, \varphi_H) = (2/3\pi)((\pi - \delta) \cos \delta + \sin \delta), \quad (6)$$

где

$$\cos \delta = \sin \varphi_{\text{H}} \sin \varphi_{\text{C}} \cos(\Theta_{\text{H}} - \Theta_{\text{C}}) + \cos \varphi_{\text{H}} \cos \varphi_{\text{C}}. \quad (7)$$

Индикатрисы нормированного КГЯ солнечных батарей определяются по формуле

$$\bar{\beta}_{\delta}(\Theta_{\text{C}}, \varphi_{\text{C}}, \Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}) = \beta(\alpha_0, \alpha_{\text{H}}) \delta(\alpha_0 - \alpha_{\text{H}}), \quad (8)$$

где $\beta(\alpha_0, \alpha_{\text{H}})$ — индикатриса коэффициента яркости материала поверхности солнечных батарей; $\delta(\alpha_0 - \alpha_{\text{H}})$ — дельта-функция Дирака, численно равная

$$\delta(\alpha_0 - \alpha_{\text{H}}) = \begin{cases} 1, & \alpha_0 = \alpha_{\text{H}}; \\ 0, & \alpha_0 \neq \alpha_{\text{H}}, \end{cases} \quad (9)$$

причем $\alpha_0, \alpha_{\text{H}}$ — это углы между нормалью к поверхности батареи и направлением соответственно на Солнце и наблюдателя.

Следует отметить, что зеркальный блик от поверхности солнечной батареи имеет место при условии $\alpha_0 = \alpha_{\text{H}}$ и нахождении этих углов в одной плоскости.

Методика расчета КГЯ сложных поверхностей с направленно-рассеивающим покрытием и, в частности, цилиндрических, сферических и конических поверхностей подробно рассмотрена в работе [8].

Зная геометрические размеры всех элементов МКС [9], площади их проекций в зависимости от углов $\Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}$ можно определить следующим образом:

— площадь проекции цилиндра — по формуле:

$$A_{\text{ц}}(\Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}) = 2r_{\text{ц}}h_{\text{ц}} \sin \varphi_{\text{H}} + \pi r_{\text{ц}}^2 |\cos \varphi_{\text{H}}|; \quad (10)$$

— площадь проекции усеченного конуса — по формуле

$$A_{\text{к}}(\Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}) = \left[a^2 \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin \frac{a}{h_{\text{к}} \operatorname{tg} \varphi_{\text{H}}} \right) \cdot |\cos \varphi_{\text{H}}| + ah_{\text{к}} \sqrt{1 - \frac{a^2}{h_{\text{к}}^2 \operatorname{tg}^2 \varphi_{\text{H}}}} \sin \varphi_{\text{H}} \right] + \delta(\varphi_{\text{H}}) \pi a^2 |\cos \varphi_{\text{H}}|, \quad (11)$$

где

$$\delta(\varphi_{\text{H}}) = \begin{cases} 1 & \text{при } \varphi_{\text{H}} > \pi/2, \\ 0 & \text{при } \varphi_{\text{H}} \leq \pi/2; \end{cases} \quad a = r_2 + r_1; \quad (12)$$

— площадь проекции сферы

$$A_{\text{сф}} = \pi r_{\text{сф}}^2, \quad (13)$$

где $r_{\text{сф}}$ — радиус сферы.

Таким образом, методика расчета звездной величины МКС при различных углах ориентации станции на Солнце и наблюдателя основывается на соотношениях (3)—(13).

Рассмотрим алгоритм расчета звездной величины m .

1. Выбираются значения углов $\Theta_{\text{C}}, \varphi_{\text{C}}$ и $\Theta_{\text{H}}, \varphi_{\text{H}}$.
2. Задаются значения коэффициентов отражения r_i локальных элементов МКС.
3. На основе формул (4)—(6), (8) и (10), (11), (13) применительно к геометрической модели станции рассчитывается значение суммы в соотношении (1).
4. Вычисляется солнечная постоянная E_{C} вне атмосферы:

$$E_{\text{C}} = \frac{W(T_{\text{C}})}{\pi} 2\pi(1 - \cos \alpha),$$

где $W(T_{\text{C}})$ — светимость Солнца при абсолютной температуре T_{C} , вычисляемая по формуле Стефана — Больцмана: $W(T_{\text{C}}) = \sigma T_{\text{C}}^4$ (σ — постоянная Стефана — Больцмана); $2\alpha = 32'$ — угловой размер солнечного диска.

5. На основе формул (2) и (3) вычисляются соответственно величина E_a и искомая звездная величина m .

В качестве примера на рис. 1 приведены результаты компьютерного расчета распределения значений звездной величины МКС по предлагаемой методике при случайных значениях углов $\Theta_C, \Theta_H, \varphi_C, \varphi_H$ (по оси абсцисс показан номер N_k компьютерного эксперимента). При этом значения ρ_i для всех элементов корпуса станции принимались одинаковыми, а функция распределения случайных значений углов $\Theta_C, \Theta_H, \varphi_C, \varphi_H$ соответствовала равномерному закону.

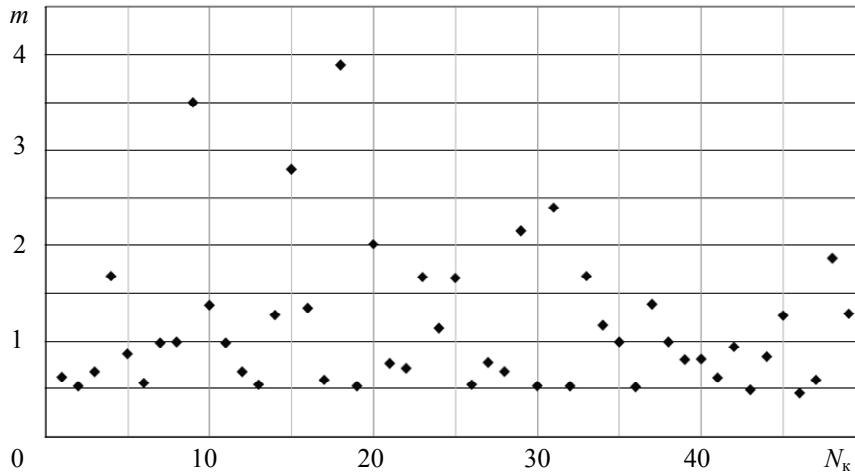


Рис. 1

Согласно расчетам значения звездной величины МКС в данном случае сосредоточены в интервале от +3 до +0,5.

При обработке запроса значений звездной величины МКС с сайта [10] (для наблюдений из Новосибирска в период с 30 апреля по 25 мая 2004 г.) были получены результаты распределения значений m , показанные на рис. 2 (здесь N_H — номер практических наблюдений).

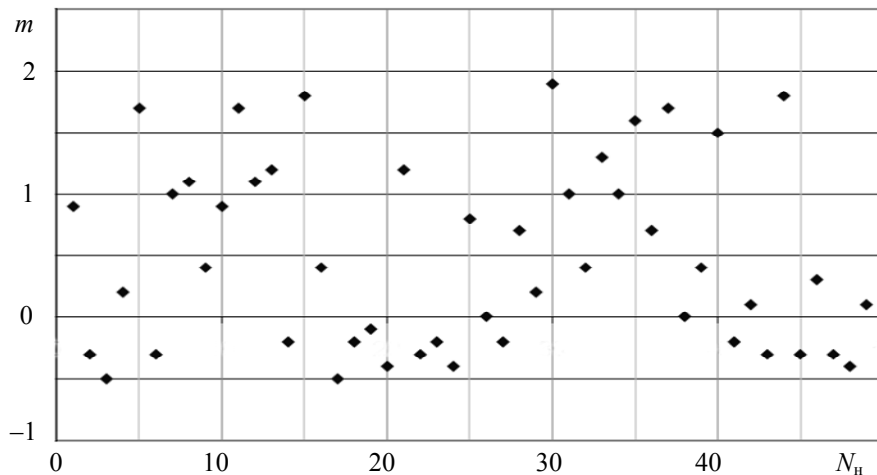


Рис. 2

Согласно этому распределению значения звездной величины МКС сосредоточены в интервале от +1,8 до -0,5.

Для оценки корректности предлагаемой модели расчета звездной величины МКС в этот же период были проведены визуальные наблюдения пролета станции над Новосибирском с помощью телескопа с измерением звездной величины методом Аргеландера [11]. По результатам этих наблюдений значения m находились в интервале от +1 до 0. Имеющиеся различия результатов расчета с данными из сети Интернет и данными экспериментов можно объяснить, по-видимому, выбором случайных значений углов ориентации станции на Солнце

и в направлении наблюдателя, а также использованием одинаковых значений коэффициентов отражения ρ_i для всех элементов корпуса станции.

В заключение следует отметить, что по предлагаемой методике можно проводить не только оценочные расчеты звездной величины МКС при случайном выборе углов ориентации станции, но и определять точные значения величины m , если будут заданы действительные значения коэффициентов ρ_i и конкретные значения углов Θ_C , φ_C и Θ_n , φ_n .

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изнар А. Н., Павлов А. В., Федоров Б. Ф. Опτικο-электронные приборы космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1972. 368 с.
2. Ивандиков Я. М. Опτικο-электронные приборы для ориентации и навигации космических аппаратов. М.: Машиностроение, 1971. 200 с.
3. Сурнин Ю. В. История создания и развития межкафедральной научно-исследовательской лаборатории космической геодезии // Вестн. СГГА: науч.-техн. журн. Новосибирск: СГГА, 2010. Вып. 2(13). С. 128—145.
4. Холопов Г. К., Шуба Ю. А. Коэффициент габаритной яркости как количественный параметр для оценки отражательных свойств объемных тел // ОМП. 1974. № 1. С. 8—10.
5. Якушенков Ю. Г. Теория и расчет опτικο-электронных приборов. М.: Логос, 1999. 480 с.
6. Тевяшов В. И., Тымкул В. М., Шуба Ю. А. Оптические характеристики отражения объемных тел в поляризованном свете // ОМП. 1979. № 10. С. 8—11.
7. Тымкул В. М., Шуба Ю. А. Рассеяние света диффузными квадратичными поверхностями в фотометрическом представлении // Там же. 1978. № 11. С. 11—13.
8. Тымкул В. М., Тымкул Л. В., Кудряшов К. В. Отражение оптического излучения телами с направленно-рассеивающим покрытием // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 58—63.
9. Схема МКС [Электронный ресурс]: <www.nasa.gov>.
10. [Электронный ресурс]: <www.heavens-above.com>.
11. Методика наблюдений переменных звезд [Электронный ресурс]: <www.nevskibelastro.net/method>.

Сведения об авторах

- Василий Михайлович Тымкул** — канд. техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптоотехники, Новосибирск;
E-mail: kaf.oep@ssga.ru
- Любовь Васильевна Тымкул** — канд. техн. наук, профессор; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптоотехники, Новосибирск;
E-mail: kaf.oep@ssga.ru
- Юрий Александрович Фесько** — аспирант; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптоотехники, Новосибирск;
E-mail: y.a.fesko@gmail.com
- Кирилл Васильевич Кудряшов** — магистр; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптоотехники, Новосибирск;
E-mail: kir-kudryashov@yandex.ru
- Светлана Валерьевна Луговских** — бакалавр; Сибирская государственная геодезическая академия, кафедра наносистем и оптоотехники, Новосибирск;
E-mail: mumak2004@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
наносистем и оптоотехники

Поступила в редакцию
08.02.13 г.

М. В. СМЕРНОВА, А. А. ВОРОНИН, А. М. БУРБАЕВ

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СПЕКТРОФОТОМЕТРА С ВОГНУТОЙ ДИФРАКЦИОННОЙ РЕШЕТКОЙ

Рассматривается способ повышения разрешающей способности спектрофотометра „Кедр-М“, предназначенного для анализа породы древесины. Показана возможность повышения разрешающей способности посредством изменения размеров рабочей поверхности дифракционной решетки. Представлен численный метод расчета распределения интенсивности пятна рассеяния и разрешающей способности прибора с вогнутой дифракционной решеткой.

Ключевые слова: вогнутая дифракционная решетка, порядок спектра, разрешающая способность, пятно рассеяния.

Разрешающая способность является главной характеристикой качества спектрального прибора. Известно, что для оценки разрешающей способности R спектрального прибора необходимо построить два изображения спектральных линий равной интенсивности и подобрать для них такое значение $\Delta\lambda$ (предел разрешения), чтобы расстояние между двумя линиями равной интенсивности было равно полуширине изображения одной из них [1, 2]. В качестве численной характеристики разрешающей способности принимается безразмерная величина: $R = \lambda/\Delta\lambda$, где λ — средняя длина волны двух разрешаемых линий.

В соответствии с ГОСТ 8.557-2007 [3] для аттестации спектрофотометра в качестве средства измерения необходимо применить светофильтр, например, ПС-7 (пурпурный светофильтр). Однако разрешающая способность прибора является недостаточной для определения полос поглощения светофильтра. В этой связи предлагается рассматриваемый в настоящей статье способ повышения разрешающей способности прибора путем доработки его конструкции.

Задачей исследования является определение разрешающей способности спектрофотометра „Кедр-М“ при разных размерах дифракционной решетки и нахождение такого размера ее рабочей поверхности, при котором будет обеспечено повышение разрешающей способности.

Расчет положений дифракционных максимумов представлен схемой на рис. 1, где 1 — образец древесины, 2 — источник излучения, 3 — входное и выходное окно фотометрического шара, 4 — фотометрический шар, 5 — входная щель прибора, 6 — дифракционная решетка, 7 — экран (ПЗС-линейка “Toshiba TCD-1304”, 3648 элементов [4]). Ширина и форма спектральных линий являются определяющим фактором разрешающей способности прибора [2]. В этой связи необходимо исследовать, как влияет ширина рабочей поверхности дифракционной решетки на aberrации оптической системы и тем самым на форму спектральных линий.

Для расчета целесообразно использовать систему координат, центр которой совпадает с центром кривизны дифракционной решетки, а ось OX проходит через ее середину. Плоскость XOY совпадает с меридиональной плоскостью системы.

Источником излучения в этой системе служит входная щель шириной S . Центр входной щели находится на расстоянии z от середины дифракционной решетки. Отрезок, границами которого являются центр входной щели и середина дифракционной решетки, составляет угол α к оси OX . Узкий световой пучок с длиной волны излучения λ направлен из центра входной щели на дифракционную решетку под углом α' к оси OX . Геометрический расчет по-

казывает, что в этом случае угол между лучом и нормалью к поверхности дифракционной решетки в точке засветки этим лучом (угол падения луча на решетку) равен

$$\varphi = \arcsin \left(\left(\frac{z}{r} \right) \sin(\alpha - \alpha') + \sin \alpha' \right),$$

где r — радиус кривизны дифракционной решетки.

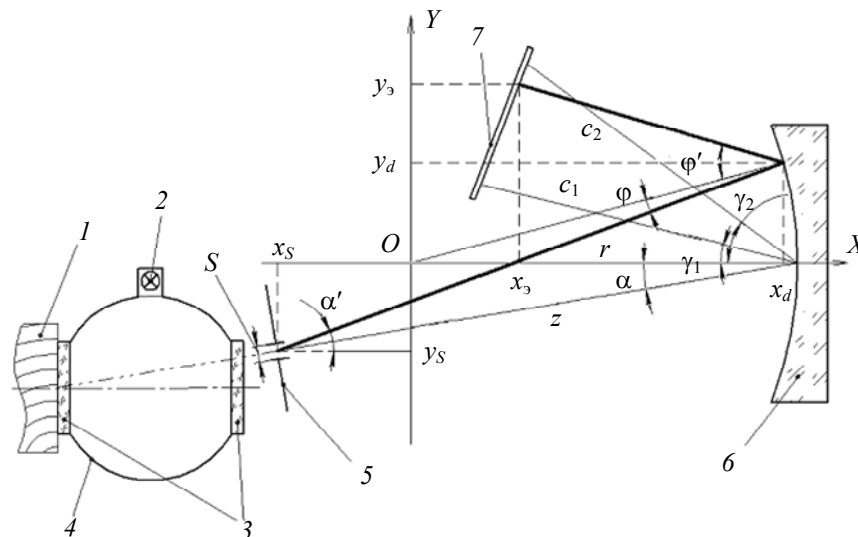


Рис. 1

Координата по оси OY точки засветки на дифракционной решетке

$$y_d = r \sin(\alpha' - \varphi).$$

Направления главных максимумов интерференции пучков, дифрагированных на малом участке вогнутой решетки, определяются по той же формуле, что и для плоской отражательной решетки [1]:

$$\sin \varphi + \sin(-\varphi') = m\lambda N,$$

где N — количество штрихов решетки на один миллиметр, φ' — угол дифракции, m — порядок дифракции.

Отсюда находим

$$\varphi' = \arcsin(\sin \varphi - m\lambda N).$$

Зная угол дифракции, несложно определить положение интерференционного максимума на экране (в частности, координату по оси OY):

$$y_3 = (Cy_d + ABC - AD)/(A+C),$$

где $A = \operatorname{tg}(\varphi' - \arcsin(y_d/r))$; $B = (r^2 - y_d^2)^{1/2}$; $D = C(r - c_1 \cos \gamma_1) - c_1 \sin \gamma_1$; $C = (c_2 \sin \gamma_2 - c_1 \sin \gamma_1)/(c_1 \cos \gamma_1 - c_2 \cos \gamma_2)$.

Параметры c_1 , c_2 , γ_1 , γ_2 определяют положение экрана (см. рис. 1).

Параметры прибора: $m = -1$; $r = 125$ мм; $z = 140$ мм; $N = 0,3$ лин/мкм; $\alpha = 2^\circ$; $\gamma_1 = 6,3^\circ$; $\gamma_2 = 19,6^\circ$; $c_1 = 112,1$ мм; $c_2 = 105,7$ мм.

Таким образом, можно произвести расчет положения максимумов на экране в зависимости от угла α' , что необходимо для определения размеров пятна рассеяния.

Координаты секций дифракционной решетки представлены на рис. 2. Дифракционная решетка состоит из 7 секций общей площадью 1600 мм^2 . Обозначим нижнюю и верхнюю границы дифракционной решетки как D_1 и D_2 , причем в соответствии с рис. 2 $D_1 = -20$ мм и $D_2 = 20$ мм. Для того чтобы показать возможность повышения разрешающей способности посредством изменения размеров рабочей поверхности дифракционной решетки, следует

изменять значения D_1 и D_2 в зависимости от количества секций. На рис. 2 секции 1, 5, 6, 7 дифракционной решетки представлены как нерабочие поверхности.

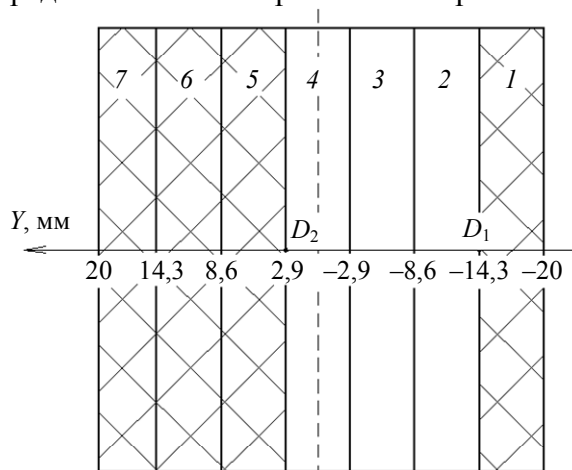


Рис. 2

Для оценки разрешающей способности прибора (рис. 3) необходимо построить два изображения спектральных линий с длинами волн λ и $\lambda + \Delta\lambda$ и подобрать для них такое значение $\Delta\lambda$, чтобы расстояние (l) между максимумами спектральных линий было равно полуширине этих линий.

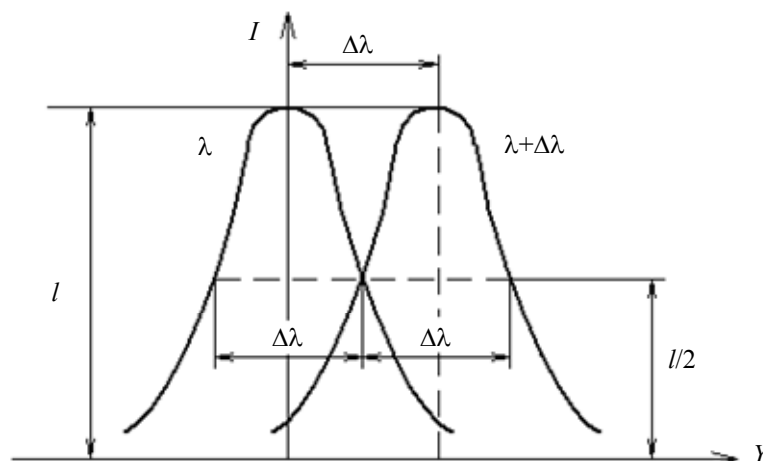


Рис. 3

Получить изображение спектральной линии в явном виде нельзя, поэтому был использован численный метод для построения этих изображений. В программе, разработанной на языке Turbo Pascal 7.1, каждый элемент ПЗС-линейки сопоставляется с элементом массива $I(m)$. Пучок света с длиной волны λ , проходящий через входную щель шириной S , разбивается на дискретные лучи с шагом $\Delta\alpha'$ по направлению и шагом ΔS по координате прохождения через входную щель. Каждый луч увеличит значение элемента массива, соответствующего элементу ПЗС-линейки, на котором проявится интерференционный максимум. В результате значения элементов массива будут пропорциональны интенсивности засветки элементов реальной ПЗС-линейки. Таким образом, используя массив $I(m)$, можно построить изображение спектральной линии.

Для того чтобы определить, насколько изменение размеров дифракционной решетки влияет на предел разрешения, разрешающую способность и интенсивность пятна рассеяния, необходимо сначала определить перечисленные характеристики для случая полной рабочей поверхности дифракционной решетки, а также для случаев, когда исключены несколько секций решетки. В табл. 1 представлены итоговые результаты расчетов для решетки начальных размеров (полная поверхность), а в табл. 2 — те же результаты для решетки, состоящей из

трех секций, при $D_1 = -14,3$ мм, $D_2 = 2,9$ мм; в таблицах I_{\max} — максимальная величина интенсивности пятна рассеяния, в относительных единицах.

Таблица 1

λ , нм	$\Delta\lambda$, нм	I_{\max} , о.е.	$R = \lambda/\Delta\lambda$
440	3,0	0,99	146,7
470	3,0	0,97	156,7
500	3,0	0,95	166,7
530	3,2	0,93	165,6
560	3,3	0,89	169,7
590	3,5	0,86	168,6
620	3,5	0,85	177,1
650	3,3	0,84	197,0
680	3,4	0,82	200,0
710	3,4	0,81	208,8
740	3,5	0,79	211,4
770	3,5	0,78	220,0

Таблица 2

λ , нм	$\Delta\lambda$, нм	I_{\max} , о.е.	$R = \lambda/\Delta\lambda$
440	2,6	0,79	172,5
470	2,6	0,77	184,3
500	2,6	0,76	192,3
530	2,5	0,76	212,0
560	2,5	0,74	224,0
590	2,5	0,73	236,0
620	2,5	0,74	248,0
650	2,5	0,76	260,0
680	2,7	0,76	251,9
710	2,5	0,79	284,0
740	2,7	0,79	274,1
770	2,7	0,78	285,2

Результаты исследования, представленные в табл. 1 и 2, показывают, что целесообразно оставить секции 4, 3, 2 дифракционной решетки общей площадью 685 мм². Полученные значения разрешающей способности прибора (см. табл. 2) в среднем на 20 % выше по сравнению с разрешающей способностью при начальных размерах рабочей поверхности дифракционной решетки.

Предложенный способ повышения разрешающей способности был опробован на опытных образцах прибора „Кедр-М“, проходивших аттестацию в Государственном центре испытаний средств измерений „Тест — С.-Петербург“. Итогом аттестации стало внесение прибора в реестр средств измерений (ППИ „Кедр-М“ зарегистрирован в государственном реестре СИ — № 46157-10), что свидетельствует о положительном результате реализации метода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пейсахсон И. В. Оптика спектральных приборов. Л.: Машиностроение, 1975. С. 312.
2. Зайдель А. Н., Островская Г. В., Островский Ю. И. Техника и практика спектроскопии. М.: Наука, 1972. С. 376.
3. ГОСТ 8.557-2007 ГСИ. Государственная поверочная схема для средств измерений спектральных, интегральных и редуцированных коэффициентов направленного пропускания и оптической плотности в диапазоне длин волн 0,2 — 20,0 мкм. М.: Изд-во стандартов, 2008.
4. [Электронный ресурс]: <<http://www.spectralproducts.com/catalog/pdf/TCD1304AP.pdf>>.

Сведения об авторах

- Мария Владимировна Смирнова** — студентка; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: listsv@mail.ru
- Андрей Анатольевич Воронин** — канд. техн. наук; Научно-производственный центр „Инновационная техника и технологии“, Санкт-Петербург; зам. генерального директора по науке; E-mail: V-electronics@mail.ru
- Амир Маруанович Бурбаев** — доцент; 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
25.06.12 г.

УДК 535.51

С. А. АЛЕКСЕЕВ, Н. В. МАТВЕЕВ

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРИЕМНИКОВ ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Рассматривается новый способ измерения поляризационной чувствительности приемников оптического излучения, основанный на гармоническом анализе выходного сигнала исследуемого приемника излучения, установленного в поляризационной схеме поляризатор—дискретный анализатор—приемник. Проведено численное моделирование погрешности измерения поляризационной чувствительности. Приведены результаты экспериментальных исследований поляризационной чувствительности кремниевых фотодиодов и пироприемников.

Ключевые слова: поляризационная чувствительность приемника, эллипсометрия.

Введение. Постановка задачи. Поляризационная чувствительность оптического приемного тракта приводит к появлению систематических погрешностей измерений, производимых с использованием поляриметрической и эллипсометрической аппаратуры. Это обуславливает необходимость получения информации о наличии и величине поляризационной чувствительности конкретных образцов приемников излучения. Другим фактором, обуславливающим актуальность данной задачи, является метрологическая аттестация поляризационно-чувствительных приемников.

Известные методы измерения поляризационной чувствительности в основном базируются на прямом фотометрировании потока поляризационного излучения, т.е. измерении двух составляющих чувствительности приемника излучения для ортогональных компонентов поляризации и последующем вычислении их отношения [1, 2].

Новый способ измерения, представленный в настоящей статье, должен иметь повышенную точность, обеспечивать возможность получения независимых оценок параметров, характеризующих поляризационную чувствительность, в процессе эллипсометрических измерений, а также обладать высокой степенью быстродействия [3].

Основные соотношения методики. Перечисленные задачи могут быть решены с использованием динамического фотометрического метода бескомпенсаторной эллипсометрии.

Метод основан на гармоническом анализе выходного сигнала исследуемого приемника излучения, установленного в поляризационной схеме поляризатор—анализатор—приемник.

Анализатор в такой схеме может принимать несколько дискретных угловых положений A_i в пределах полного оборота (рис. 1, здесь s — приемная площадка фотоприемника). Для идеальных элементов оптической системы выходной сигнал приемника представляет собой гармоническую функцию от удвоенного угла поворота анализатора, фаза которой строго соответствует азимуту поляризатора. Если приемник излучения обладает поляризационной чувствительностью, то в угловом спектре выходного сигнала добавляется четвертая гармоника угла поворота (I_{4A}) и изменяется основная составляющая (I_{2A}):

$$I_{2A} = \frac{1}{4} S_0 I_0 [(1 - K) \cos 2A - (1 + K) \cos(2A - 2P)],$$

$$I_{4A} = \frac{1}{8} S_0 I_0 (1 - K) \cos(4A - 2P),$$

где P — азимут поляризатора, A — азимут анализатора,

$K = K_y/K_x$ — поляризационная чувствительность приемника, I_0 — интенсивность сигнала на входе системы (после поляризатора), S_0 — чувствительность приемника.

Изменение составляющей I_{2A} приводит к изменению фазы основного сигнала, которое может быть зарегистрировано в поляриметрической схеме с большей степенью точности, чем соответствующее изменение амплитуды.

Основное расчетное соотношение данной методики (1-й способ):

$$K = \frac{\operatorname{tg} 2\varphi_{2A}(1 + \cos 2P) - \sin 2P}{\operatorname{tg} 2\varphi_{2A}(1 - \cos 2P) + \sin 2P}, \quad (1)$$

где φ_{2A} — фаза основной гармоники.

Также независимую оценку параметра K можно получить на основе регистрации отношения амплитуд четвертой и основной гармоник:

$$C = \frac{I_{4A}}{I_{2A}} = \frac{1 - K}{2\sqrt{(1 - K)^2 + (1 + K)^2 + 2(1 + K)^2 \cos 2P}}. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) позволяет определить оценку параметра K по экспериментально измеренному значению C (2-й способ):

$$K = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - VU}}{V}, \quad (3)$$

где $V = 8C^2(1 - \cos 2P) - 1$; $U = 8C^2(1 + \cos 2P) - 1$.

Анализ уравнения (3) показывает, что второе его решение — со знаком „минус“ — соответствует определению поляризационной чувствительности в виде $K_- = -\frac{S_y}{S_x} = -\frac{1}{K}$, что не несет дополнительной физической информации.

Регистрация амплитуд и фаз гармоник достаточно просто может быть реализована по выборке I_i значений выходного сигнала приемника при разных ориентациях A_i анализатора (см. рис. 1) с помощью дискретного преобразования Фурье. Выходной сигнал в этом случае может быть представлен выражением

$$I_i = I_0(a_0 + a_2 \cos 2A_i + b_2 \sin 2A_i + a_4 \cos 4A_i + b_4 \sin 4A_i),$$

где коэффициенты Фурье вычисляются согласно экспериментальным данным по формулам

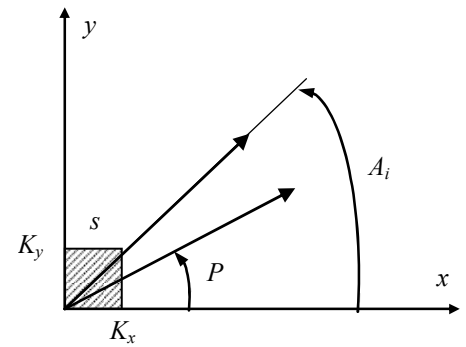


Рис. 1

$$a_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \cos 2A_i, \quad b_2 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \sin 2A_i;$$

$$a_4 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \cos 4A_i, \quad b_4 = \frac{2}{N} \sum_{i=0}^{N-1} I_i \sin 4A_i,$$

где N — число ориентаций анализатора в пределах полного оборота.

Фазы и амплитуды гармоник определяются далее расчетным путем:

$$\operatorname{tg} 2\varphi_{2A} = b_2/a_2, \quad I_{2A}^2 = (a_2^2 + b_2^2), \quad I_{4A}^2 = (a_4^2 + b_4^2).$$

Такая методика обеспечивает эффективную фильтрацию гармоник при высокой точности измерений [4].

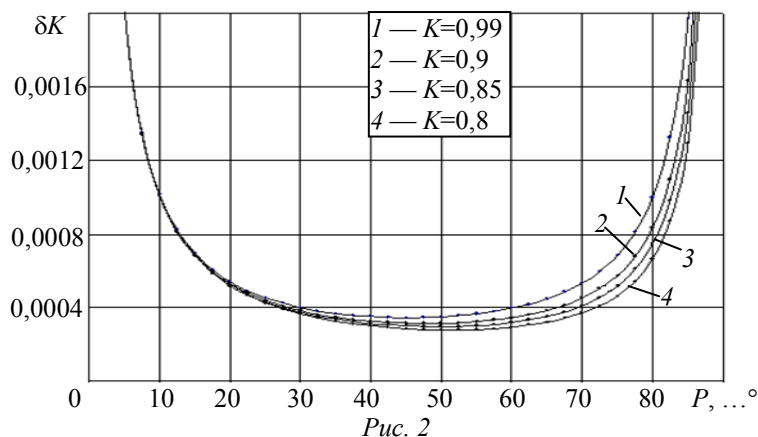
Численное моделирование погрешности измерения поляризационной чувствительности. Задаваясь абсолютной погрешностью измерения фазы $\delta\varphi$ основной составляющей, соответствующей погрешности измерения азимута поляризованного излучения динамическим фотометрическим эллипсометром, определим погрешность измерения параметра K как

$$\delta K = \left| \frac{dK}{d\varphi} \right| \delta\varphi. \quad (4)$$

Выражение (4) имеет вид функциональной зависимости $\delta K = f(\delta\varphi, P, K)$, определяемой при подстановке уравнения (1) в выражение (4):

$$\delta K = \frac{2 \sin 2P}{(1 - \cos 2P + \sin 2P \operatorname{tg} 2\varphi_{2A})^2 \cos^2 2\varphi_{2A}} \delta\varphi. \quad (5)$$

Результаты расчета поляризационной чувствительности по формуле (5) для $\delta\varphi=0,01$, представленные на рис. 2, показывают, что минимальная погрешность δK обеспечивается при азимутах поляризатора, близких к 45° относительно осей максимальной и минимальной чувствительности приемника, и практически не зависит от величины измеряемого параметра K .



Аналогичные расчеты, проведенные для второго способа измерения, позволяют получить следующее выражение для погрешности δK :

$$\delta K = \left| \frac{dK}{dC} \right| (1 - C) \frac{\delta I}{I}, \quad (6)$$

где $\delta I/I$ — относительная погрешность измерения амплитуд основной и четвертой гармоник в спектре выходного сигнала.

Значение $\frac{dK}{dC}$ в выражении (6) может быть получено дифференцированием уравнения (3) при подстановке соответствующих значений параметров, входящих в данное выражение. Результаты расчета при $\delta I/I = 0,1\%$, представленные на рис. 3, показывают, что с ростом поляризационной чувствительности происходит уменьшение погрешности δK . Существует слабая зависимость погрешности от азимута поляризатора, достигающая минимума при $P=90^\circ$.

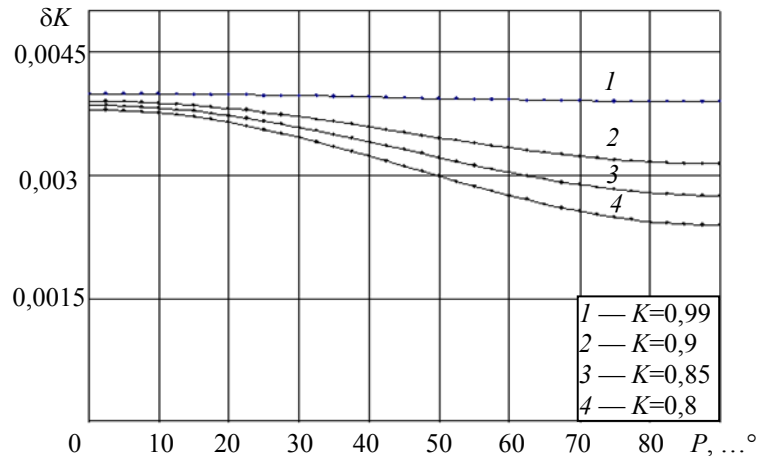


Рис. 3

Сопоставление представленных зависимостей позволяет сделать вывод, что способ определения поляризационной чувствительности по изменению фазового сдвига основной гармонической составляющей обладает на порядок большей точностью, чем при анализе отношения амплитуд четвертой и основной гармоник. С другой стороны, величина $\varphi_{2,4}$ является информационным сигналом при проведении эллипсометрических измерений, и, таким образом, для использования непосредственно в рабочих схемах эллипсометров предпочтителен второй способ. Коррекция систематической погрешности в этом случае может быть выполнена по следующей методике: 1) анализ четвертой гармоники углового положения анализатора; 2) определение значения K ; 3) расчет и внесение поправок к фурье-коэффициентам основной гармоники по определенному значению K . В поляриметрических схемах может быть вычислена соответствующая поправка к измеряемому азимуту поляризованного излучения.

Результаты экспериментов. Экспериментальные исследования показали наличие поляризационной чувствительности отдельных образцов кремниевых фотодиодов на уровне 1—3 % (по величине $(1-K) \cdot 100\%$). При удалении входного окна фотоприемника это значение снижалось до уровня 0,2—0,5 %, что указывает на преобладающее влияние входного окна и его расположения относительно чувствительной площадки приемника на механизм поляризационной чувствительности. Для оптического тракта пироэлектрического приемника излучения, включающего в себя фокусирующую германиевую линзу, входное окно и чувствительный элемент приемника, получены более высокие (до 5 %) значения поляризационной чувствительности, что указывает на необходимость ее учета в процессе эллипсометрических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Буров Л. И., Гулаков И. Р. Поляризационная чувствительность фотокатодов фотоприемников излучения // Журн. прикладной спектроскопии. 1981. Т. 51, вып. 2. С. 313—315.
2. Чен Б. Б., Свердлик Л. Г. Поляризация лазерного излучения в пыли и облаке в центрально-азиатском районе // Вестн. Кыргызско-Российского Славянского университета. 2003. Т. 3, № 5. С. 90—96.

3. Пат. 2426078 РФ. Способ измерения поляризационной чувствительности приемника оптического излучения (варианты) / С. А. Алексеев, Н. В. Матвеев. 2011.
4. Алексеев С. А., Рондарев В. С. Случайные погрешности в эллипсометрах с вращающимся анализатором // Автометрия. 1985. № 4, вып. 2. С. 41—44.

Сведения об авторах

Сергей Андреевич Алексеев

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники;
E-mail: alekseev@grv.ifmo.ru

Николай Вадимович Матвеев

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: matveev_nv@mail.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
10.04.12 г.

УДК 681.787.7

О. П. БОЛЬШАКОВ, И. Р. КОТОВ, Е. Е. МАЙОРОВ, В. Т. ПРОКОПЕНКО

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПЕРЕКРЕСТНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИИ
НА ПОГРЕШНОСТЬ ИНТЕРФЕРОМЕТРА СДВИГА**

Рассматривается работа интерферометра сдвига как элемента настройки интерференционных полос при обработке двухэкспозиционных голограмм диффузно отражающих объектов. Представлен теоретический анализ влияния перекрестной интерференции на точность измерения фазы полос.

Ключевые слова: голография, интерференция, интерферометр сдвига.

Метод голографической интерферометрии находит широкое применение при неразрушающем контроле, а также при измерении величины смещений и деформаций диффузно отражающих объектов. Интерес к использованию этого метода обусловлен его высокой информативностью, возможностью получения трехмерных изображений и отсутствием предметных связей с изучаемым объектом. Среди методов оптической обработки голографических интерферограмм следует особо выделить метод гетеродинной голографической интерферометрии [1], который позволяет считывать информацию с точностью до 0,001 интерференционной полосы. Эффективное использование этого метода предусматривает операцию настройки интерференционных полос. Способ настройки шага полос для изменения геометрии схемы их восстановления за счет второго опорного пучка не лишен недостатков и имеет существенные ограничения по величине компенсируемых смещений и наклонов объектов, что оказывает значительное влияние на качество восстановленного изображения и интерферограммы [2, 3]. Использование для настройки полос интерферометра сдвига [4, 5] свободно от указанных недостатков, однако остается открытым вопрос о влиянии на погрешность измерений перекрестной интерференции световых лучей на выходе интерферометра.

В настоящей статье анализируется работа интерферометра сдвига как элемента настройки интерференционных полос при обработке двухэкспозиционных голограмм диффузно отражающих объектов. На рис. 1 представлена схема, отображающая элементы интерференционной системы и поясняющая принцип настройки полос при расшифровке голографических интерферограмм. Наличие смещения d_n пластины, вносимого интерферометром, обусловлено

изменением его настройки. При равенстве смещения d_n величине основного смещения d результирующее смещение равно нулю. При этом лучи b_1, a_2 совмещены в пространстве, интерференционная картина представлена бесконечно широкой полосой, и составляющая U_Δ сигнала фотоприемника имеет максимальное значение.

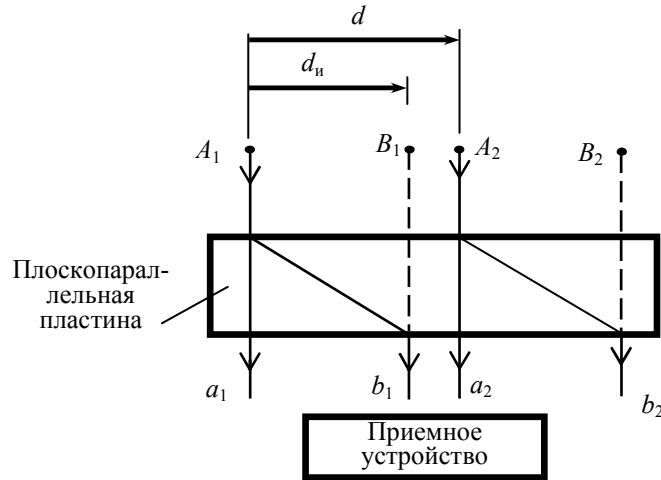


Рис. 1

Величина измеряемого смещения d в соответствии с известным уравнением для интерпретации голографических интерферограмм [6]

$$\varphi = d(\mathbf{k}_n - \mathbf{k}_0),$$

где $\mathbf{k}_0, \mathbf{k}_n$ — волновые векторы, характеризующие направление освещения и направление наблюдения соответственно, φ — фаза интерференционных полос, характеризует изменение фазы полос $\Delta\varphi$.

Метод гетеродинной голографической интерферометрии позволяет преобразовать фазу φ интерференционных полос в фазу Φ электрического сигнала, которая измеряется с помощью устройств электронной техники. Поскольку измеряется величина Φ , точность определения смещения d зависит от степени соответствия изменения разности фаз лучей $\Delta\varphi$ изменению фазы сигнала $\Delta\Phi$. В идеальном случае $\Delta\Phi = \Delta\varphi$. Однако наличие в выходном сигнале составляющих U_n и U_Σ перекрестной интерференции, обусловленных когерентным сложением лучей $(a_1, b_1), (a_1, a_2), (a_1, b_2), (b_1, b_2), (a_2, b_2)$ — см. рис. 1, нарушает это равенство, что приводит к погрешности определения смещения d .

Для анализа этой погрешности необходимо оценить отклонение $\delta\varphi$ измеряемой фазы Φ электрического сигнала от истинного значения φ :

$$\delta\varphi = \Delta\varphi - \Delta\Phi.$$

Выражение для фазы Φ электрического сигнала можно получить, проинтегрировав результат интерференции лучей на выходе интерферометра с учетом фазовых соотношений:

$$\Phi = \text{arctg}(\xi_1, \xi_2),$$

$$\xi_1 = \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n d_n}{\lambda}}{d_n} \sin \varphi_{n0} + \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n (d_n + d + \Delta d)}{\lambda}}{d_n + d + \Delta d} \sin(\varphi_{n0} + \varphi_0 + \Delta\varphi) - \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n \Delta d}{\lambda}}{\Delta d} \sin \Delta\varphi,$$

$$\xi_2 = \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n d_n}{\lambda}}{d_n} \cos \varphi_{n0} + \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n (d_n + d + \Delta d)}{\lambda}}{d_n + d + \Delta d} \cos(\varphi_{n0} + \varphi_0 + \Delta\varphi) - \frac{\sin \frac{2\pi\alpha_n \Delta d}{\lambda}}{\Delta d} \cos \Delta\varphi,$$

где $2\alpha_n$ — апертурный угол наблюдения; Δd — величина, характеризующая расстройку интерферометра; λ — длина волны восстанавливающего излучения; $\varphi_0 = \frac{2\pi\alpha_0 d}{\lambda}$ и $\varphi_{и0} = \frac{2\pi\alpha_0 d_{и}}{\lambda}$ — начальная фаза полос и фаза полос при смещении, где α_0 — угол, соответствующий биссектрисе апертуры наблюдения.

Расчеты выполнены для настроенного интерферометра при различных значениях апертуры фотоприемника $2\alpha_n$ (рис. 2), при этом $d_{и} = d$, $\Delta d = 0$. Как следует из графических зависимостей, меньшая фазовая ошибка (кривая 1) соответствует меньшей апертуре фотоприемника (в отличие от кривых 2, 3). Это объясняется тем, что при меньшей апертуре влияние составляющих $U_{и}$ и U_{Σ} сигнала на значение измеряемой фазы сигнала менее критично.

При небольших значениях d превышение U_{Δ} относительно $U_{и}$ и U_{Σ} не столь очевидно (рис. 3), следствием чего является значительная погрешность измерения (до 0,06 рад). По мере увеличения измеряемого смещения погрешность снижается практически до нуля, что объясняется еще более значительным доминированием амплитуды составляющей U_{Δ} (кривая 3) относительно $U_{и}$ и U_{Σ} (кривые 1, 2). Анализ графиков на рис. 3 показывает также, что зависимость $\delta\varphi$ от величины смещения d можно сделать сколь угодно малой, придав дополнительное искусственное смещение объекту между экспозициями. Так, при дополнительном смещении примерно 10 мкм максимальная погрешность не превышает 0,001 доли интерференционной полосы.

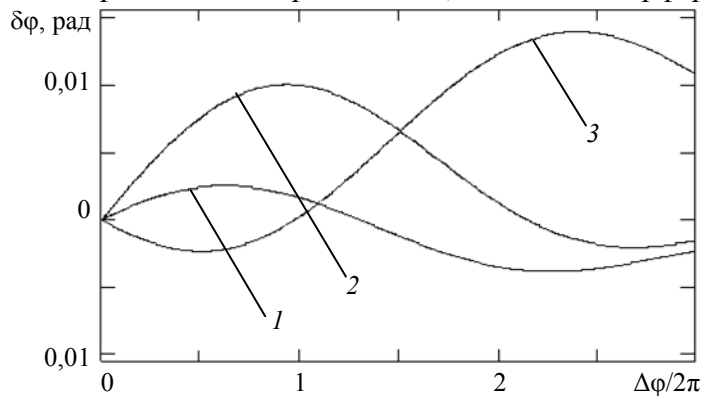


Рис. 2

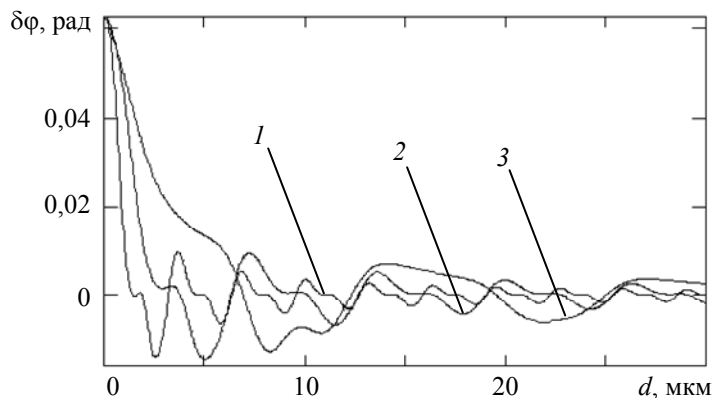


Рис. 3

Таким образом, анализ настройки интерференционных полос с использованием интерферометра сдвига показал, что погрешность измерения фазы полос, обусловленная наличием перекрестной интерференции, не превышает 0,015 рад, что составляет 0,002 доли интерференционной полосы. Для величин измеряемых смещений, превышающих 10 мкм, вышеупомянутой погрешностью практически можно пренебречь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Dandliker R.* Heterodyne holographic interferometry // *Progress in Optics*. 1980. Vol. 7. P. 3—81.
2. *Thalman R., Dandliker R.* Strain measurement by heterodyne holographic interferometry // *Applied Optics*. 1987. Vol. 26, N 10. P. 1964—1971.
3. *Banyasz I., Kiss G., Varga P.* Holographic image of a point source in the presence of misalignment // *Applied Optics*. 1988. Vol. 27, N 7. P. 1293—1297.
4. *Нагибина И. М., Хопов В. В.* Автоматизированная обработка голографических интерферограмм при определении вектора смещения диффузно отражающих поверхностей // *Изв. вузов СССР. Приборостроение*. 1983. Т. 26, № 2. С. 80—84.
5. *Большаков О. П., Котов И. Р., Майорова О. В.* Настройка параметров интерференционного поля в голографической интерферометрии // *Материалы XI Всерос. конф. по проблемам науки и высшей школы „Фундаментальные исследования и инновации в технических университетах“*. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2007. С. 143.
6. *Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М.* Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // *ЖТФ*. 1967. Т. 37, вып. 2. С. 360—365.

Сведения об авторах

- Олег Петрович Большаков** — д-р мед. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И. П. Павлова, кафедра оперативной хирургии и клинической анатомии; E-mail: irkotov@mail.ru
- Игорь Ростиславович Котов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И. П. Павлова, лаборатория голографии; E-mail: irkotov@mail.ru
- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра медицинской информатики и физики; E-mail: mayogov_ee@mail.ru
- Виктор Трофимович Прокопенко** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию
29.12.11 г.

УДК 547.97:535.8; 541.147

Т. В. ЯКОВЛЕВА, Н. Н. АРЕФЬЕВА

РАСЧЕТ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КАНАЛЬНЫХ ВОЛНОВОДОВ ДЛЯ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

Представлена методика расчета геометрических размеров канальных волноводов с использованием метода эффективного показателя преломления.

Ключевые слова: канальный волновод, метод эффективного показателя преломления.

Современные оптические интегральные схемы состоят из активных и пассивных элементов. Обычно под активными элементами понимаются компоненты, для функционирования которых требуется приложение управляющего напряжения, пропускание тока или подача оптического управляющего сигнала. Пассивными являются элементы, выполняющие

фиксированное преобразование информационного оптического сигнала или волны, при котором не требуются управляющие электрические или оптические сигналы.

Одними из важнейших активных элементов оптических интегральных схем являются волноводные модуляторы. Самый распространенный на сегодняшний день тип модуляторов основан на волноводном варианте интерферометра Маха — Цандера с использованием одно-модовых оптических волноводов.

Начальный этап разработки модулятора — расчет необходимых геометрических размеров канальных волноводов. К настоящему времени существует достаточное количество численных методов анализа волноводных структур. Однако при численном решении способы задания граничных условий и их влияние на точность получаемого решения не являются очевидными, а сами методы зачастую громоздки и трудны для использования в более сложных системах моделирования.

В связи с этим в некоторых случаях более целесообразным представляется применение метода эффективного показателя преломления (The Effective Index Method) — приближенного метода, который сводит задачу анализа трехмерной волноводной конфигурации к двумерной и позволяет, таким образом, применить стандартные методы анализа планарных волноводов [1, 2]. Расчету геометрических размеров волноводов с использованием метода эффективного показателя преломления и посвящена настоящая статья.

Суть метода заключается в том, что исходный трехмерный волновод (рис. 1, а) в соответствии со структурой поперечного сечения разделяется на области, каждая из которых затем рассматривается независимо как неограниченный по оси y планарный волновод (рис. 1, б).

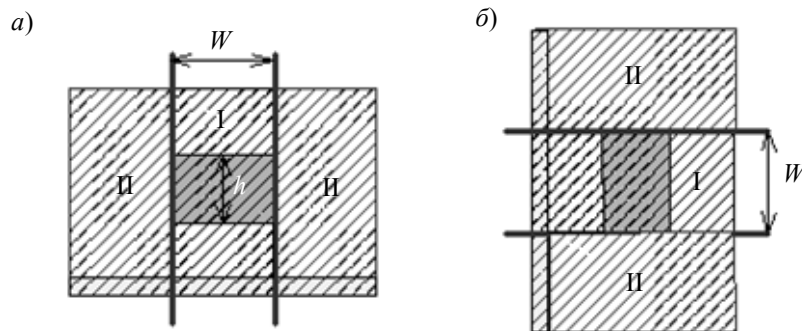


Рис. 1

В случае заглубленного канального волновода его левая и правая области (обозначены цифрой II) представляют собой однородные слои вещества и не нуждаются в дополнительном анализе, а волноводный слой находится в центральной области (обозначена цифрой I).

Взаимозависимость толщины h планарного волновода, т.е. высоты канального волновода, и эффективного показателя преломления n^* описывается дисперсионным соотношением [3]

$$2\pi h \sqrt{n_f^2 - (n^*)^2} / \lambda = (n_f / n_s)^\chi \arctg \left(\sqrt{(n^*)^2 - n_s^2} / \sqrt{n_f^2 - (n^*)^2} \right) + (n_f / n_c)^\chi \arctg \left(\sqrt{(n^*)^2 - n_c^2} / \sqrt{n_f^2 - (n^*)^2} \right) + \pi, \quad (1)$$

где n_f — показатель преломления волноводного слоя; n_s и n_c — показатели преломления подложки и покрытия волновода соответственно; $\chi=1$ — коэффициент.

Для вычисления необходимой ширины W канального волновода следует рассмотреть эквивалентный исходному канальному волноводу симметричный планарный волновод (см. рис 1, б). В качестве показателей преломления подложки и покрытия используются эф-

фактивные показатели преломления областей II, а в качестве показателя преломления волноводного слоя — эффективный показатель преломления области I. В этом случае толщина планарного волновода эквивалентна искомой ширине канального.

Зная эффективный показатель преломления, теоретически можно однозначно определить требуемую высоту планарного волновода. Но поскольку значение n^* не задается, а находится в интервале $n_s < n^* < n_f$, то вычислить можно только диапазон высот волновода.

Исходя из условия существования заданного числа мод M в направлении оси y можно легко вычислить диапазон возможных значений ширины канального волновода [4]:

$$(M - 1) < 2\sqrt{(n_I^*)^2 - (n_{II}^*)^2} \cdot W/\lambda < M,$$

где n_I^* и n_{II}^* — эффективный показатель преломления областей I и II.

Современные оптические линии связи в основном работают в диапазоне длин волн порядка 1,3...1,55 мкм. В интегрально-оптических устройствах логично использовать те же длины волн. Рабочая длина волны для рассчитываемого волновода принята равной 1,3 мкм.

Подложка и покрытие волновода изготавливаются из полимерной композиции с $n_s=n_c=1,52$, а волноводный слой — из композиции с $n_f=1,57$. Выбор ширины W ограничен условием одномодового режима [5]:

$$0 < 2\sqrt{(n_I^*)^2 - (n_{II}^*)^2} \cdot W/\lambda < 1. \quad (2)$$

Таким образом, геометрические размеры одномодового заглубленного канального волновода согласно (1), (2) находятся в следующих пределах:

$$3,7 < W < 10,54 \text{ мкм}; \quad 2,09 < h < 6,25 \text{ мкм}.$$

Методика выбора конкретных размеров канального волновода построена на графическом анализе взаимной зависимости высоты, ширины, нормированной высоты и нормированной постоянной распространения моды в волноводе [4].

Для одного из значений высоты h определяется нормированная высота V_1 волноводного слоя (рис. 2, а): $V_1=5,7$ для $h=3$ мкм.

С использованием кривой дисперсионного уравнения [3] (рис. 2, б) определяется нормированная постоянная распространения b_1 для центральной области I (рис. 2, б) по формуле

$$V\sqrt{1-b} = \arctg(\sqrt{b}/\sqrt{1-b}) + \arctg(\sqrt{b+a}/\sqrt{1+b}) + \pi(M-1),$$

где a — степень асимметрии, в данном случае $a=0$, так как $n_c = n_s$ [4].

Таким образом, $b_1=0,825$ для $V_1=5,7$.

Теперь можно построить зависимость нормированной высоты канального волновода от выбранной ширины (рис. 2, в):

$$V = 2\pi W \sqrt{b_1} \cdot \frac{\sqrt{2n_s(n_f - n_s)}}{\lambda}, \quad V=17,115 \text{ для } W=10 \text{ мкм}.$$

Наконец, с использованием кривой дисперсионного уравнения определяется значение нормированной постоянной распространения канального волновода (рис. 2, г): $b=0,97$ при $h=3$ мкм, $W=10$ мкм, $V=17,115$.

Эффективный показатель преломления распространяющейся моды рассчитывается как

$$(n^*)^2 = n_s^2 - (n_f^2 - n_s^2)(b(b_1 - 0) + 0), \quad n^*=1,56.$$

Результаты моделирования распространения света в волноводе, проведенного с использованием программы 2-D Multilayer Waveguide Mode Solver [6] представлены на рис. 3, где a — распределение моды в волноводе, \bar{b} — профиль интенсивности поля моды.

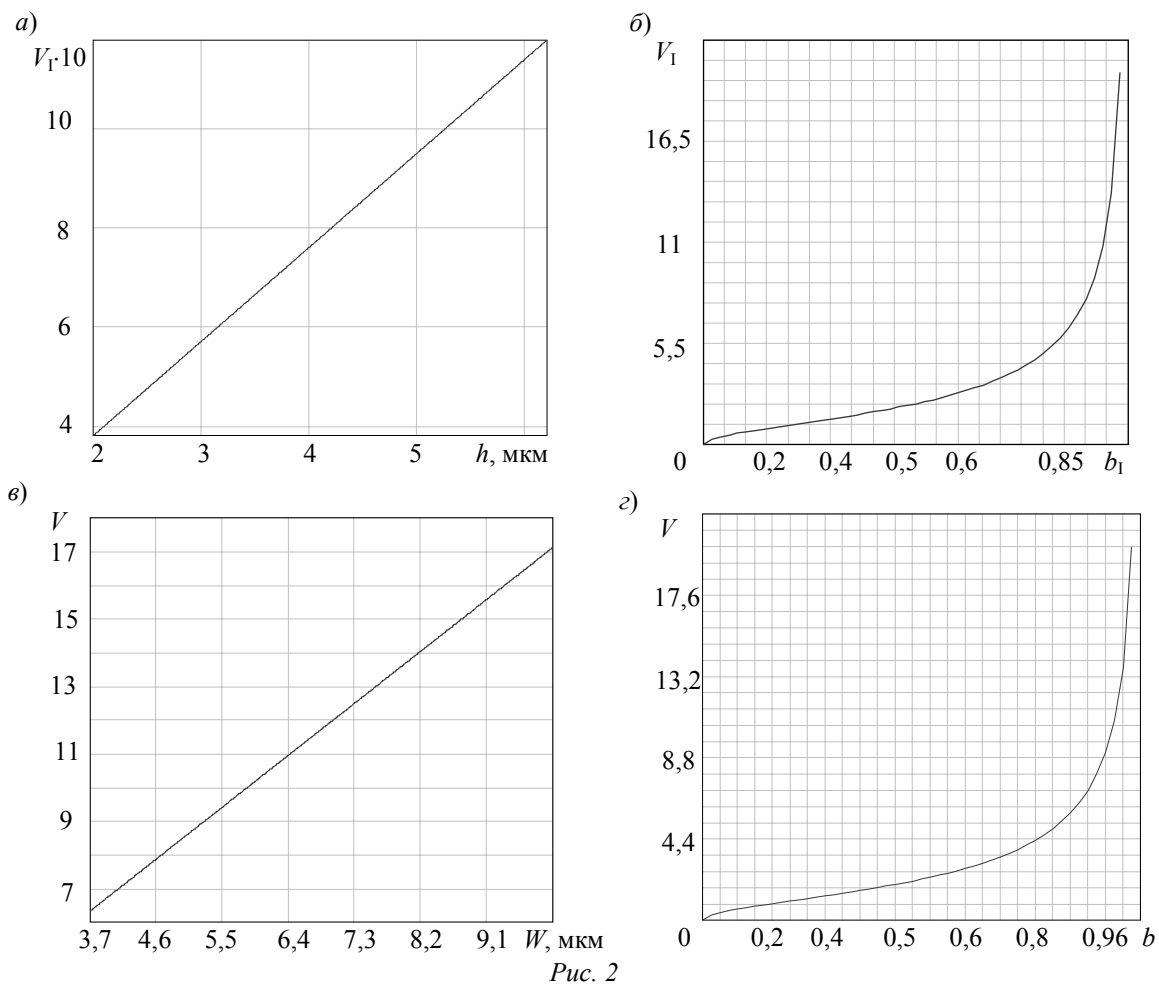


Рис. 2

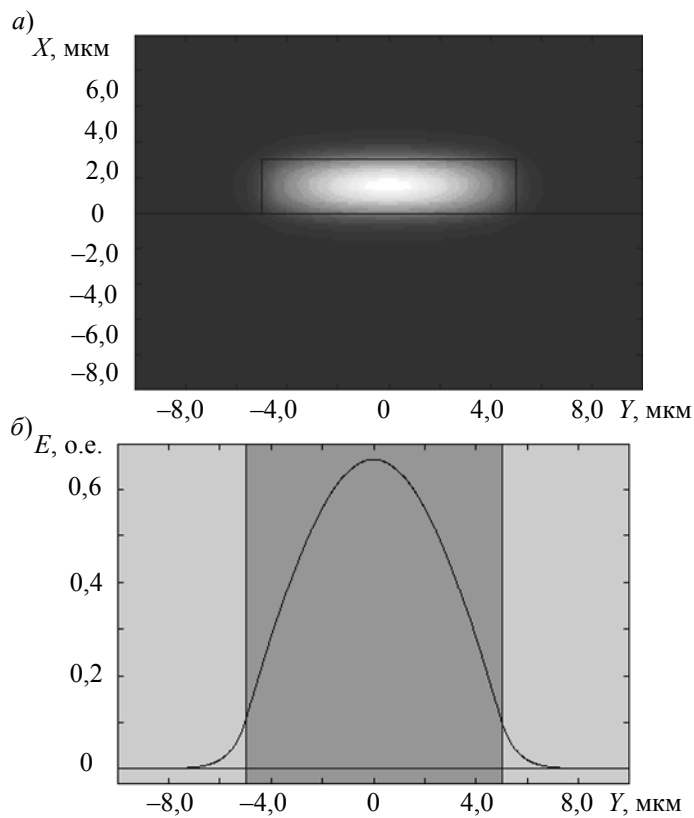


Рис. 3

Результаты моделирования соответствуют заданному условию одномодовости.

Таким образом, метод эффективного показателя преломления представляется вполне пригодным для расчета геометрических размеров оптических канальных волноводов. Результаты расчета использованы при экспериментальном изготовлении канального полимерного волновода, Y-разветвителей и модулятора Маха — Цендера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tamir T.* Guided-Wave Optoelectronics. . N. Y.: Springer-Verlag, 1988.
2. *Батрак Д. В., Плисюк С. А.* Применимость метода эффективного показателя преломления для моделирования гребневых оптических волноводов // Квантовая электроника. 2006. № 4.
3. *Унгер Х.* Планарные и волоконные оптические волноводы. М.: Мир, 1980.
4. *Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В.* Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990.
5. *Денисов С. Д., Овчинникова Е. А., Осовицкий А. Н.* Сравнительный анализ характеристик канальных волноводов для планарных (де)мультиплексоров // Фотон-экспресс. 2005. № 6. С. 32—37.
6. *Lohmeyer M.* Vectorial wave-matching-method mode analysis of integrated optical waveguides // Optical and Quantum Electronics. 1998. N 30. С. 385—396.

Сведения об авторах

- Татьяна Владимировна Яковлева** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; E-mail: tatianayako@yandex.ru
- Наталья Николаевна Арефьева** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптики квантоворазмерных систем; ассистент; E-mail: natali-arefeva@rambler.ru

Рекомендована кафедрой
оптики квантоворазмерных систем

Поступила в редакцию
17.05.11 г.

УДК 51-74; 535.346.1

Н. П. БЕЛОВ, В. Н. ГРИСИМОВ, А. С. ШЕРСТОБИТОВА, А. Д. ЯСЬКОВ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРУЮЩЕЙ СФЕРЫ С ЭКРАНОМ

Представлены результаты численного моделирования интегрирующей сферы, имеющей экран для исключения попадания на исследуемый образец (диффузный отражатель) прямого освещения от излучателя, расположенного вблизи центра сферы. Приводятся результаты анализа распределения освещенности внутри сферы такой конфигурации.

Ключевые слова: интегрирующая сфера, освещенность, коэффициенты диффузного отражения, фотометрическая погрешность.

Интегрирующая сфера широко применяется для измерения коэффициента диффузного отражения различных объектов. Для сферы такой конфигурации, где освещение от излучателя падает на стенки сферы, а приемник регистрирует световой поток, отраженный от образца, требуется исключить прямое попадание излучения от источника на образец. Это может быть обеспечено экраном, устанавливаемым в полости сферы. Цель исследования, описываемого

в настоящей статье, состояла в численном анализе распределения освещенности и погрешностей измерения коэффициентов отражения для интегрирующей сферы, имеющей экран.

Конфигурация интегрирующей сферы с экраном изображена схематически на рис. 1, где 1 — сфера, 2 — экран, 3 — оптическое волокно, 4 — люк для установки образца.

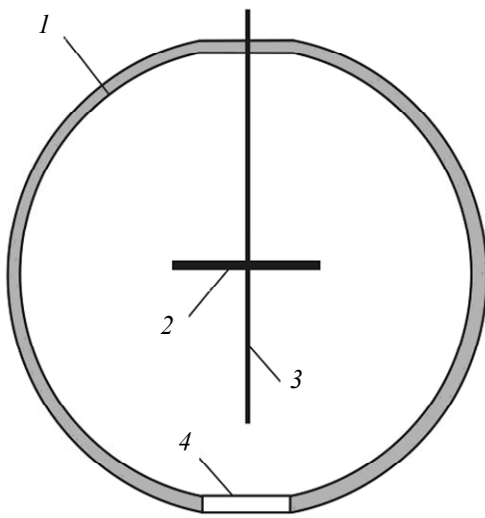


Рис. 1

В прикладном отношении такая геометрия интегрирующей сферы может представлять значительный интерес, поскольку, во-первых, благодаря осевой симметрии данной конструкции может быть обеспечено более равномерное распределение освещенности на внутренней поверхности сферы, а расположение излучателя в полости сферы повышает эффективность его светодачи; во-вторых, здесь в качестве коллектора отраженного излучения целесообразно использовать оптоволокно, что позволяет упростить прием отраженного излучения и передачу его к фотоприемнику (в том числе, ввод излучения в монохроматор). Вместе с тем анализ интегрирующей сферы с внешним расположением осветителя и фотоприемника ранее производился (см., например, [1, 2]), тогда как для рассматриваемой сферы с экраном (в представленной на рис. 1 конфигурации)

такие данные в известной литературе отсутствуют.

Для определения функциональности конструкции необходимо знать распределение освещенности внутри сферы. Если принять, что излучение отражается по закону Ламберта, освещенность внутри сферы можно определить матричным методом [1, 3]. В соответствии с этим методом осуществляется разбиение поверхности внутри сферы на N кольцевых зон, имеющих одинаковые коэффициенты отражения и освещенности (рис. 2). Обмен излучением между элементами двух зон в точках с координатами Ω_i и Ω_j определяется конфигурационными факторами $G(\Omega_i, \Omega_j)$:

$$G(\Omega_i, \Omega_j) = \frac{(\chi \cdot \eta) \cdot (\chi \cdot \eta)}{\pi \chi_{ij}^4} = \frac{\cos \xi_i \cos \xi_j}{\pi \chi_{ij}^2},$$

где χ — вектор, направленный от точки Ω_j к точке Ω_i , η — нормальный единичный вектор; ξ_i — угол между вектором, направленным от точки Ω_j к точке Ω_i , и нормалью к поверхности в точке Ω_i ; ξ_j — угол между вектором, направленным от точки Ω_i к точке Ω_j , и нормалью к поверхности в точке Ω_j ; χ_{ij} — расстояние между точками Ω_i и Ω_j ; i и j — индексы зон: $1 \leq i \leq N, 1 \leq j \leq N$.

Направления излучения на каждую из кольцевых зон на внутренней поверхности сферы задаются соответствующими углами в пределах $-90^\circ \leq \theta_i \leq 90^\circ$. Начало координат находится в центре сферы.

Для дальнейшего анализа целесообразно выделить области, участвующие в обмене излучением: поверхность образца, поверхности верхней и нижней полусферы и поверхность экрана. При этом конфигурационные факторы $G(\Omega_i, \Omega_j)$ определяются исходя из геометрии взаимодействующих областей: верхняя полусфера — верхняя полусфера; нижняя полусфера — нижняя полусфера; верхняя полусфера — нижняя полусфера; нижняя полусфера — верхняя полусфера; верхняя полусфера — верхняя поверхность экрана; нижняя полусфера —

нижняя поверхность экрана; верхняя полусфера — поверхность образца; нижняя полусфера — поверхность образца; нижняя поверхность экрана — поверхность образца.

Конфигурационные факторы $G(\Omega_i, \Omega_j)$ при обмене излучением в полости сферы, а также между поверхностью сферы и образцом для рассматриваемой сферы же, что и для сферы без экрана; их явный вид приведен в работе [1].

В исследуемой конфигурации сферы с экраном (см. рис. 1) требуется учитывать также взаимодействие между полостью сферы и экраном и между образцом и нижней поверхностью экрана. Геометрические соотношения, необходимые для вычисления факторов $G(\Omega_i, \Omega_j)$ при расположении экрана в центре сферы, иллюстрируются схемой, приведенной на рис. 2.

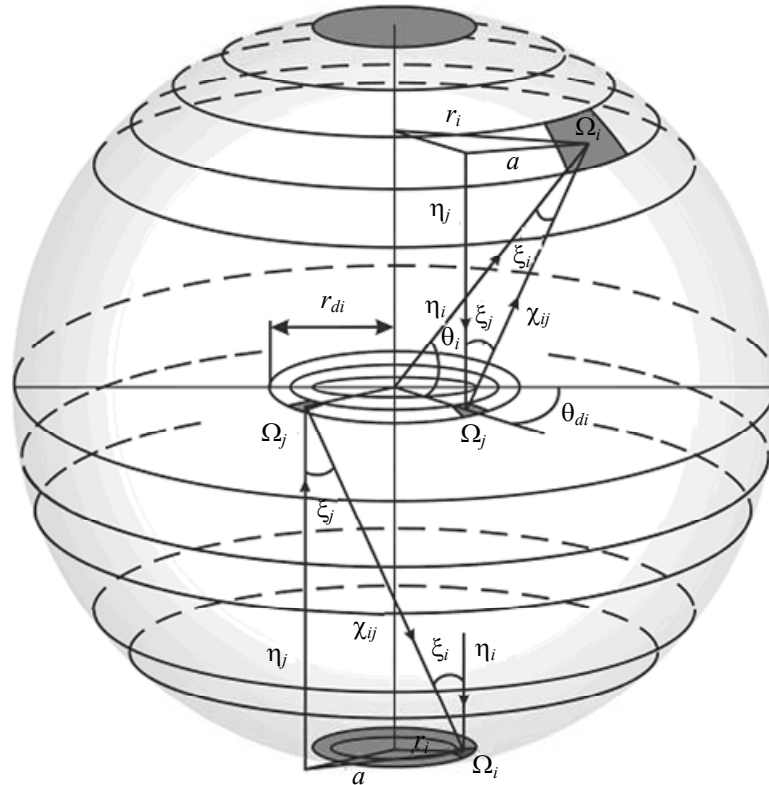


Рис. 2

Конфигурационные факторы, определяющие обмен излучением между верхней полусферой и верхней поверхностью экрана, нижней полусферой и нижней поверхностью экрана, совпадают и определяются как

$$G(\Omega_i, \Omega_j) = \left(\frac{a^2 - \chi_{ij}^2 - \eta_i^2}{-2\chi_{ij}\eta_i} \right) \cdot \left(\frac{r_{di}^2 - \chi_{ij}^2 - R^2}{-2\chi_{ij}R} \right) / \pi\chi_{ij}^2;$$

конфигурационный фактор для взаимодействующих нижней поверхности экрана и поверхности образца определяется выражением

$$G(\Omega_i, \Omega_j) = \left(\frac{a^2 - \chi_{ij}^2 - \eta_i^2}{-2\chi_{ij}\eta_i} \right)^2 / \pi\chi_{ij}^2,$$

здесь $a^2 = r_i^2 + r_{di}^2 - 2r_i r_{di} \cos \theta_{di}$, r_i — радиус зоны, R — радиус сферы, r_{di} — радиус экрана, θ_{di} — азимутальный угол в плоскости экрана, изменяющийся в пределах $0 \leq \theta_{di} \leq 360^\circ$.

Освещенность i -й зоны можно представить в виде уравнения [1]

$$H(\Omega_i) = H_0(\Omega_i) + \sum_j H(\Omega_j) \rho(\Omega_j) G(\Omega_i, \Omega_j) \lambda_j,$$

где H_0 — начальная освещенность; $H(\Omega_j)$ — освещенность j -й зоны, $\rho(\Omega_j)$ — ее коэффициент отражения; λ_j — весовые множители, определяемые методом интегрирования по поверхности зоны и представляющие собой площади элементарных участков кольцевых зон.

Начальная освещенность H_0 задается в виде равномерного распределения в пределах круга на верхней поверхности экрана. Диаметр этого круга такой же, как и у входного люка. Предполагается, что оптоволоконный коллектор не влияет на распределение излучения внутри сферы.

Задача расчета освещенности представляется в виде матричного уравнения:

$$H = (I - M)^{-1} H_0,$$

где I — единичная матрица, M — переходная матрица (матрица передаточных коэффициентов): $M = \rho G \lambda$.

В приводимых ниже расчетах число зон составляло $N = 334$; дальнейшее их увеличение практически не влияло на расчетные данные.

Для учета перекрытия экраном отдельных зон при взаимодействии верхней и нижней полусфер, а также верхней полусферы и образца выполнялось разделение кольцевых зон на экране на угловые секторы (соответствующий угол составлял 2°) и интегрирование освещенности по каждому из секторов, в которых перекрытие потока излучения экраном отсутствовало.

Представленные результаты расчетов относятся к интегрирующей сфере с экраном, которая использовалась в составе спектральных приборов, аналогичных лабораторному спектрометру, рассмотренному в работе [4]. Оптогеометрические характеристики сферы следующие: диаметр полости сферы 70 мм; диаметр люка 15 мм; диаметр экрана 23 мм; диаметр волоконно-оптического коллектора 1 мм; коэффициенты отражения поверхности сферы и экрана 0,96.

Результаты расчетов приведены в виде графика на рис. 3. Здесь показано распределение освещенности ($\Delta H = H - H_0$) внутри сферы, вычисленное для пяти образцов с различными коэффициентами диффузного отражения ρ . По оси абсцисс приведена нумерация кольцевых зон (i).

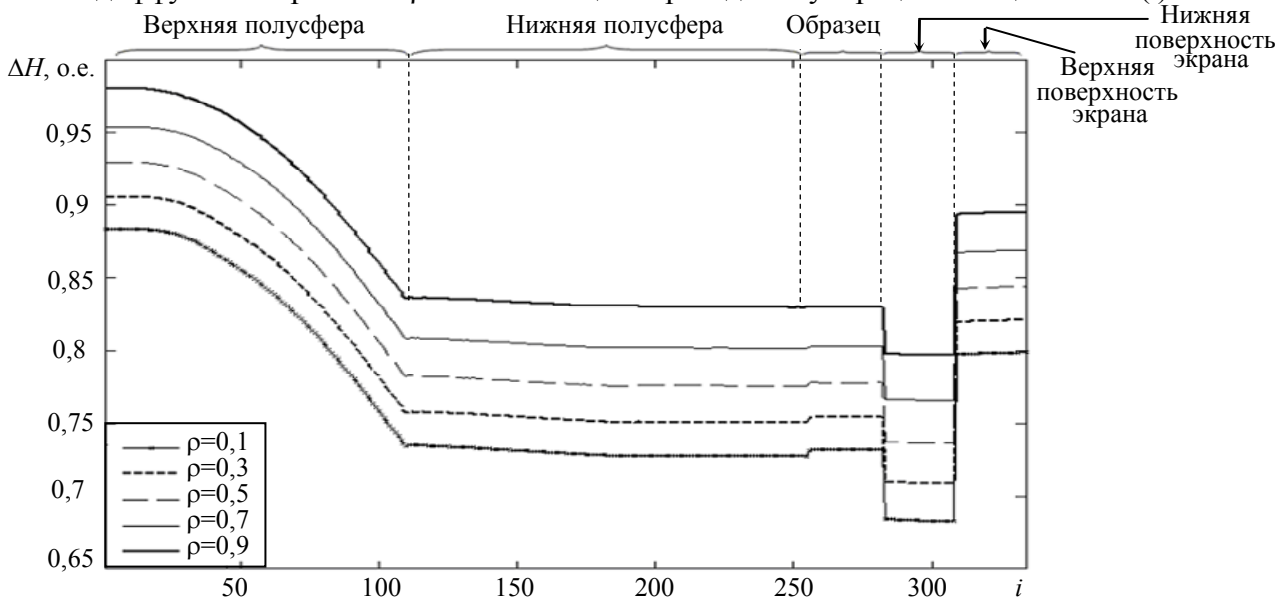


Рис. 3

Анализ графиков показал, что наибольшую неравномерность освещенности имеет верхняя полусфера, на которую попадает поток излучения, отраженный от верхней поверхности

экрана; общая освещенность снижается с уменьшением коэффициента отражения образца. Согласно сопоставительному анализу расчетных данных для рассматриваемой конфигурации интегрирующей сферы и для сферы без экрана (где первоначальное излучение падает на образец при постоянстве остальных оптогеометрических параметров) распределение освещенности на поверхности образца остается равномерным в пределах $\pm 0,01$. Это подтверждается данными табл. 1, где приведены значения освещенности ΔH для образцов с коэффициентами отражения 0,1 и 0,9, рассчитанные для сферы с экраном и без него.

Таблица 1

i	ΔH (сфера с экраном), при		ΔH (сфера без экрана), при	
	$\rho=0,1$	$\rho=0,9$	$\rho=0,1$	$\rho=0,9$
259	0,7319	0,8300	0,7275	0,8259
261	0,7318	0,8299	0,7274	0,8258
263	0,7318	0,8299	0,7273	0,8257
265	0,7319	0,8300	0,7272	0,8255
267	0,7317	0,8298	0,7272	0,8255
269	0,7319	0,8300	0,7272	0,8255
271	0,7319	0,8300	0,7272	0,8255
273	0,7318	0,8299	0,7272	0,8255
275	0,7319	0,8301	0,7272	0,8255
277	0,7319	0,8300	0,7272	0,8255
279	0,7318	0,8302	0,7272	0,8255
281	0,7320	0,8302	0,7272	0,8255

Значения относительной погрешности измерений распределения освещенности δH для пяти образцов (диффузных отражателей) с различными коэффициентами отражения приведены в табл. 2. Для сравнения в этой же таблице показаны результаты расчетов относительной фотометрической погрешности $\delta H'$, выполненных по формуле А6 из работы [1], для сферы без экрана.

Таблица 2

ρ	δH (сфера с экраном)	δH (сфера без экрана)	$\delta H'$ (формула А6, [1])
0,1	0,0467	0,0458	0,0485
0,3	0,0453	0,0444	0,0470
0,5	0,0439	0,0430	0,0454
0,7	0,0425	0,0416	0,0439
0,9	0,0411	0,0402	0,0423

Как видно, погрешность измерения остается практически без изменений для обеих геометрий сферы.

Таким образом, использование экрана в полости интегрирующей сферы не вносит дополнительной погрешности в данные измерений. В целом это подтверждает известное положение о том, что главным фактором, определяющим основную фотометрическую погрешность методов измерения коэффициента диффузного отражения, в которых используется интегрирующая сфера, является соотношение площадей поверхностей полости сферы и люка для установки образца [5].

Представляет интерес также анализ влияния размеров экрана и оптоволоконного коллектора на распределение освещенности сферы исследуемой конфигурации (см. рис. 1). Дополнительные расчеты показали, что варьирование диаметра экрана в пределах 10,45—23,00 мм практически не влияет на уровень и распределение освещенности как на внутренней поверхности сферы, так и образца. В расчетах, моделирующих влияние оптоволоконного коллектора на распределение освещенности, коэффициент отражения центральной области экрана, радиус которой составлял 1,35 мм, предполагался равным нулю. Результаты этих расчетов показали, что изменение освещенности составляет менее 1 %.

Для экспериментальной проверки результатов расчетов был проведен сравнительный анализ спектров отражения стандартных диффузных отражателей (эталонов „серого“), измеренных независимо на двух спектрометрах с различными геометриями интегрирующих сфер. Сопоставлялись экспериментальные данные для сферы без экрана (с диаметром полости 180 мм) с внешним излучателем и фотодетектором, а также для рассматриваемой сферы с экраном (с внутренним диаметром 70 мм). Обе сферы характеризуются близкими величинами отношений площади интегрирующей полости к площади выходного люка: соответственно 20,3 и 21,8. Измерения проводились в видимом диапазоне длин волн 380—760 нм. Коэффициент отражения образцов находился в пределах 0,5—0,85 при $\lambda=457$ нм. Сходимость результатов измерений коэффициента ρ для обеих конфигураций сферы не хуже 0,01 для всех исследованных образцов в пределах указанной области спектра. Таким образом, представленные экспериментальные данные в целом подтверждают результаты расчетов.

На основании приведенных расчетных и экспериментальных данных можно сделать вывод, что использование экрана в интегрирующей сфере не вносит неравномерности в распределение освещенности образца, т.е. не вносит дополнительной фотометрической погрешности. Излучатель может быть помещен над экраном внутри сферы, поскольку, как следует из результатов расчетов (см. рис. 3), неравномерность освещенности верхней полусферы не влияет на погрешность измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tardy H. L. Matrix method for integrating-sphere calculations // J. of Optical Society of America. 1991. Vol. 8, N 9. P. 1411—1418.
2. Clare J. F. Comparison of four analytic methods for the calculation of irradiance in integrating spheres // J. of Optical Society of America. 1998. Vol. 15, N 12. P. 3086—3096.
3. Альтиулер Е. В., Путилин Э. С. Математическая и программная обработка данных спектрофотометрических измерений // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2008. № 58. С. 11—16.
4. Белов Н. П., Грисимов В. Н., Яськов А. Д. Лабораторный спектрометр для исследования коэффициента отражения и определения параметров цветности диффузно отражающих объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 7. С. 74—78.
5. Prah S. A. Inverse adding-doubling for optical property measurements / Oregon Medical Laser Center [Электронный ресурс]: <<http://www.omlc.ogi.edu/software/iad/>. 2007>.

Сведения об авторах

Николай Павлович Белов

— Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; ст. науч. сотрудник

Владимир Николаевич Грисимов

— д-р мед. наук; Санкт-Петербургский государственный медицинский университет им. И. П. Павлова, лаборатория оптических технологий НПЦ стоматологии; E-mail: vngrisimov@gmail.com

Александра Сергеевна Шерстобитова

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: ashev87@mail.ru

Андрей Дмитриевич Яськов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
17.10.12 г.

Е. В. ГОРБУНОВА, В. В. КОРОТАЕВ, В. С. ПЕРЕТЯГИН, А. Н. ЧЕРТОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОКОМПОНЕНТНОГО ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ

Приведены результаты моделирования многокомпонентного цветного источника излучения на основе представления пространственного распределения освещенности в виде линейной комбинации функций Ламберта. Полученные уравнения могут использоваться при разработке источников на базе светодиодных структур.

Ключевые слова: многокомпонентный источник, светодиодная матрица, цветность.

Разработка новых технологий производства полупроводниковых светоизлучающих структур позволяет использовать их в различных системах отображения информации, для создания источников излучения специального назначения в автоматических системах промышленного контроля или измерения, а также для анализа цвета исследуемого объекта [1].

Сочетание таких характеристик, как высокая мощность излучения, практически любая форма его пространственного распределения, многообразие цветовых оттенков в широком диапазоне яркостей, является несомненным преимуществом светодиодных технологий [2]. Однако таким технологиям присущи некоторые особенности, проявляющиеся, когда требуется обеспечить определенный характер распределения облученности или цветовой картины (в рабочей зоне, зоне анализа или наблюдения) на заданном расстоянии от источника излучения [3].

Для описания формы пространственного распределения освещенности на заданном расстоянии от многоэлементных светодиодных структур предлагается использовать линейную комбинацию функций Ламберта или некоторых других функций, связанных с конструкцией излучателя [4]. В результате получаемое распределение характеризуется количеством и взаимным расположением элементов источника, функциями, описывающими оптические характеристики элементов, и расстоянием от многоэлементного источника до зоны анализа (экрана, рабочей зоны и т.п.).

В настоящей статье за основу для описания оптических характеристик элементов излучателя взята математическая модель ламбертовского источника излучения. Таким образом, освещенность зоны анализа, создаваемая одноэлементным источником, характеризуется следующим уравнением [5]:

$$E(r, \theta, \varphi) = [I(\theta, \varphi) \cos \theta] / z^2, \quad (1)$$

где r — расстояние от источника до облучаемого элемента зоны анализа; θ — угол падения излучения на облучаемый элемент; φ — угол, характеризующий распределение света по плоскости зоны анализа; $I(\theta, \varphi)$ — сила света в направлении облучаемого элемента зоны анализа; z — расстояние от источника до зоны анализа.

На основе соотношения (1) была построена функция, описывающая распределение освещенности по зоне анализа, для многоэлементного источника излучения, который может быть представлен прямоугольной матрицей $n \times k$ одинаковых элементов:

$$E(x, y) = \sum_n \sum_k E_0 \cos^2 \left\{ \arctg \left[\frac{\sqrt{(x-na)^2 + (y-ka)^2}}{z} \right] \right\}, \quad (2)$$

где n и k — число столбцов и строк в матрице; E_0 — максимальная освещенность зоны анализа, создаваемая одним элементом матрицы; a — расстояние между элементами матрицы.

Полученные уравнения (1) и (2) использовались для построения моделей пространственного распределения освещенности по зоне анализа. Результат моделирования при использовании точечного ламбертовского источника представлен на рис. 1, а. Для более наглядного описания полученного распределения освещенности построено его осевое сечение (рис. 1, б). Данные модели являются теоретическими и разработаны для „идеального“ случая, когда излучатель — одноэлементный источник.

При подстановке в выражение (2) значений $a = 20$ и $z = 100$ мм при $n=k=6$ можно построить модель распределения освещенности по зоне анализа, создаваемого многоэлементным источником (рис. 1, в). Графики на рис. 1, г описывают сечения данной поверхности.

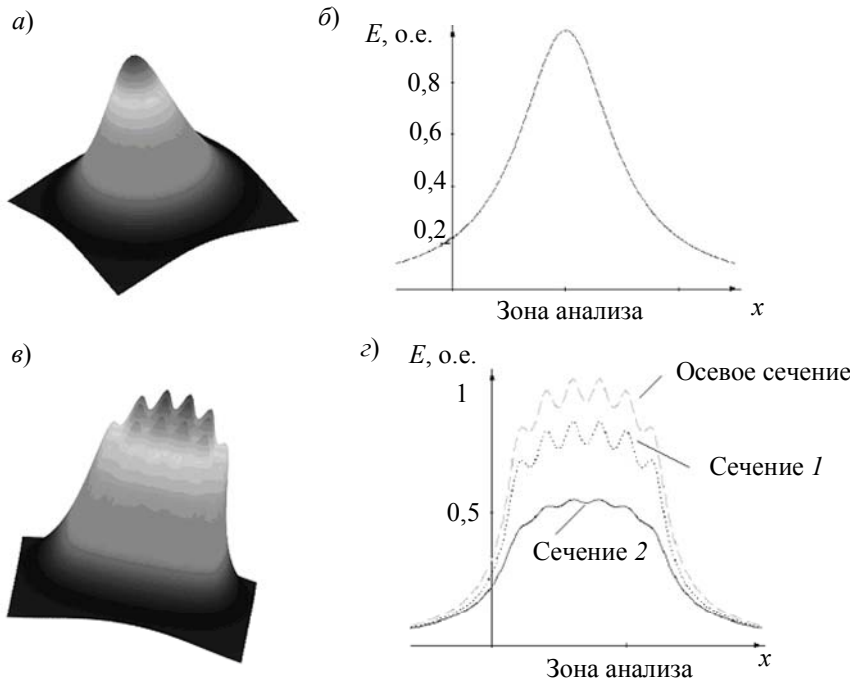


Рис. 1

По аналогии с указанными моделями можно построить функцию, аппроксимирующую распределение освещенности по зоне анализа, создаваемой реальным светодиодом или матрицей светодиодов. Однако для построения таких моделей вместо функций Ламберта необходимо применять выражения, описывающие распределения освещенности по зоне анализа, с использованием, например, косинусных зависимостей или функций Гаусса.

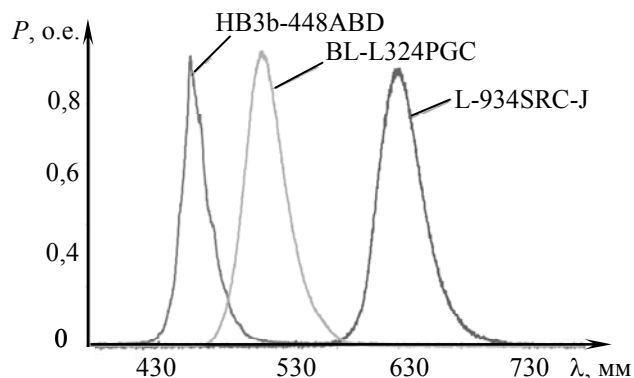


Рис. 2

Для исследований в качестве примера были взяты светодиоды трех цветов: красного — марки L-934SRC-J, зеленого — марки BL-L324PGC и синего — марки HB3b-448ABD. Для них были измерены спектральные характеристики ($P(\lambda)$), представленные на рис. 2.

Для исследований в качестве примера были взяты светодиоды трех цветов: красного — марки L-934SRC-J, зеленого — марки BL-L324PGC и синего — марки HB3b-448ABD. Для них были измерены спектральные характеристики ($P(\lambda)$), представленные на рис. 2. Трехмерные диаграммы направленности излучения светодиодов L-934SRC-J, BL-L324PGC и HB3b-448ABD показаны на рис. 3, а—в соответственно. С помощью этих моделей можно также построить модель, представленную на рис. 1, в, что позволит сравнить полученные диаграммы реальных индикатрис с диаграммами ламбертовского источника.

Для получения модели цветовой картины в зоне анализа может быть использовано соотношение (2). В него должны быть добавлены распределения трех цветовых составляющих: красной ($R(x, y)$), зеленой ($G(x, y)$) и синей ($B(x, y)$) с учетом коэффициентов переналаживания спектров излучения источников красного, зеленого и синего свечения на цветовые составляющие $R(x, y)$, $G(x, y)$ и $B(x, y)$.

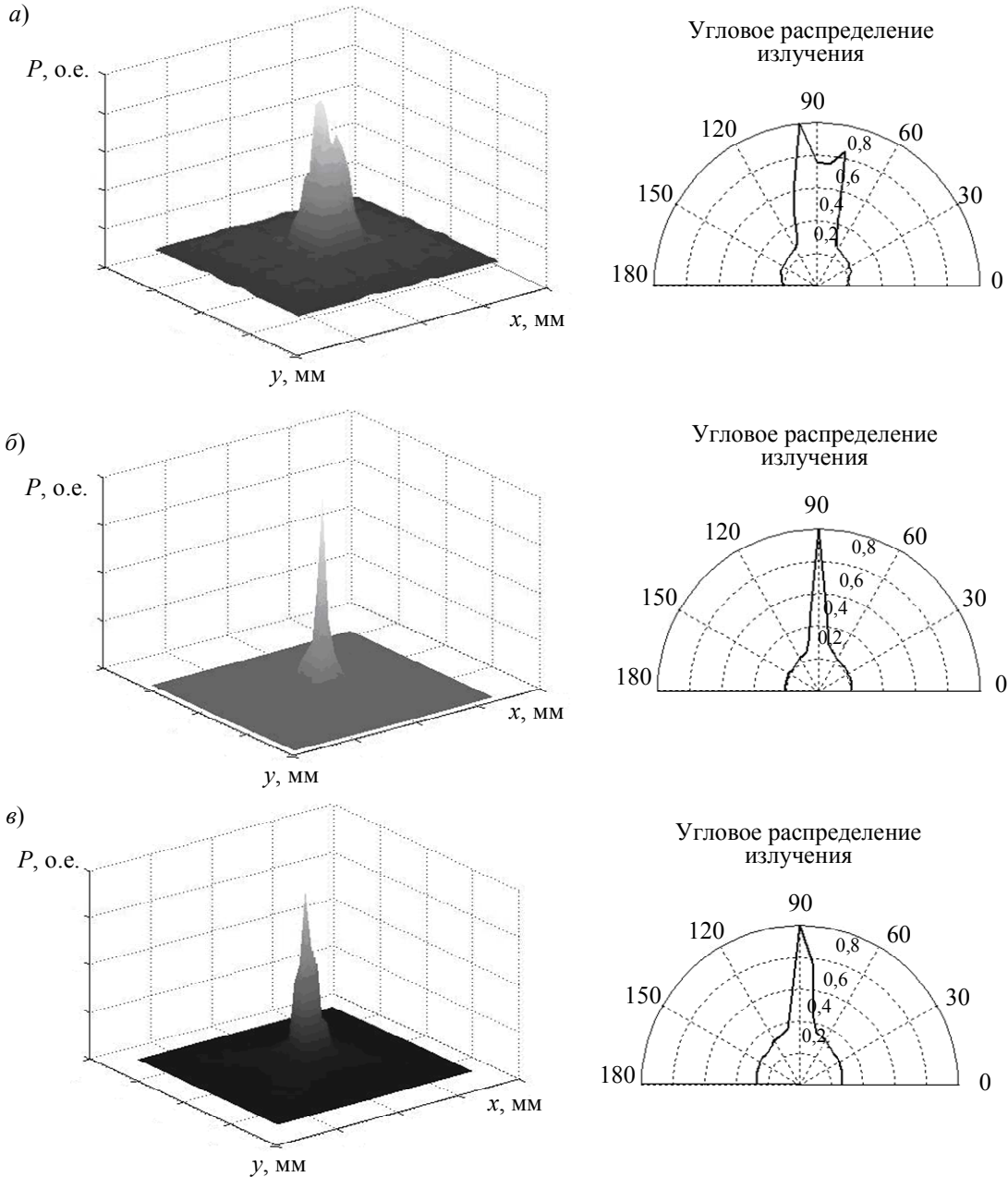


Рис. 3

Данные процедуры моделирования необходимы, во-первых, для создания равномерного свечения по всей исследуемой площади, что позволит равномерно осветить любой объект, находящейся в данной области, и, во-вторых, для управления излучением светодиодов, что обеспечит получение различных цветов и оттенков, например получение белого света.

В дальнейшем планируется построить математические модели многоэлементного источника, учитывающие параметры и характеристики отдельных излучающих элементов, а также их расположение.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках НИР № 610480 „Исследования в области создания систем спектральной ОКТ и оценка возможностей их применения“.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров С. Проблемы, теория и реальность светодиодов для современных систем отображения информации высшего качества // Компоненты и технологии. 2005. № 5. С. 205—215.
2. Кириллов Е. А. Цветоведение: Учеб. пособие. М.: Легпромбытиздат, 1990. 128 с.
3. Агостон Ж. Теория цвета и ее применение в искусстве и дизайне. М.: Мир, 1982. 184 с.
4. Moreno I., Ching-Cherng Sun. Modeling the radiation pattern of LEDs // Optics Express. 2008. N 16. P. 1808—1819.
5. Ишанин Г. Г., Козлов В. В. Источники оптического излучения. СПб: Политехника, 2009. 415 с.

Сведения об авторах

- 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 Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Владимир Сергеевич Перetyагин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: peretyagin@mail.ru
- Александр Николаевич Чертов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: a.n.chertov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
07.02.12 г.

УДК 681.786.4

К. Г. АРАКАНЦЕВ, А. А. ГОРБАЧЁВ, М. Г. СЕРИКОВА

СТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ФАКТИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Приводятся результаты испытаний макета оптико-электронной стереоскопической системы, предназначенной для использования в качестве средства контроля положения железнодорожного пути.

Ключевые слова: контроль положения железнодорожного пути, стереоскопическая система, испытания макета, погрешность измерения.

В России железнодорожный транспорт осуществляет 80 % грузовых и 40 % пассажирских перевозок, при этом скорость перемещения поездов может достигать 200 км/ч и более [1]. Такой режим работы требует своевременной индикации и устранения неточностей положения железнодорожного полотна [2]. Требования к точности контроля текущего положения

контрольного элемента (малоразмерного отражателя) был отклонен по результатам проверочного энергетического расчета. Реализация системы с отражателем потребовала бы включения в состав системы одного или нескольких мощных прожекторов подсветки, что существенно увеличило бы энергопотребление и привело к дополнительному нагреву оптических и электронных компонентов стереоскопической системы.

Изображения, демонстрирующие расположение телевизионных камер 1 и 2 макета стереоскопической системы и принцип установки контрольного элемента на двухкоординатной подвижке, приведены на рис. 2, а, б соответственно.

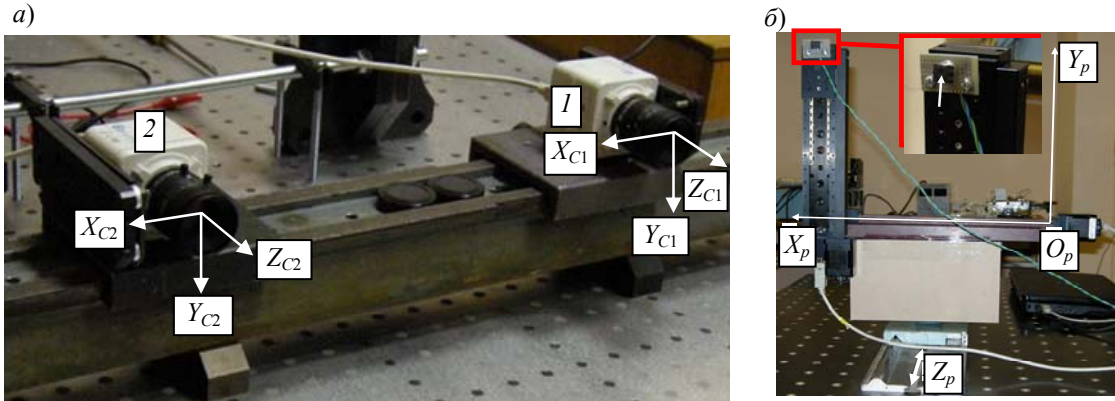


Рис. 2

В результате перемещений подвижки была получена статическая характеристика стереоскопической системы с шагом 20 мм вдоль координатных осей $O_p X_p$ и $O_p Y_p$ в трех отстоящих друг от друга на расстояние 100 мм плоскостях 1—3 (рис. 3).

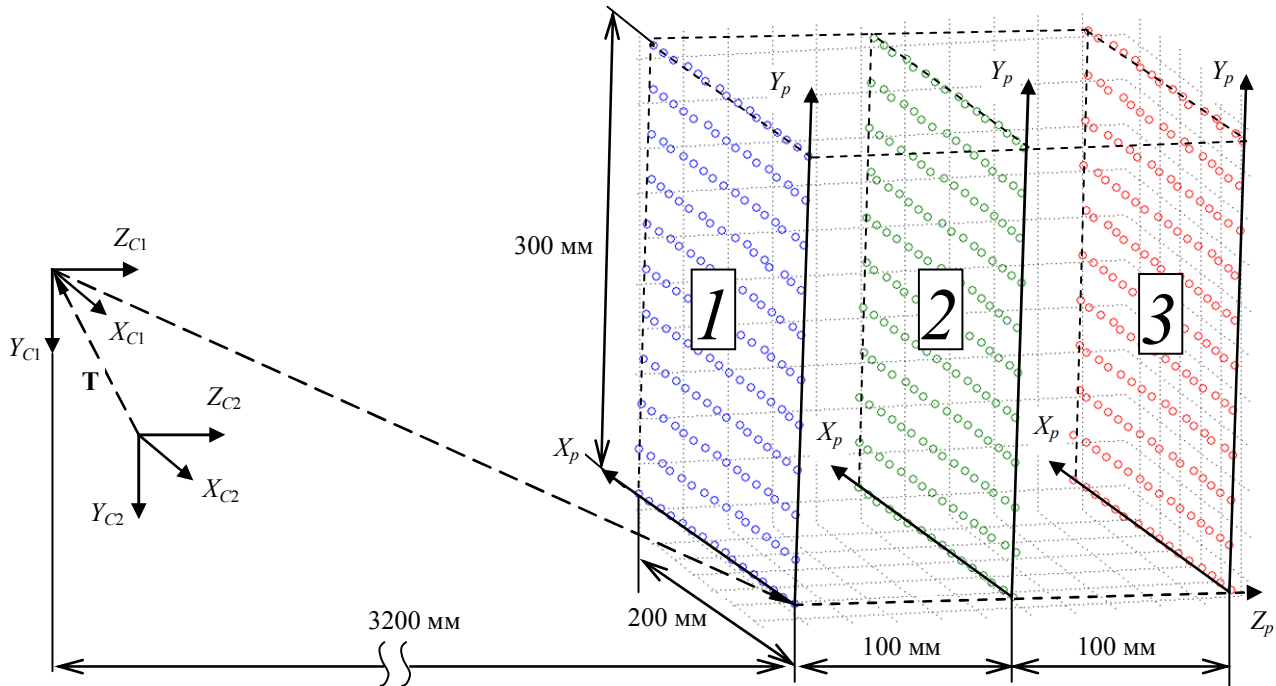


Рис. 3

Для каждого положения контрольного элемента в соответствующем кадре стереопары произведен поиск изображения контрольного элемента и найдены координаты его энергетического центра (u_1, v_1) и (u_2, v_2) [4].

Для минимизации систематических погрешностей измерений была проведена процедура калибровки стереоскопической системы. Для этого перед камерами устанавливалась калибровочная сетка последовательно в 30 различных положениях, изображения которой обрабатывались в программе MatLab Calibration Toolbox [5]. В результате выполнения этой опе-

рации были определены внутренние и внешние параметры каждой камеры и стереоскопической системы в целом.

В качестве приборной системы координат была выбрана система координат X_{C1}, Y_{C1}, Z_{C1} камеры 1 (см. рис. 2, а). Расчет искомым координат X_1, Y_1, Z_1 контрольного элемента осуществлялся с использованием выражения [6]

$$\mathbf{P} = (X_1 \quad Y_1 \quad Z_1)^T = Z_1 \mathbf{A}_1^{-1} \mathbf{r}_1,$$

где $\mathbf{r}_1 = (u_1 \quad v_1 \quad 1)^T$ — вектор координат изображения контрольного элемента, при этом координата Z_1 определяется системой уравнений:

$$\left. \begin{aligned} K_1 Z_1 + K_2 Z_2 - L_1 &= 0; \\ K_3 Z_1 + K_4 Z_2 - L_2 &= 0; \end{aligned} \right\}$$

здесь Z_2 — координата контрольного элемента в системе координат камеры 2; $K_1, K_2, K_3, K_4, L_1, L_2$ — коэффициенты, определяемые выражениями

$$\begin{aligned} K_1 &= \mathbf{r}_1^T (\mathbf{A}_1^{-1})^T (\mathbf{A}_1^{-1}) \mathbf{r}_1, \quad K_2 = K_3 = -\mathbf{r}_1^T (\mathbf{A}_1^{-1})^T \mathbf{R}^T (\mathbf{A}_2^{-1}) \mathbf{r}_2, \quad K_4 = \mathbf{r}_2^T (\mathbf{A}_2^{-1})^T (\mathbf{A}_2^{-1}) \mathbf{r}_2, \\ L_1 &= -\mathbf{r}_1^T (\mathbf{A}_1^{-1})^T \mathbf{R}^T \mathbf{T}, \quad L_2 = \mathbf{r}_2^T (\mathbf{A}_2^{-1})^T \mathbf{T}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{r}_2 = (u_2 \quad v_2 \quad 1)^T$ — вектор координат изображения контрольного элемента в системе координат второй камеры; $\mathbf{T} = (t_x \quad t_y \quad t_z)^T$ — вектор трансляции, определяющий положение центра проекции первой камеры в системе координат второй; $\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2$ — матрицы внутренних параметров первой и второй камер соответственно:

$$\mathbf{A}_1 = \begin{pmatrix} -f_1'/p_{X_1} & 0 & u_{01} \\ 0 & -f_1'/p_{Y_1} & v_{01} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{A}_2 = \begin{pmatrix} -f_2'/p_{X_2} & 0 & u_{02} \\ 0 & -f_2'/p_{Y_2} & v_{02} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

здесь f_1', f_2' — фокусное расстояние объективов первой и второй камер соответственно, мм; $p_{X_1}, p_{Y_1}, p_{X_2}, p_{Y_2}$ — горизонтальный и вертикальный размеры элементов матриц первой и второй камер соответственно, мм; $u_{01}, v_{01}, u_{02}, v_{02}$ — координаты точек пересечения плоскостей анализа камер и оптических осей соответствующих объективов, пкс; $\mathbf{R} = \mathbf{R}_X \mathbf{R}_Y \mathbf{R}_Z$ — матрица поворота локальной системы координат первой камеры относительно осей локальной системы координат второй камеры:

$$\mathbf{R}_X = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_Y = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{R}_Z = \begin{pmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где α, β, γ — углы поворота вокруг осей X_1, Y_1 и Z_1 соответственно.

Расчет по указанному алгоритму обеспечивает минимальную среднеквадратическую погрешность измерений [6].

Поскольку номинальные положения контрольного элемента относительно системы координат первой камеры неизвестны, измеренные координаты X_1, Y_1, Z_1 в каждом из положений двухкоординатной подвижки (1 — 2 — 3, см. рис. 3) были аппроксимированы плоскостями по методу наименьших квадратов, при этом положения узлов получившейся сетки

были приняты за номинальные положения контрольного элемента. В таблице приведены значения среднеквадратических погрешностей измерения координат контрольного элемента для трех значений Z_1 .

Z_1 , мм	σX_1 , мм	σY_1 , мм	σZ_1 , мм
3200	0,09	0,21	0,71
3300	0,09	0,27	0,72
3400	0,16	0,29	0,86

Указанные в таблице значения погрешностей соответствуют среднеквадратической погрешности измерения координат изображений контрольного элемента, равной $\sigma=0,17$ пкс. Это значение было использовано для экстраполяции результатов исследования погрешности измерения на случай, когда дальность установки подвижки увеличена до 10 м (рис. 4).

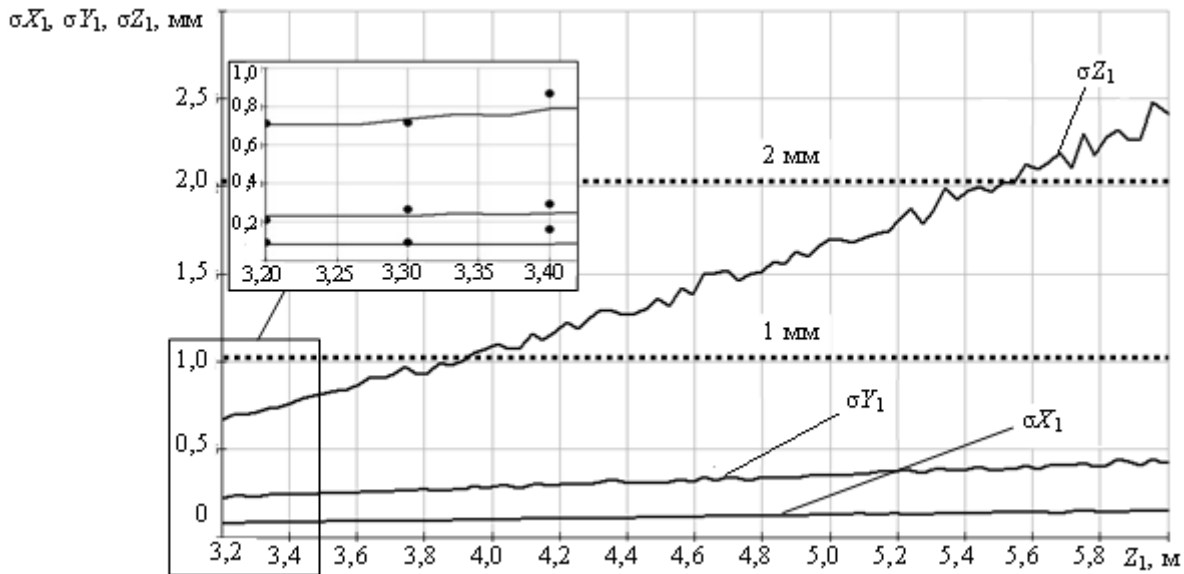


Рис. 4

Анализ рис. 4 показывает, что экспериментальные данные согласуются с результатами стохастического моделирования; кроме того, точность стереоскопической системы соответствует требуемой ($\pm 1 \dots 2$ мм) погрешности определения положения пути при перемещении контрольного элемента на расстояние до 5000 мм. Практика показывает, что дальность установки реперов от оси железнодорожного пути крайне редко превышает указанное расстояние.

Проведенные исследования показали, что стереоскопическая система контроля фактического положения железнодорожного пути не уступает по точности имеющимся на рынке аналогам, обеспечивая полную автоматизацию измерений.

В дальнейшем планируется исследовать точность системы при работе в динамическом режиме со скоростью до 10 км/ч. Такой режим работы вызовет появление дополнительных погрешностей, обусловленных вибрациями, искажением изображений контрольного элемента и другими факторами. Однако требуемую точность измерений можно обеспечить посредством введения в схему дополнительных оптических элементов, использования улучшенной процедуры калибровки и модификации алгоритмов обработки информации.

Следует отметить, что быстродействие стереоскопической системы позволяет производить измерения со скоростью, превышающей заявляемые 10 км/ч. Однако для аппаратуры, установленной на выправочной машине и предназначенной для определения межрельсового расстояния, стрел изгиба, возвышения наружного рельса и других параметров пути, указанный скоростной режим является максимальным.

Внедрение стереоскопической оптико-электронной системы в состав автоматизированных комплексов по обслуживанию железных дорог позволит увеличить их пропускную способность и сократить время выполнения ремонтных работ.

Статья подготовлена по результатам исследований, проведенных при поддержке Минобрнауки РФ в рамках реализации федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг., соглашение № 14.В37.21.1529 от 20.09.2012 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Дмитрий Верхотуров*. Железные дороги России: настоящее и возможное будущее [Электронный ресурс]: <<http://www.apn.ru/publications/article17542.htm>>.
2. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации [Электронный ресурс]: <<http://www.dzd-ussr.ru/doc/norm/pte.htm>>.
3. Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / Гл. ред. *Н. С. Конарев*. М.: Изд-во „Большая Российская энциклопедия“, 1994. С. 76.
4. *Соломатин В. А.* Системы контроля и измерения с многоэлементными приемниками. М.: Машиностроение, 1992. 128 с.
5. Camera Calibration Toolbox for MatLab [Электронный ресурс]: <http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/>.
6. Цифровая обработка изображений в информационных системах: Учеб. пособие / *И. С. Грузман, В. С. Киричук, В. П. Косых, Г. И. Перетягин, А. А. Спектор*. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. 352 с.

Сведения об авторах

- Константин Геннадьевич Араканцев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: kostya3312@yandex.ru
- Алексей Александрович Горбачёв** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: gorbachyov@grv.ifmo.ru
- Мария Геннадьевна Серикова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: serikovamg@gmail.com

Рекомендована кафедрой
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию
06.06.11 г.

В. А. ГОЛОВКОВ, В. Н. ЕМЕЛЬЯНОВ, С. В. СОЛК

ОБНАРУЖЕНИЕ НАГРЕТЫХ ДВИЖУЩИХСЯ МАЛОРАЗМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ В ИК-ДИАПАЗОНЕ

Рассмотрена задача обнаружения артиллерийского снаряда в инфракрасном диапазоне с использованием крупногабаритных оптических систем и неохлаждаемых тепловизионных матриц болометрического типа.

Ключевые слова: артиллерийская разведка, фотоприемное устройство, оптико-механическая система.

Научные исследования в области астрофизики, баллистические эксперименты, а также проведение антитеррористических операций связаны с обнаружением нагретых движущихся объектов. В настоящей статье рассматривается одна из задач артиллерийской разведки — обнаружение летящих снарядов и их сопровождение на участке полета в целях проведения траекторных измерений для дальнейшего определения точки вылета.

При разработке математической модели, позволяющей прогнозировать динамику температурного поля снаряда в процессе его движения по траектории, можно выделить два основных этапа формирования температурного поля, отличающиеся по физическому содержанию процессов теплообмена. Первый этап — это нагрев снаряда во время его движения по каналу ствола. Анализ показывает, что основным фактором здесь является поверхностное и объемное тепловыделение в ведущем пояске, температура которого 800—1000 К в момент выхода снаряда из ствола. Второй этап характеризует теплообмен снаряда с воздушной средой в процессе его движения по траектории.

Процессы аэродинамического нагрева и охлаждения перегретых во время выстрела областей снаряда, а также теплопроводность материала оболочки снаряда формируют нестационарное температурное поле снаряда. Для его

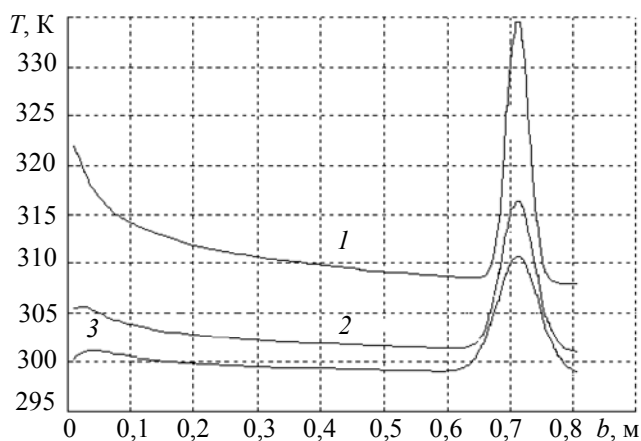


Рис. 1

оценки была построена математическая модель, включающая в себя описание комплекса процессов различной физической природы, которые определяют динамику нестационарного температурного поля снаряда. На рис. 1 приведен график распределения температурного поля $T(b)$, рассчитанного вдоль поверхности снаряда (длиной b) калибра 152 мм, имеющего начальную скорость $V = 800$ м/с и угол возвышения ствола около 50° ; здесь кривая 1 соответствует 10 с полета начиная от момента выстрела, кривая 2 — 30 с, кривая 3 — 50 с; ведущий поясок расположен на расстоянии около 0,7 м от головной части снаряда.

Таким образом, на поверхности снаряда имеются две зоны повышенной температуры: зона носовой части снаряда, нагреваемая трением об атмосферу, и зона ведущего пояска, имеющая значительный начальный перегрев и остывающая в полете. Как видно из расчета, температура ведущего пояска в течение 10 с снижается от 800—1000 К до 340 К.

Для экспериментальной оценки температурного поля снаряда в полете было разработано оптико-электронное устройство. Его основой является фотоприемный модуль БП-2М на базе полупроводникового болометра; спектральный диапазон работы БП-2М — 2...15 мкм.

Модуль имеет обнаружительную способность $D^* = 2 \cdot 10^9 \text{ см} \cdot \text{Гц}^{1/2} \cdot \text{Вт}^{-1}$, интегральную вольтовую чувствительность $S = 10^4 \text{ В/Вт}$. Фокусное расстояние встроенной иммерсионной линзы из германия, находящейся перед фоточувствительным элементом, составляет 3 мм. Полоса частот БП-2М ограничена внутренним усилителем с фильтром на уровне 100 Гц. Сигнал модуля дополнительно усиливался внешним усилителем с коэффициентом усиления $K = 30 \text{ дБ}$.

Болометрический модуль стыковался с телескопом, имеющим следующие характеристики: диаметр входного зрачка 80 мм, увеличение 10^{\times} , эквивалентное фокусное расстояние 30 мм, коэффициент пропускания около 60 %, плоский угол зрения приемного устройства 4 мрад по уровню 0,5; оптико-электронное устройство было калибровано на измерительном стенде, что позволило оценивать температуру нагретых тел дистанционно.

Эксперименты проводились на артиллерийском полигоне при безоблачном небе, в отсутствие тумана, в дневное время в течение 6 ч. Солнечная засветка приемного устройства была исключена. В ходе экспериментов температурное поле снаряда калибра 152 мм со скоростью вылета из ствола $V \approx 600 \text{ м/с}$ оценивалось на дистанциях 32, 40 и 55 м от артиллерийского орудия, при этом наблюдение за снарядом осуществлялось сбоку на дистанциях 39, 45 и 55 м. Время пролета снаряда в поле зрения оптической системы составляло 3, 3,2 и 4 мс в соответствии с положением системы и дистанцией до снаряда; время нахождения ведущего пояска снаряда в поле зрения системы составляло 0,51, 0,65 и 0,91 мс. Изменение угла места β приемного устройства (совпадающего с оптической осью объектива) осуществлялось таким образом, чтобы получить максимальное значение сигнала; в результате пролет снаряда наблюдался в центральной зоне диаграммы направленности. Сигнал, поступающий с выхода приемного устройства через интерфейсную плату, записывался в программе персонального компьютера как текстовый файл. После обработки результатов измерений стало очевидно, что сам корпус снаряда не вносил существенного вклада в результирующий сигнал, основной сигнал формировался малоразмерным элементом на корпусе снаряда.

Таким образом, как показали результаты эксперимента, наиболее нагретым элементом снаряда является ведущий поясок, ширина которого составляет 3 см. Радиационная температура ведущего пояска оценивается как $T = 425 \text{ К}$. Ведущий поясок выполняется из меди, коэффициент излучения которой $\varepsilon \approx 0,08 \dots 0,1$. Тогда физическую температуру ведущего пояска можно рассчитать следующим образом:

$$T_{\text{ф}} = T / \sqrt[4]{\varepsilon},$$

она составит $T_{\text{ф}} \approx 760 \dots 800 \text{ К}$. Отсюда превышение температуры ведущего пояска снаряда относительно температуры воздуха ($T_{\text{в}} \approx 290 \text{ К}$) на дистанции наблюдения 30 м может достигать 740—780 К. Это не противоречит расчетным данным, и можно считать, что температура корпуса снаряда во время полета, в том числе и его головной части, в среднем выше температуры поверхности Земли и приземного воздуха не более чем на 10 К.

Будем считать, что скорость снаряда не превышает $1 \dots 3M$, где M — число Маха. Максимальная оценка температуры воздуха вблизи тела, летящего со скоростью звука, как следует из уравнения Бернулли [1],

$$T_{\text{вmax}} = T_{\text{в}} \left(1 + r \frac{\gamma - 1}{2} M^2 \right),$$

где r — коэффициент восстановления, в приземных слоях атмосферы $r \approx 0,87$; γ — отношение теплоемкости воздуха при постоянном давлении к теплоемкости воздуха при постоянном объеме ($\gamma \approx 1,4$).

Для приведенных выше скоростей снаряда получим температуру воздуха вблизи снаряда $T_{в\max} \approx 300 \dots 800$ К.

Длина волны, соответствующая максимуму энергии излучения, составляет, по закону Вина, $\lambda_{\max} = 4 \dots 10$ мкм для скоростей $1 \dots 3$ М; при этом окна прозрачности атмосферы наблюдаются в диапазоне 4,5—5 мкм и 8—14 мкм. Однако коэффициент поглощения тела и, согласно закону Кирхгофа, коэффициент его излучения пропорциональны друг другу. Газы же имеют низкую плотность и соответственно низкий коэффициент поглощения. Таким образом, интенсивность излучения нагретого газа, по-видимому, будет мала. Снаряд покрыт органической краской серо-голубого цвета. Органические краски и лаки в ИК-диапазоне, согласно работе [2], имеют спектральный коэффициент поглощения $\alpha(\lambda, T)$ и соответственно коэффициент теплового излучения $\varepsilon(\lambda, T)$, близкие к единице. Краска является диффузным излучателем и, в первом приближении, можно считать, что снаряд в ИК-диапазоне является аналогом абсолютно черного тела (АЧТ) с температурой в среднем примерно на 5—10 К выше температуры воздуха, при этом время полета составляет 10—30 с.

Так как объекты наблюдаются на фоне неба, целесообразно рассмотреть фоновое излучение неба. На рис. 2 приведены графики спектральной плотности яркости чистого неба и АЧТ [3], полученные в ночное время: кривые 1 и 4 — спектральная плотность яркости АЧТ при температуре 281 и 300 К соответственно; кривая 2 — спектральная плотность яркости неба при угле места $\beta=0$ и $T_{в} = 281$ К; кривая 3 — то же, при $\beta = 3,6^\circ$ и $T_{в} = 281$ К; кривая 5 — то же, при $\beta = 0$ и $T_{в} = 300$ К; кривая 6 — то же, при $\beta = 3,6^\circ$ и $T_{в} = 300$ К.

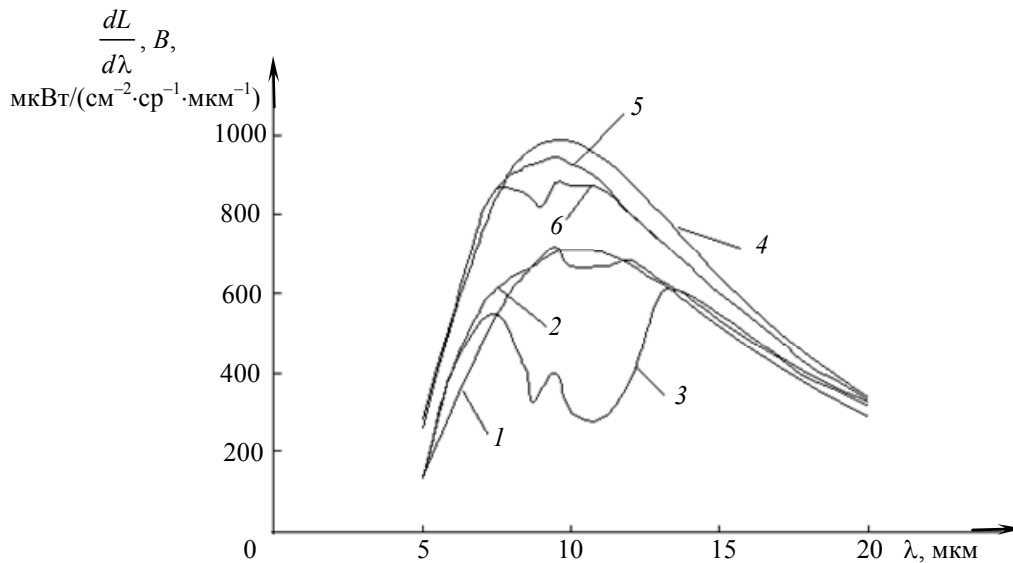


Рис. 2

Спектральная плотность яркости излучения АЧТ рассчитывалась по формуле Вина [4]:

$$B(\lambda, T) = \frac{dL(\lambda, T)}{d\lambda} = \frac{c_1}{\pi} \lambda^{-5} \exp\left(-\frac{c_2}{\lambda T}\right), \quad (1)$$

где $c_1 = 3,74 \cdot 10^{-12}$ Вт·см², $c_2 = 1,4388$ см·К.

Анализ рис. 2 показывает, что даже при небольших значениях угла места спектральная яркость неба $dL/d\lambda$ при $\lambda \approx 10$ мкм существенно отличается от спектральной яркости АЧТ (B). Приведенные в работе [3] измерения спектральной плотности яркости чистого и облачного неба (перистые облака) показывают, что величина $dL/d\lambda$ при наличии облачности в большей мере приближается к величине B , однако уже при $\beta=7,2^\circ$ величина $dL/d\lambda$ для облачного неба примерно на 15—20 % ниже значения B .

В работе [5] измерены спектральные плотности полусферической яркости небосвода: кривые имеют такой же характер, как и на рис. 2, т.е. „провал“ кривых спектральной яркости при $\lambda = 7,5 \dots 14$ мкм, при этом утверждается, что спектральная яркость излучения дневных и ночных атмосфер для этого диапазона длин волн практически не отличаются.

Таким образом, анализ фоноцелевой обстановки позволяет считать, что пассивное обнаружение воздушных целей с небольшой эффективной отражающей площадью и при отсутствии активных источников излучения (реактивных или ракетных двигателей) целесообразно проводить в диапазоне 8—10 мкм, где даже при небольших углах места устройства наблюдается высокий контраст цели на фоне неба.

Как показывает опыт, для решения задач артиллерийской разведки может быть использована двухзеркальная оптическая система с линзовым блоком переноса изображения, минимизирующим фоновое излучение. Также блок переноса может компенсировать полевые аберрации. Так как требуемая оптико-механическая система (ОМС) ИК-прибора работает в спектральном диапазоне 8—14 мкм, то целесообразно изготавливать оба зеркала из алюминиевого сплава АМг-6 методом алмазного микроточения (АМТ). Использование алюминиевого сплава позволяет значительно упростить конструкцию главного и вторичного зеркал. Для разгрузки главного зеркала применяются упругие кинематические элементы, изготавливаемые из единой с зеркалом заготовки. Формообразование на станке АМТ позволяет добиться угловых и линейных децентрировок в пределах нескольких секунд и микрометров. Коэффициент отражения в рабочем спектральном диапазоне не менее 96 %. Блок переноса — трех- или четырехлинзовый. Линзы изготавливаются из керамики ПО-4 и германия. Линзовые блоки выполняются герметичными, и их внутренние полости заполняются осушенным газообразным азотом или другим подобным газом. Компенсация термоаббераций осуществляется перемещением линзового блока или вторичного зеркала. Поле зрения такого прибора зависит от размеров фоточувствительного слоя фотоприемного устройства (ФПУ) и может составлять 1—2° при относительном отверстии 1:3. Минимально возможное пятно рассеяния при этом будет составлять 75 мкм (84 % энергии).

Проведем оценку дальности обнаружения артиллерийского снаряда современными техническими средствами ИК-диапазона. Согласно работе [6] для неохлаждаемых фотоприемных устройств спектрального диапазона 8—14 мкм эквивалентная шуму разность температур составляет величину порядка 0,1°, размер элемента (пиксела) фотоприемной матрицы можно принять равным приблизительно 50×50 мкм. Для точечного источника излучения минимально обнаруживаемое значение силы света [7]

$$\Delta I = \frac{4}{\pi} p \frac{\delta l^2}{v \mu D^* \dot{D} \ddot{O}} \sqrt{\Delta f}, \quad (2)$$

где p — коэффициент превышения сигналом порогового значения, δ — угловая разрешающая способность фотоприемного элемента, l — дистанция до снаряда, v — коэффициент пропускания оптической системы, μ — коэффициент пропускания атмосферы, D^* — удельная обнаружительная способность, D — диаметр входного зрачка объектива, \ddot{O} — относительное отверстие объектива, Δf — полоса пропускания электрического фильтра после приемника.

С учетом того, что матричные ФПУ „опрашиваются“ с частотой кадров 50—60 Гц, полюсу частот можно принять равной $\Delta f \approx 100$ Гц исходя из времени накопления сигнала одним пикселом. Величина $\delta = \sqrt{s_{\text{п}}}/F$, где $s_{\text{п}}$ — площадь пиксела, F — фокусное расстояние объектива. С учетом использования в ФПУ микроболометров удельную обнаружительную способность можно принять равной $D^* \approx 10^{10}$ см·Гц^{1/2}·Вт⁻¹. Величина $\mu = \exp(-kl)$, где k — спектральный коэффициент затухания, который при $\lambda = 8 \dots 14$ мкм, дальности видимости

20 км и влажности воздуха 50 % составит $k \approx 0,1 \text{ км}^{-1}$. Для зеркально-линзовых ОМС коэффициент $\nu \approx 0,6$. Величина $\Delta I = \Delta L_{\min} s_{\text{сн}}$, где ΔL_{\min} — минимально обнаруживаемая яркость объекта, $s_{\text{сн}}$ — видимая площадь снаряда.

Учитывая, что фотоприемная матрица совместно с полосовым оптическим фильтром в дальнем ИК-диапазоне (8—12 мкм) может быть чувствительна в полосе пропускания $\Delta\lambda \approx 3 \dots 4$ мкм, получим $\Delta L = B(\lambda, T)\Delta\lambda$. Тогда, например, для случая, когда $T_{\text{в}} = 281 \text{ К}$ в приземной атмосфере, а температура головной части снаряда на 5—10 К выше, учитывая выражение (1) и графики спектральной плотности яркости (см. рис. 2), можно определить разность яркостей снаряда и фона $\Delta L \approx 1000 \text{ мкВт}/(\text{см}^{-2}\cdot\text{ср}^{-1})$ при угле места объектива не меньше $3,6^\circ$. Допустим, что снаряд калибра 152 мм движется в направлении на объектив ФПУ и находится в поле зрения пиксела фотоприемной матрицы в течение не менее чем 20 мс. Тогда, задаваясь параметрами реально разработанных зеркально-линзовых объективов (например, при $D = 50 \text{ см}$, $\ddot{O} = 3$) и считая коэффициент $p = 5$, можно решить уравнение (2) относительно максимальной дальности обнаружения, которая составит $l_{\text{max}} \approx 5 \dots 6 \text{ км}$. Учитывая размер фотоприемной матрицы и параметры объектива, поле зрения такой системы можно оценить величиной порядка 20 мрад. Разумеется, при изменении погодных условий и угла места ОМС эта величина может изменяться в большом диапазоне, что характерно для оптико-электронных систем.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

— обнаружение артиллерийских снарядов в пассивном режиме целесообразно проводить в спектральном диапазоне 8—14 мкм, где даже при небольших углах места оптической системы возможно получение высокого контраста цели на фоне неба;

— возможно создание пассивных систем артиллерийской разведки при помощи тепловизоров даже с неохлаждаемыми ФПУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдучевский В. С., Галицкий Б. М., Глебов Г. А. и др. Основы теплопередачи в авиационной и ракетно-космической технике. М.: Наука, 1975. 649 с.
2. Хадсон Р. Инфракрасные системы. М.: Мир, 1972. 534 с.
3. Bell E., Eisner R., Young J., Oetjen R. Spectral radiance of sky and terrain at wavelengths between 1 and 20 microns // J. of Optical Society of America. 1960. Vol. 50, N 12. P. 1313—1320.
4. Гуревич М. М. Фотометрия. Теория: методы и приборы. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 272 с.
5. Афонин А. В., Казанский В. В., Язык В. С. Моделирование спектральной освещенности элементов земной поверхности от небосвода в ИК-области спектра // Оптич. журн. 2000. Т. 67, № 10. С. 22—24.
6. Тарасов В. В., Якушенко Ю. Г. Инфракрасные системы „смотрящего“ типа. М.: Логос, 2004. 444 с.
7. Мирошников М. М. Теоретические основы оптико-электронных приборов. Л.: Машиностроение, 1983. 696 с.

Сведения об авторах

- Владимир Алексеевич Головков** — канд. техн. наук; НИИ оптико-электронного приборостроения, Со-
сновый Бор, Ленинградская обл.; E-mail: golovkov_ggg@mail.ru
- Владислав Николаевич Емельянов** — д-р техн. наук, профессор; Балтийский государственный технический
университет „Военмех“ им. Д. Ф. Устинова, кафедра плазмогазодина-
мики и теплотехники, Санкт-Петербург; E-mail: ve5303@mail.ru
- Сергей Вольдемарович Солк** — канд. техн. наук; НИИ оптико-электронного приборостроения, Со-
сновый Бор, Ленинградская обл.; E-mail: solk@sbor.net

Рекомендована кафедрой
плазмогазодинамики и теплотехники
БГТУ „Военмех“

Поступила в редакцию
12.02.13 г.

А. В. ДУХАНОВ, Е. В. БОЛГОВА, Л. Р. ГЕРВИЧ, В. Г. КОЛПАКОВ,
Е. Н. КРАВЧЕНКО, И. И. КУРОЧКИН, Е. Д. МАСЛЕННИКОВ,
И. В. ОФЁРКИН, А. О. РУБЦОВ, С. А. СМИРНОВ, О. Б. ШТЕЙНБЕРГ, М. В. ЮРУШКИН

ПРЕДМЕТНО-ОРИЕНТИРОВАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ПРОСТРАНСТВ В СРЕДЕ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ CLAVIRE

Рассматривается технология автоматизации создания виртуальных рабочих пространств для поддержки распределенных научных исследований в рамках парадигмы eScience. Представлено описание инструментального средства автоматизации, разработанного на основе среды облачных вычислений CLAVIRE, и продемонстрирована возможность его применения для создания облачных сервисов для различных предметных приложений.

Ключевые слова: композитное приложение, облачные вычисления, предметно-ориентированный язык, интеллектуальный редактор, облачный сервис.

Введение. Современные технологии облачных вычислений в рамках моделей SaaS (Software as a Service — программное обеспечение как сервис) и AaaS (Application as a Service — приложение как сервис) ориентированы на четкое разделение функций пользователей и провайдеров [1]. Как правило, все программное обеспечение (ПО) в „облаке“ устанавливается и настраивается провайдером, а работа с ним пользователя осуществляется в рамках сценариев, допускаемых облачной средой (например, ограничений на форму представления данных, интерактивность и пр.). Такая модель оправдана для большинства бизнес-приложений, обладающих высокой степенью унификации требований, однако ее перенос на задачи eScience (связанных с поддержкой научных исследований) непродуктивен [2]. Это обусловлено как разнообразием предметных областей и программного обеспечения, так и исследовательским (разовым) его применением в ходе научного поиска, что делает поддержку всего набора потенциально востребованного ПО экономически неэффективной для провайдера. Таким образом, это приводит к необходимости поиска новых коллаборативных форм модели SaaS, адаптированных для научных исследований; при этом пользователь имеет возможность не только работать с прикладными пакетами, но и *самостоятельно* встраивать их в облачную среду, обеспечивая их доступность для других пользователей.

В настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований по созданию автоматизированной технологии встраивания прикладного ПО в публичные среды облачных вычислений в рамках проекта по организации межвузовской мобильности молодых ученых ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. [3]. Работы выполнены на базе Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики (СПбНИУ ИТМО)

силами 10 привлеченных молодых ученых и специалистов из четырех сторонних организаций с использованием коллаборативной технологии создания публичных облачных сервисов [4].

Принципы построения виртуальных рабочих пространств. Виртуальное рабочее пространство (ВРП) в облачной среде обеспечивает реализацию средства доступа к инструментам распределенных вычислений для выполнения научных исследований, что позволяет консолидировать вычислительные и программные ресурсы в различных предметных областях. В общем случае к ВРП предъявляются следующие требования [5].

1. Поддержка процессов конструирования и исполнения композитных приложений (КП), состоящих из отдельных вычислительных сервисов распределенной среды, объединенных в целях решения общей задачи.

2. Ориентация на технологии удаленного взаимодействия с пользователем через веб-браузер, без использования специализированных клиентских приложений, в рамках модели SaaS или AaaS облачных вычислений.

3. Обеспечение интеллектуальной поддержки пользователей при работе с КП.

4. Обеспечение информационной безопасности ВРП в рамках модели системы с открытым контуром (для которой характеристики и местонахождение потенциальных пользователей не определены). При этом важно обеспечить защиту от легитимного пользователя, который имеет право доступа к ресурсам ВРП, но использует их не по назначению (например, для коммерческих расчетов или хранения данных из сомнительного источника).

5. Возможность эффективного совокупного использования ресурсов существующих суперкомпьютеров, сред облачных вычислений и грид-сред, поскольку для функционирования современных пакетов для научных расчетов в ряде случаев требуется специализированная вычислительная среда.

6. Поддержка „горячего“ подключения новых прикладных пакетов и вычислительных ресурсов при минимальных усилиях со стороны их разработчиков или владельцев. Данная мера обеспечивает открытость, переносимость и масштабируемость ВРП. Также сама технология является гибкой для создания ВРП силами специалистов-предметников (а не разработчиков-программистов).

Участие пользователей в создании ВРП, т.е. формировании содержания „облака“, может быть реализовано разными способами. Наиболее распространенной является агрегаторская схема, когда пользователь сам передает исходные коды и (или) исполняемые модули провайдеру, который устанавливает приложение на своих ресурсах и обеспечивает доступ к нему через веб-интерфейс. Однако такая схема подходит только для приложений массового пользования, поскольку требует выделения ресурсов провайдера и не может быть выполнена on-line, что противоречит самой парадигме облачных вычислений (выделение ресурсов по требованию, без участия провайдера). Паллиативным решением этой проблемы является использование модели облачных вычислений PaaS (Platform as a Service — платформа как сервис), в рамках которой пользователь сам должен устанавливать и поддерживать свое программное обеспечение на платформе провайдера. Однако в этом случае требуется наличие квалификации, которой многие специалисты-предметники не обладают. Кроме того, такой подход не позволяет обеспечить совместную работу пользователей „облака“; установленное ПО доступно только на виртуальной машине самого пользователя.

В настоящее время существуют три подхода в встраиванию прикладного ПО в ВРП с применением облачных вычислений в рамках модели SaaS:

— низкоуровневая разработка уникальных для каждого конкретного пакета проблемно-ориентированных интерфейсов для встраивания ПО в распределенную или облачную инфраструктуру [6];

— использование описаний пакетов и приложений на предметно-ориентированных языках, относящихся к научному направлению, которому соответствует ВРП (например, язык описания задач оптимизации — AMPL [7]);

— использование предметно-ориентированных языков, например EasyPackage [8], для описания способов применения прикладных пакетов в облачной среде.

Последний из указанных подходов представляется наиболее прогрессивным: в частности, он реализуется в многопрофильной инструментально-технологической платформе CLAVIRE (CLOUD Applications VIRTUAL Environment — виртуальная среда облачных вычислений) [5], обеспечивающей создание сред облачных вычислений в рамках моделей SaaS и AaaS; кроме того, этот подход хорошо зарекомендовал себя при исследованиях [4].

Во всех перечисленных случаях процедура встраивания пакетов в „облако“ требует навыков написания программ (или описаний) на соответствующем языке. Как следствие, для привлечения широкого круга потенциальных разработчиков ВРП провайдер облачной среды должен обеспечить средства автоматизации процесса встраивания (включая средства формирования предметно-ориентированных интерфейсов), не требующие специальных навыков в области программирования и знаний о функционировании вычислительных ресурсов.

Рассмотрим вопросы разработки и применения такого инструмента для среды облачных вычислений CLAVIRE.

Технология автоматизации построения виртуальных рабочих пространств. В общем случае процесс встраивания вычислительного пакета в платформу CLAVIRE состоит из следующих этапов:

- 1) установка прикладного пакета на зарегистрированный ресурс (ресурсы), который соответствует программно-аппаратным требованиям к устанавливаемому пакету;
- 2) определение ресурсов, на которых планируется запуск пакета;
- 3) регистрация в базе пакетов и описание на специальном унифицированном языке EasyPackage.

Если первые два этапа осуществляются администратором платформы CLAVIRE и, в общем случае, выполняются только один раз, то описание пакета может создать сам пользователь. Причем процедура описания пакета может быть выполнена неоднократно: каждый раз, добавляя, удаляя или изменяя состав используемых параметров, пользователь, тем самым, расширяет или сужает функциональность своего пакета.

Для практической реализации данной технологии разработан интеллектуальный редактор CLAVIRE/PackageManager, который предназначен для автоматизации процесса описания пакета и упрощения процедуры его встраивания. Собственно „интеллектуальность“ выражается в том, что пользователь освобожден от необходимости разрабатывать описание приложения на языке EasyPackage; он работает в диалоге с системой, отвечая на вопросы в терминах предметной области, в ходе чего автоматически формируется описание. Для обратной операции — процесса редактирования пакета — требуется лексический и синтаксический разбор файла описания пакета.

Интеллектуальный редактор PackageManager [5] реализует следующие функциональные возможности:

— просмотр доступных пользователю пакетов; доступность пакетов определяется в соответствии с назначенными пользователю правами;

— просмотр описания пакета как в виде текста на языке EasyPackage, так и в виде конструктора; описание пакета в виде конструктора представляет собой совокупность полей, каждое из которых описывает соответствующий атрибут;

— редактирование пакета; данная функция сводится к редактированию информации об атрибутах, описывающих входные и выходные данные о пакете;

— создание нового пакета; при создании пакета пользователю предоставляется полный спектр полей и атрибутов для заполнения, а также автоматически назначаются права доступа к создаваемому пакету;

— удаление пакета; данная функция доступна только администратору базы пакетов;

— запуск проблемно-ориентированного интерфейса в контексте текущего пользователя; данная функция предназначена для тестирования запуска пакета в среде CLAVIRE; компонент данного интерфейса в зависимости от описания пакета в базе пакетов динамически строит web-интерфейс, который представляет собой набор полей для заполнения, необходимых для успешного выполнения программного пакета.

Интеллектуальный редактор CLAVIRE/PackageManager реализован на языках JavaScript и HTML. Он может быть использован как web-приложение через стандартный Интернет-браузер.

Разработка предметно-ориентированных сервисов для организации виртуальных рабочих пространств. На основе интеллектуального редактора CLAVIRE/PackageManager привлеченными специалистами в рамках проекта разработаны предметно-ориентированные сервисы CLAVIRE для различных предметных областей. В частности, ими выполнены следующие работы.

Создание элементов ВРП для решения задач математической физики с помощью прикладного пакета решения задачи Дирихле для оператора Лапласа. Пакет `dirichlet_solver` позволяет осуществлять численный расчет решения задачи Дирихле для оператора Лапласа с помощью метода Якоби. Особенностью пакета является нестандартное размещение данных в системах с распределенной памятью (размещение данных с перекрытием). Такое распределение позволяет существенно увеличить производительность расчетов за счет сокращения количества пересылок данных. На вход пакета принимаются текстовые файлы с описанием граничных условий задачи, значений размерности сетки по всем трем осям, количества итераций метода Якоби и размера перекрытия. На выходе пакета формируется группа файлов, каждый из которых содержит результирующую сетку для заданного процессора.

Создание элементов ВРП для решения задач математической физики с помощью прикладного пакета `ipmeh-mhd-sim`. Пакет `ipmeh-mhd-sim` предназначен для исследования ударных магнитогидродинамических волн и влияния на них возмущений набегающего потока. Исследование основывается на решении уравнений магнитной газовой динамики. При разработке пакета использовались следующие численные методы решения: метод Рунге — Кутты, модифицированная система уравнений магнитной гидродинамики для исключения численного магнитного заряда. Исходными данными пакета служит текстовое описание вычислительного задания, а выходными данными являются распределения физических величин в расчетной области.

Создание элементов ВРП для решения задач в области генерации параллельного кода для вычислительной архитектуры с распределенной памятью. Пакет `OpsMpiParallelizer` является средством автоматической генерации параллельного MPI-кода на базе „Диалогового высокоуровневого оптимизирующего распараллеливателя“. Основу работы пакета составляют методы блочно-аффинного размещения массивов в распределенной памяти. На вход пакета принимаются программы на языке C, соответствующие стандарту C99. По ходу выполнения пакета осуществляются вывод диагностической информации в стандартный выходной поток и запись в выходной файл измененной входной программы.

Создание элементов ВРП для решения задач моделирования процесса функционирования телекоммуникационных сетей с помощью прикладного пакета `NetMax`. Пакет `NetMax` предназначен для решения задачи рационального использования ресурсов телекоммуникационных сетей. При разработке пакета реализован подход к заполнению телекоммуникационных сетей, основанный на использовании их новых характеристик при выборе каналов связи

и применении аппарата теории потоков. В этом контексте является обоснованным применение процедур имитационного моделирования, когда прокладываются все маршруты, и в каждый момент времени можно абсолютно точно определить состояние любого канала в сети.

Создание элементов ВПП для решения задач персонафицированной медицины с помощью прикладного пакета ANN. Пакет ANN (AUC for Native Network — AUC для нативной сети) предназначен для решения задачи построения ROC-кривой и вычисления площади под ней (Area under the Curve — AUC) для байесовской сети (БС) с нативной топологией. Решение задачи основывается на использовании наиболее тривиальной — нативной — топологии БС. При разработке пакета применялись алгоритм прямого безытерационного обучения нативной БС и стандартный алгоритм построения ROC-кривых с возможностью регулирования числа разбиений. Исходными данными пакета являются файлы с описанием нативной БС, база данных для обучения и параметры ее разбиения, информация о необходимости вывода ROC-кривых и префикса выходных файлов. Результатом работы пакета ANN является набор файлов, содержащих ROC-кривые, таблицы для их построения и значения AUC.

Создание элементов ВПП для решения задач молекулярного моделирования с помощью прикладного пакета OPTM. Пакет предназначен для решения задачи локальной энергетической оптимизации молекулярных структур в рамках силового поля MMFF94 (Merck Molecular Force Field). Данный вид оптимизации позволяет устранять энергетически напряженные области в молекуле, приводя молекулу к экспериментально более правдоподобным конформациям. В качестве метода оптимизации используется метод локальной оптимизации дифференцируемой функции многих переменных — LBFGS (Broyden—Fletcher—Goldfarb—Shanno). Входными данным к пакету являются файл параметров оптимизации и файл с начальной геометрией оптимизируемой молекулы. В ходе выполнения пакета в стандартный поток вывода предоставляются текущие сведения о состоянии процесса оптимизации и осуществляется запись в выходной файл конечной геометрии оптимизированной молекулы.

Создание элементов ВПП для решения задач молекулярной биологии с помощью прикладного пакета Autodock. Пакет Autodock предназначен для решения задачи молекулярного докинга — расчета и предсказания поведения биомолекулярных комплексов (соединения из двух органических молекул, одна из которых является „мишенью“ или макромолекулой, другая, которая значительно меньше, — лигандом). Под расчетом поведения комплекса понимается определение положения, которое занимает лиганд в поле макромолекулы, энергии их взаимодействия и других физических и химических параметров комплекса. Исходными данными пакета являются описание строения молекул в формате PDBQT, параметры построения сеточной модели энергетического поля молекулы, а также параметры алгоритма поиска. Выходными данными пакета является отчет, содержащий полную информацию о проведенной процедуре докинга и возможные варианты решения этой задачи.

Создание элементов ВПП для безошибочного решения задач вычислительной математики с помощью прикладного пакета Maxima. Система компьютерной алгебры и символьных вычислений Maxima предназначена для безошибочного решения задач вычислительной математики. Данный пакет обеспечивает символьное дифференцирование, интегрирование и разложение в ряд, позволяет решать обыкновенные дифференциальные уравнения и системы линейных уравнений, а также предоставляет широкий набор средств работы с математическими объектами. На вход пакета подаются строка с командой интерпретатора Maxima, текстовый файл с подпрограммами на языке Maxima Script и файл с данными в Lisp-формате. Выходными данными пакета являются строка с кратким результатом и файл в Lisp-формате с результатами решения указанной в команде задачи.

Создание элементов ВПП для решения задач автоматического распараллеливания кода с помощью прикладного пакета „разрезания“ цикла. Пакет loop_distribution позволяет решить задачу „разрезания“ тесного „гнезда“ цикла с использованием вспомогательных

эквивалентных преобразований („растягивание скаляров“ и „введение временных массивов“). Этот пакет может быть использован для „разрезания“ нераспараллеливаемых циклов, так как результирующие циклы могут оказаться пригодными для параллельного выполнения или для других распараллеливающих преобразований. Пакет был реализован в рамках „Открытой распараллеливающей системы“, а затем модифицирован для проекта „Диалоговый высокоуровневый преобразователь“. На вход пакета принимаются программы на языке С, соответствующие стандарту С99. На выходе пакета выводится файл с результирующей программой на языке С, в которой к числу переменных могут быть добавлены вспомогательные одномерные массивы, необходимые для преобразований „растягивание скаляров“ и „введение временных массивов“.

Создание элементов ВРП для решения задач вычислительной математики с помощью прикладного пакета „Оптимизированный алгоритм распределенного блочного перемножения матриц“. Пакет с рабочим названием “block_matrix_mult” разработан с применением метода блочного распределения матриц в общей памяти, который позволяет увеличить эффективность использования кэш-данных и буфера ассоциативной трансляции (Translation Lookaside Buffer — TLB). Также в пакет заложены методы оптимизации программного кода: векторизация вычислений, тайлинг (оптимизирующее преобразование кода к блочному виду) с учетом кэш-памяти нескольких уровней, выравнивание данных и кода, устранение ветвлений, устранение зависимостей между инструкциями, распараллеливание по данным с помощью библиотеки pthreads. Исходными данными пакета является файл, содержащий информацию о размере перемножаемых матриц и значения их элементов; выходными данными — выходной файл с результирующей матрицей.

Таким образом, разработки элементов ВРП, проведенные с использованием разработанной выше технологии, показывают ее применимость для различных предметных областей.

Заключение. Апробация представленной технологии для разработки элементов ВРП путем автоматизации встраивания прикладных пакетов пользователей в облачную среду на основе платформы CLAVIRE проведена в рамках проекта по обеспечению межвузовской мобильности молодых ученых, входящего в Федеральную целевую программу „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. Это позволило не только проверить применимость разработанной технологии для задач различных предметных областей, но и выявить ряд технических и методологических недостатков инструментального средства CLAVIRE/PackageManager в целях его дальнейшей доработки и развития.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной в рамках Федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг., соглашение № 14.В37.21.2085 от 14.11.2012 г.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Foster I., Zhao Y., Raicu I., Lu S. Cloud Computing and Grid Computing 360-Degree Compared // eprint arXiv:0901.0131, 2008 [Электронный ресурс]: <<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0901/0901.0131.pdf>>.
2. Бухановский А. В., Васильев В. Н. Современные программные комплексы компьютерного моделирования e-Science // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 3. С. 60—64.
3. Федеральная целевая программа „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. [Электронный ресурс]: <<http://www.fcpr.ru/Default.aspx>>.
4. Духанов А. В. и др. Облачные технологии в задачах интерактивной 3D-визуализации: опыт организации межвузовской мобильности молодых ученых // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2012. № 11(10). С. 25—33.
5. Болгова Е. В. и др. Автоматизация процесса разработки виртуальных лабораторных практикумов на основе облачных вычислений // Там же. 2012. № 11(10). С. 71—80.

6. UniHUB — Университетский кластер [Электронный ресурс]: <www.unihub.ru>.
7. Смирнов С. А. Применение алгебраических языков моделирования в системе распределенного решения задач глобальной оптимизации // Тр. 53-й науч. конф. МФТИ „Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук“. М.: Изд-во МФТИ им. Н. Э. Баумана, 2010. Т. 9. С. 55—56.
8. Ковальчук С. В. и др. Организация человеко-компьютерного взаимодействия в средах компьютерного моделирования на базе облачной инфраструктуры // Прикладная информатика. 2012. № 5 (41). С. 89—102.

Сведения об авторах

- Алексей Валентинович Духанов** — канд. техн. наук, доцент; НИИ наукоемких компьютерных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики;
E-mail: dukhanov@niuitmo.ru
- Екатерина Владимировна Болгова** — НИИ наукоемких компьютерных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; мл. науч. сотрудник;
E-mail: bolgova@gmail.com
- Лев Романович Гервич** — аспирант; Южный федеральный университет, кафедра алгебры и дискретной математики, Ростов-на-Дону;
E-mail: lgervith@gmail.com
- Василий Григорьевич Колпаков** — аспирант; Институт проблем передачи информации им. А. А. Харкевича РАН, отдел распределенных вычислений, Москва;
E-mail: vasilykolpakov@gmail.com
- Евгений Николаевич Кравченко** — аспирант; Южный федеральный университет, кафедра алгебры и дискретной математики, Ростов-на-Дону;
E-mail: peon_sxe@gmail.com
- Илья Ильич Курочкин** — Институт системного анализа РАН, отдел распределенных вычислений, Москва; ст. науч. сотрудник; E-mail: qurochkin@gmail.com
- Евгений Дмитриевич Масленников** — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, научно-исследовательский вычислительный центр; техник;
E-mail: ixidiciti@gmail.com
- Игорь Владимирович Офёркин** — Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, научно-исследовательский вычислительный центр; техник;
E-mail: oferkin@physics.msu.ru
- Антон Олегович Рубцов** — Институт системного анализа РАН, отдел распределенных вычислений, Москва; ст. науч. сотрудник; E-mail: rubtsov493@gmail.com
- Сергей Андреевич Смирнов** — Институт системного анализа РАН, отдел распределенных вычислений, Москва; инженер; E-mail: sasmir@gmail.com
- Олег Борисович Штейнберг** — Южный федеральный университет, кафедра алгебры и дискретной математики, Ростов-на-Дону; ассистент;
E-mail: olegsteinb@gmail.com
- Михаил Викторович Юрушкин** — аспирант; Южный федеральный университет, кафедра алгебры и дискретной математики, Ростов-на-Дону;
E-mail: m.yurushkin@gmail.com

Рекомендована НИИ
наукоемких компьютерных
технологий

Поступила в редакцию
12.02.13 г.

М. Н. ВОРОНЮК

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ФИЛЬТРАЦИИ В ПЕРКОЛЯЦИОННЫХ РЕШЕТКАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ СВЕРХВЫСОКОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ

Рассматривается процесс математического моделирования заводнения нефтяного месторождения в рамках динамической перколяционной модели на решетках, содержащих 10^9 узлов, с использованием суперкомпьютеров с GPU. Предложен алгоритм эффективной балансировки загрузки вычислительных узлов.

Ключевые слова: нефтяная добыча, GPU, перколяция, псевдослучайные числа, метод Монте-Карло, балансировка загрузки.

Введение. Современные методы добычи углеводородов невозможны без использования высокопроизводительных автоматизированных систем управления. Такие автоматизированные системы, базирующиеся на статистических моделях, позволяют оценить связность двух и более скважин и проводимость между ними, время прорыва агента между добывающей и нагнетательной скважинами и его поведение после прорыва (например, время достижения 50%-ной обводненности вокруг добывающей скважины) [1].

Использование данных моделей сопряжено, однако, с большими вычислительными затратами. Применение для моделирования вычислительных систем сверхвысокой производительности, содержащих графические ускорители (Graphics Processing Unit — GPU), позволяет за приемлемое время получать результаты с высокой точностью, но для эффективного проведения расчетов на графических ускорителях используемые алгоритмы требуют адаптации.

Постановка задачи. Для описания процессов нефтевытеснения используется динамическая перколяционная модель (ДПМ) [2]. Пласт представляется в виде агрегата из трех взаимопроникающих составляющих: скелета, жидкой фазы и газовой фазы. В модели нефтесодержащие поры и капиллярные каналы представлены в виде правильной кубической решетки, содержащей 10^9 узлов. Каждый канал случайным образом помечается „открытым“ с вероятностью протекания жидкости p ($0 \leq p \leq 1$) или „закрытым“ с вероятностью $(1-p)$. Открытым каналам приписывается значение гидросопротивления. Состояние (α) каждого узла (поры) описывается линейной комбинацией трех состояний: узел заполнен нефтью: $\alpha = +1$, узел заполнен водой: $\alpha = -1$ или узел не заполнен (вакантен): $\alpha = 0$.

Процесс фильтрации описывается системой кинетических уравнений для решеточных функций [2]:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} G_{\mathbf{m}}(t) &= - \sum_{\gamma_{\mathbf{m}}} \eta_{\gamma_{\mathbf{m}}} \Omega_{\gamma_{\mathbf{m}}} (G_{\mathbf{m}} - G_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}}); \\ \frac{d}{dt} F_{\mathbf{m}}^{\alpha}(t) &= - \sum_{\gamma_{\mathbf{m}}} \eta_{\gamma_{\mathbf{m}}} \Omega_{\gamma_{\mathbf{m}}} (\Psi_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}},\mathbf{m}} F_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}}^{\alpha} F_{\mathbf{m}}^0 - \Psi_{\mathbf{m},\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}} F_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}}^0 F_{\mathbf{m}}^{\alpha}); \\ F_{\mathbf{m}}^0(t) &= 1 - \sum_{\alpha=\pm 1} F_{\mathbf{m}}^{\alpha}(t), \end{aligned}$$

где \mathbf{m} — векторный индекс с целочисленными координатами, характеризующий узел с индексом ijk ; величины $F_{\mathbf{m}}^{\alpha}(t)$, $F_{\mathbf{m}}^0(t)$ интерпретируются как средние доли нефти, воды и вакан-

сии в узле \mathbf{m} ; $G_{\mathbf{m}}(t)$ — давление в узле \mathbf{m} ; $\gamma_{\mathbf{m}}$ — вектор, нумерующий ребра, выходящие из узла \mathbf{m} (одна из координат вектора $\gamma_{\mathbf{m}}$ равна ± 1 , остальные — нулевые); $\Psi_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}},\mathbf{m}} = \left(|G_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}} - G_{\mathbf{m}}| - (G_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}} - G_{\mathbf{m}}) \right) / 2$ — функция-„ниппель“ ребра $\gamma_{\mathbf{m}}$; $\eta_{\gamma_{\mathbf{m}}}$ — случайная величина со значениями „0“ и „1“ представляет собой индикатор открытости канала $\gamma_{\mathbf{m}}$; $\Omega_{\gamma_{\mathbf{m}}}$ — безразмерная случайная проницаемость канала, нормированная к единице.

Для численного моделирования процессов фильтрации использована следующая аппроксимация:

$$\bar{G}_{\mathbf{m}} = G_{\mathbf{m}} - \tau \sum_{\gamma_{\mathbf{m}}} \eta_{\gamma_{\mathbf{m}}} \Omega_{\gamma_{\mathbf{m}}} (G_{\mathbf{m}} - G_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}}); \quad (1)$$

$$\bar{F}_{\mathbf{m}}^{\alpha} = F_{\mathbf{m}}^{\alpha} - \tau \sum_{\gamma_{\mathbf{m}}} \eta_{\gamma_{\mathbf{m}}} \Omega_{\gamma_{\mathbf{m}}} (\Psi_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}},\mathbf{m}} F_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}}^{\alpha} F_{\mathbf{m}}^0 - \Psi_{\mathbf{m},\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}} F_{\mathbf{m}+\gamma_{\mathbf{m}}}^0 F_{\mathbf{m}}^{\alpha}); \quad (2)$$

$$\bar{F}_{\mathbf{m}}^0 = 1 - \sum_{\alpha=\pm 1} \bar{F}_{\mathbf{m}}^{\alpha}(t), \quad (3)$$

где τ — шаг по времени; $G_{\mathbf{m}}$, $F_{\mathbf{m}}^{\alpha}$, $F_{\mathbf{m}}^0$ и $\bar{G}_{\mathbf{m}}$, $\bar{F}_{\mathbf{m}}^{\alpha}$, $\bar{F}_{\mathbf{m}}^0$ — значения решеточной функции в моменты времени t и $t+\tau$ соответственно.

Методика расчета. Рассматриваемая задача (1)—(3) является стохастической и требует проведения многократных расчетов каждого из сценариев заводнения нефтяного месторождения. Соответственно необходимо задание нового набора случайных величин, характеризующих гидросопротивление межпоровых каналов, для каждого из сценариев, и, кроме того, само их моделирование требует значительных затрат процессорного времени.

Использование внутреннего параллелизма, присущего динамической перколяционной модели, позволяет эффективно производить расчеты на основе параллельных систем сверхвысокой производительности.

Перед непосредственным расчетом сценариев заводнения выполняются следующие подготовительные действия, что позволяет, с одной стороны, избежать их многократного повторения, а с другой — эффективно использовать параллельные системы:

- 1) генерация геометрии месторождения с помощью механизма R-функций [3];
- 2) „наложение“ скважин;
- 3) решение задачи балансировки загрузки вычислительных узлов.

Информация о геометрии месторождения задается с помощью базовых элементов различных форм (эллипсоида, параллелепипеда, эллиптического цилиндра, полупространства) и операций над ними (пересечение, объединение, дополнение, поворот, сдвиг).

Скважины задаются набором цилиндрических секций заданной толщины.

При окончательном расчете каждого из сценариев заводнения выполняются следующие операции:

- 1) генерация перколяционной решетки с помощью генератора псевдослучайных чисел;
- 2) „наложение“ скважин на перколяционную решетку;
- 3) решение системы дифференциальных уравнений (1)—(3).

При генерации перколяционной решетки для задания значения случайной величины $\eta_{\gamma_{\mathbf{m}}}$ используется генератор псевдослучайных чисел на основе M-последовательностей [4, 5]

$$\Phi_{j+1023} = \Phi_{j+511} + \Phi_{j+127} + \Phi_{j+7} + \Phi_j \bmod 2, \quad (4)$$

где Φ_i — одноразрядные члены рекуррентной последовательности, и применяется формула для получения очередного псевдослучайного 32-битового числа [5]:

$$w_{j+8} = (w_j \ll 1) \oplus (w_{j+1} \gg 31) \oplus (w_j \ll 8) \oplus (w_{j+1} \gg 24) \oplus w_{j+4} \oplus w_{j+16}, \quad (5)$$

где \oplus — операция побитового сложения по модулю 2 целых чисел; операции „ \gg “ и „ \ll “ — побитовые сдвиги вправо и влево соответственно на указанное количество разрядов; w_i — 32-битовые слова кольцевого буфера,

Указанный генератор (4)—(5) был реализован в библиотеке LRND32-GPU [6] для возможности генерации псевдослучайных чисел на процессоре GPU. Для быстрого получения псевдослучайного числа с требуемым номером используется методика, описанная в работах [5, 7—8], что позволяет производить параллельную генерацию участков перколяционной решетки одного месторождения на нескольких процессорах GPU.

Наибольших вычислительных затрат требует операция интегрирования дифференциальных уравнений давления и насыщенностей фаз, т.е. вычисление (1)—(3).

При расчетах используется двумерный блок шириной $wb = 32$ нити и высотой $hb = 6$ нитей (всего 192 нити). В его рамках вычисление (1)—(3) для месторождения (или его части) размером $L_x \times L_y \times L_z$ узлов производится в два этапа: на первом этапе рассчитывается участок размером $L_x \times hb \times 1$ для каждого из блоков, на втором этапе — участок размером $wb \times 1 \times L_z$. Результаты расчетов складываются [9].

При разбиении решетки на блоки (для поддержания обработки на нескольких GPU) каждый из них содержит, кроме основных, теневые узлы, значения переменных в которых вычисляются в другом блоке. Приграничными будем называть узлы, граничащие с теневыми. При обмене приграничными узлами между несколькими процессорами GPU, находящимися на разных вычислительных блоках, для сокращения времени обмена осуществляется предварительное вычисление данных и асинхронные отсылка и прием. Одновременно с обменом производится вычисление в обычных узлах.

Балансировка загрузки вычислительных узлов. Для эффективной балансировки загрузки вычислительных узлов использован двухуровневый метод декомпозиции графа, описывающего перколяционную решетку [10]. Вначале расчетная сетка разбивается на большое число компактных блоков — микродоменов, каждому из которых принадлежит некоторое количество узлов сетки, а макрограф описывает топологию сетки блоков. Каждая из вершин макрографа представляет собой микродомен, а ребро — связь между ними. Вершины имеют веса, равные количеству узлов в микродоменах. Балансировка в этом случае достигается при разбиении макрографа на части по числу процессоров.

Особенностями алгоритма (и GPU в целом) обусловлены дополнительные требования к разбиению:

- 1) параллелепипеды, описанные вокруг вершин микродоменов, не должны иметь пересечений (для ускорения „упаковки“ узлов в сообщения);
- 2) заполнение параллелепипедов узлами должно быть максимально плотным (расчет узлов внутри параллелепипеда осуществляется независимо от того, активен узел или нет);
- 3) параллелепипеды не должны быть слишком малых размеров (в результате экспериментов установлено, что размер микродомена должен составлять $62 \times 36 \times 36$ узлов и более);
- 4) микродомены не должны иметь граничных „соседей“ в направлении оси Ox (в то же время разбиение перпендикулярно этой оси возможно для пропуска „пустых“ участков); это требование продиктовано особенностью доступа к памяти GPU: минимальное количество информации, извлекаемое из памяти, составляет 32 байта [11], поэтому при обработке узлов, хаотично расположенных в памяти, происходит резкое снижение производительности GPU (на порядок); в этом случае обработка производится при обмене приграничными узлами.

С учетом указанных требований было принято решение для разбиения регулярной сетки на микродомены использовать параллельный алгоритм геометрической декомпозиции сеточных данных [12], в основе которого лежит метод рекурсивной координатной бисекции. Реализация алгоритма предусматривает получение набора микродоменов, число вершин в которых отличается не более чем на одну. Для этого на каждом этапе бисекции разбиение произ-

водится по медиане перпендикулярно координатной оси, вдоль которой разбиваемый домен имеет наибольшую протяженность.

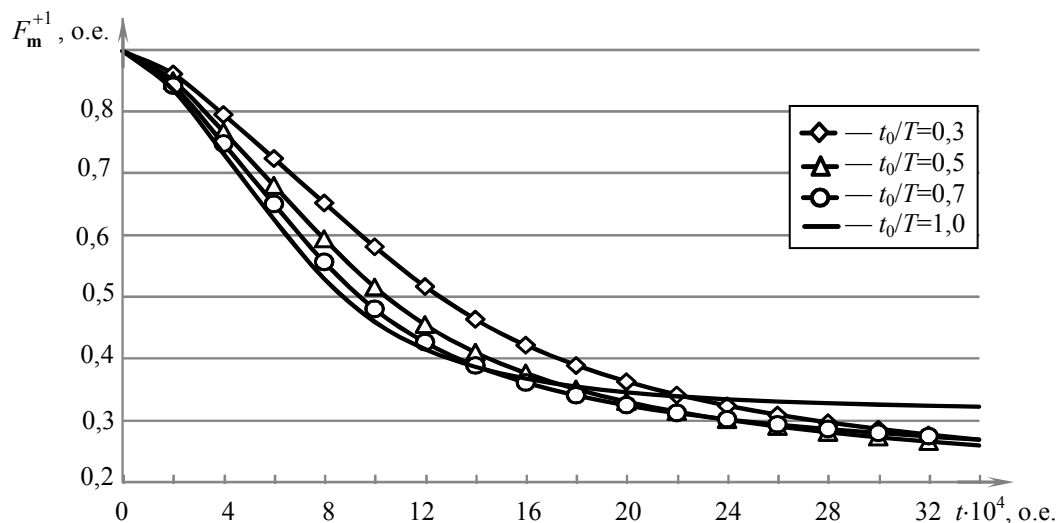
Алгоритм был модифицирован для удовлетворения требований, изложенных в п. 1, так как в исходном варианте получаемые параллелепипеды имели пересечения. В новом варианте разбиения осуществляются не точно по медиане, а так, чтобы плоскость, содержащая медиану, оказывалась полностью на грани одного из получаемых параллелепипедов. В этой модификации разница в числе вершин получаемых микродоменов минимально возможная (в исходном варианте — не более одной вершины). Выполнение требований, изложенных в пп. 2 и 3, обеспечивалось путем определения оптимального количества микродоменов при разбиении; требования п. 4 удовлетворены не были.

Наряду с данным алгоритмом был предложен другой подход, более полно удовлетворяющий указанным требованиям и обладающий вместе с тем достаточной простотой. Исходная сетка в этом случае подвергается разбиению на блоки (микродомены) равной ширины вдоль осей Oy и Oz . При этом если полученный блок содержит секции, не имеющие ни одного узла в сечении, параллельном плоскости yOz , производится попытка его разбиения плоскостями, параллельными yOz , так чтобы длина блоков была не меньше заданного порогового значения.

Для возможности использования нескольких процессоров GPU макрограф делится на части по количеству карт с помощью алгоритма PartGraphKway пакета Metis [13].

Результаты. Моделирование процессов фильтрации нефти было проведено на решетке размером $2000 \times 2000 \times 250$ узлов для стационарного и нестационарного режимов воздействия на нефтесодержащий пласт. Нагнетательные и добывающие скважины были размещены в шахматном порядке, расстояние между рядами однотипных скважин составляло 80 узлов, каждая скважина занимала 3×3 узла. Время расчета — примерно 56 ч с использованием 60 процессоров GPU.

Результаты моделирования приведены на рисунке, где показана зависимость относительного содержания нефти в пласте (среднее значение F_m^{+1} по всем узлам) от времени при стационарном (отношение времени воздействия t_0 к периоду воздействия $T=2000$ о.е. равно единице) и нестационарном ($t_0/T=0,3 \dots 0,7$) воздействиях и вероятности открытости каналов $p=0,4$. Моделирование проводилось до достижения момента времени $t=34 \cdot 10^4$ о.е. Наблюдается описанное в работе [2] характерное снижение доли остаточной нефти при импульсном режиме закачки воды по сравнению со стационарным режимом.



Сравнительный анализ методов декомпозиции представлен в таблице, где время выполнения программы приведено в зависимости от примененного метода балансировки загрузки.

В графе „Метод“ символом „—“ обозначен вариант реализации программы без учета геометрии месторождения, в этом случае разбиение решетки осуществляется по методу геометрического параллелизма на равные части (между GPU) параллельно плоскости xOz ; цифрой 1 обозначен метод геометрической декомпозиции, цифрой 2 — предложенный метод.

Ускорение работы программы в зависимости от используемого метода вычислено по формуле

$$S_{1/2} = \frac{T_-}{T_{1/2}},$$

где T_- — время работы программы без учета геометрии месторождения, $T_{1/2}$ — время работы программы с использованием первого или второго метода.

Эффективность рассматриваемых методов вычислена по формуле

$$E_{1/2} = S_{1/2} P_{\text{акт}},$$

где $P_{\text{акт}}$ — доля активных узлов (в процентах от общего количества).

Количество GPU	Количество узлов	$P_{\text{акт}}, \%$	Метод	Количество микро-доменов	Часть вычисляемых узлов, %	Время выполнения 10^3 итераций, с	$E_{1/2}, \%$	$S_{1/2}$
1	$0,27 \cdot 10^8$	45,08	—	1	100	44,63	45,08	1
			1	53	54,92	37,31	53,91	1,20
			2	64	62,62	26,87	74,88	1,66
3	$0,91 \cdot 10^8$	44,94	—	3	100	58,81	44,94	1
			1	215	58,07	59,25	44,60	0,99
			2	111	52,42	33,43	79,04	1,76
30	10^9	44,60	—	30	100	85,37	30,72	1
			2	495	48,46	42,84	88,90	1,99

Расчеты проводились на гибридной вычислительной системе К-100 (Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН, Москва), содержащей 192 графических процессора NVIDIA Tesla C2050. Коммуникационная сеть QLogic Infiniband.

Выводы. На базе описанной в работе [2] динамической перколяционной модели разработаны алгоритмы и создано программное обеспечение для моделирования процессов фильтрации нефти и активного нефтевытеснения с использованием систем сверхвысокой производительности, содержащих GPU NVIDIA.

Предложен подход, позволяющий осуществлять оптимальную балансировку загрузки вычислительных узлов. Эффективность использования предложенного метода составляет до 74—88 %.

Проведено моделирование на решетке, содержащей 10^9 узлов. Согласованность результатов моделирования с результатами, полученными в работе [2] на решетке с меньшим разрешением (10^8 узлов), подтверждает правильность выводов, сделанных в этой работе, и устойчивость динамической перколяционной модели.

Статья подготовлена по результатам работы, выполненной при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 11-07-00779-а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Mohsen Masihi, King P. R.* Percolation approach in underground reservoir modeling // *Water Resources Management and Modeling*; Ed. *Purna Nayak* / InTech. 2012. March 3.

2. Лапушкин С. С., Бренерман М. Х., Якобовский М. В. Моделирование динамических процессов фильтрации в перколяционных решетках на высокопроизводительных вычислительных системах // Математическое моделирование. 2004. Т. 16, № 11. С. 77—88.
3. Соллогуб А. В., Вальшин А. Т. Система трехмерного геометрического моделирования пространственных тел с использованием характеристических и R-функций // Программирование. 1991. № 3. С. 86—96.
4. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука, 1973.
5. Iakobovski M. V., Kornilina M. A., Voroniuk M. N. The scalable GPU-based parallel algorithm for uniform pseudorandom number generation // Proc. of the 2nd Intern. Conf. on Parallel, Distributed, Grid and Cloud Computing for Engineering. 2011. Paper 23.
6. Программные средства, разработанные в ходе выполнения контракта № 07.514.11.4002. [Электронный ресурс]: <http://apos.imamod.ru/Programms/index_prog.html>.
7. Якобовский М. В. Параллельный алгоритм генерации последовательностей псевдослучайных чисел // Математическое моделирование. 2009. Т. 21, № 6. С. 59—68.
8. Brent R. P. On the periods of generalized Fibonacci recurrences // Techn. Report TRCS -92-03, Computer Sciences Laboratory. 1992. March.
9. Воронюк М. Н., Якобовский М. В. Адаптация алгоритмов моделирования динамических процессов фильтрации в перколяционных решетках для графических ускорителей // Математическое моделирование. 2012. Т. 24, № 12. С. 78—85.
10. Abalakin I. V., Boldyrev S. N., Chetverushkin B. N., Zhokhova A. V., Iakobovski M. V. Parallel algorithm for solving flow problems on unstructured meshes // Proc. of 16th IMACS World Congress. Lausanne, Switzerland, Aug. 21—25, 2000.
11. NVIDIA. CUDA C Programming Guide. 2012. Vol. 5.0.
12. Головченко Е. Н. Параллельный пакет декомпозиции больших сеток // Математическое моделирование. 2011. Т. 23, № 10. С. 3—18.
13. METIS—Serial Graph Partitioning and Fill-reducing Matrix Ordering [Электронный ресурс]: <<http://glaros.dtc.umn.edu/gkhome/metis/metis/overview>>.

Сведения об авторе

Михаил Николаевич Воронюк — аспирант; Московский государственный технологический университет „СТАНКИН“, кафедра информационных систем;
E-mail: voronyukm@gmail.com

Рекомендована кафедрой
информационных систем

Поступила в редакцию
12.02.13 г.

А. А. ЛЯМКИН, Н. П. МИКУЛЕНКО, Т. Ф. ТРЕВГОДА

ЯЗЫК ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Предлагается объектно-признаковый язык описания структуры пространственного размещения, характеристик и информационных связей сложных технических систем. Представлены алгоритмы обработки информации и модели функционирования систем с использованием объектно-признакового языка.

Ключевые слова: техническая система, объектно-признаковый язык, описание, структура, алгоритм.

Введение. Цели функционирования сложных технических систем (СТС) достигаются только благодаря управлению. В основе алгоритмов управления лежат правила поведения системы и ее компонентов, приводящие к достижению заданной цели. Алгоритмы управления СТС, составной частью которых являются алгоритмы обработки информации, реализуются в виде функционального программного обеспечения (ФПО) комплексов управления. В конечном счете ФПО определяет эффективность функционирования систем.

Правила поведения системы (иначе, правила управления, правила боевого использования, правила обработки информации) формулируются ее заказчиком на естественном языке в терминах конкретной предметной области, а их реализация в виде ФПО осуществляется исполнителем. Вербальность технического задания на создание ФПО часто ведет к разному пониманию заказчиком и исполнителем одних тех же задач, что, как известно, приводит к длительному и дорогостоящему процессу отладки системы, а нередко и к невозможности реализации ее проекта.

Синтаксис и семантика языка. Для формализации описания СТС, включая процессы ее функционирования и управления, а также для формулирования технического задания на ФПО в целях его однозначного толкования заказчиком и исполнителем может служить объектно-признаковый язык — некий метаязык, который является промежуточным между вербальным языком и языками программирования высокого уровня.

Для понимания сути языка достаточно рассмотреть лишь его синтаксис и семантику. Можно считать, что каждый конкретный объект X принадлежит к определенному множеству (типу) объектов ($T.X$). Любой объект этого множества характеризуется номером, иначе говоря, именем конкретного экземпляра ($N_T.X$) и целым набором других признаков, которые перечисляются в квадратных скобках после имени объекта ($T.X [N_T.X\dots]$). Объекты и их признаки обозначаются на латинице начальными буквами терминов языка предметной области и общепринятых физических величин.

Существуют признаки числовые (например, D — дистанция, V — скорость, U — угол) и нечисловые (например, TC — тип цели, PH — признак высоты). Если признак объекта характеризуется только одним членом некоторого множества, то все члены множества перечисляются в фигурных скобках (например, $TC: \{C, W, R\}$, где C — самолет, W — вертолет, R — ракета). Если признак объекта характеризуют все члены множества, то они задаются кортежем в угловых скобках (например, $GR: \langle LX, LY, LZ \rangle$, где GR — геометрические размеры объекта вдоль осей его симметрии).

Признаки бывают зависимыми и независимыми. Зависимость (функция) одного признака от другого указывается в круглых скобках (например, $E(D)$ — энергия или мощность E принимаемого излучения зависит от дальности D до источника излучения). Описание типа

любого объекта X можно рассматривать как таблицу, где в первой графе указывается его имя $T.X$, а в последующих графах — все остальные признаки.

Для описания информационных связей между объектами служат входные и выходные формуляры обмена информацией ($F.$) с расширением по имени объекта. Чтобы различать входные и выходные формуляры одного и того же объекта, для входного формуляра вводится дополнительное расширение U (управляющий), а для выходного — I (информирующий). При однозначном понимании, о каком формуляре идет речь (например, при последовательном соединении объектов) необходимость в дополнительном расширении отпадает. Различие между типами объектов $T.X$ [...] и формулярами $F.X$ [...] заключается в том, что признаки в формулярах являются переменными величинами, а в типах объектов — постоянными.

Между признаками могут устанавливаться различные соотношения, принятые в математике и языках программирования высокого уровня (например, $+$, $-$, $:$, $/$, $=$, \neq , $>$, \geq , $<$, \leq , \approx , SQRT, SIN, SGN и т. п.). Это позволяет описывать процессы функционирования СТС и алгоритмы обработки информации и управления.

Описание структуры СТС. Любая СТС в обобщенном виде может быть представлена совокупностью (рис. 1) таких взаимосвязанных средств, как:

SZ — средства технического зрения, с помощью которых система получает информацию о состоянии других взаимодействующих с ней систем;

SV — средства информационного и/или материального воздействия на другие СТС;

KU — комплекс (средство) управления;

SO — оператор системы;

SD — средство доставки (носитель) всех других средств.

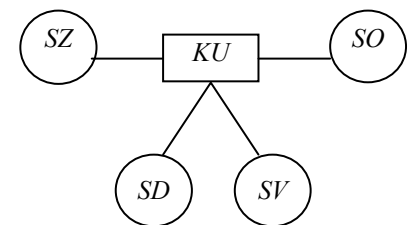


Рис. 1

Эти пять взаимосвязанных средств представляют собой ядро, которое может быть использовано как для построения блочной модели структуры СТС, так и для формализованного ее описания. Отметим, что на любом уровне иерархии системы обязательным является лишь наличие комплекса управления.

Так, описание батареи самоходных зенитных комплексов может быть представлено в виде двух строк (по числу уровней иерархии):

$$T.KG [N_T.KG, N_T.SZ, N_T.KU, N_T.SD, QL, N_T.KL];$$

$$T.KL [N_T.KL, N_T.SZ, N_T.KU, N_T.SD, QSV, N_T.SV],$$

где первая строка описывает тип группы $T.KG$ (батарея), а вторая — тип входящих в ее состав локальных зенитных комплексов ($T.KL$).

Описание батареи включает в себя: $N_T.KG$ — номер батареи, количество (QL) и название ($N_T.KL$) подчиненных зенитных комплексов; в описании зенитного комплекса ($T.KL$) содержится его имя ($N_T.KL$), количество (QSV) и имя ($N_T.SV$) средств воздействия (артиллерийских или ракетных установок). Кроме того, и в описании батареи, и в описании зенитного комплекса содержится имя средств технического зрения ($N_T.SZ$), имя комплекса управления ($N_T.KU$) и имя средства доставки ($N_T.SD$).

Описание пространственного размещения СТС. Тип пространственного размещения $T.RX$ любого объекта (системы, комплекса или их составной части) относительно заданной (реперной) точки в общем случае характеризуется его координатами (X, Y, Z), скоростью (V) и направлением движения объекта в горизонтальной (EZ) и вертикальной (EY) плоскостях неподвижной декартовой системы координат:

$$T.RX [N_T.RX, X, Y, Z, V, EZ, EY].$$

При неподвижном объекте углы EZ и EY определяют его пространственную ориентацию. Тип размещения отдельного средства СТС характеризуется координатами относительно

геометрического центра носителя. Тип размещения является важной характеристикой начальных условий функционирования системы.

Описание характеристик отдельных средств СТС. При описании конкретных образцов средств системы (обнаружителей, носителей и др.) следует исходить из обобщенного описания каждого средства, что ведет к единообразию описаний и позволяет выявить или не упустить существенные детали. При этом важно иметь представление о том, для каких целей будет использоваться данное описание. Каждый объект в целом обладает и функциональными, и конструктивными, и экономическими характеристиками. Однако при решении разных по целям задач эти характеристики используются порознь.

Например, описание характеристик такого средства технического зрения, как обзорная РЛС с антенной решеткой, с точки зрения функциональности средства может быть представлено в виде

$$T.SZ [N_T.Z, QM, DM, DH, T, IK:<K, M, D>, TD, TE],$$

где QM — максимальное число сопровождаемых целей, DM и DH — минимальная и максимальная дальности обнаружения соответственно, T — период обзора, $IK:<K, M, D>$ — измеряемые координаты целей (соответственно K — курсовой угол, M — угол места, D — дальность), TD — точность измерения дальности, TE — точность измерения углов.

В функциональном описании $T.SZ$ отсутствуют массогабаритные, стоимостные или эксплуатационные характеристики. Степень подробности такого описания зависит от целей его дальнейшего использования.

Описание информационных связей СТС. На рис. 2 показаны информационные связи комплекса управления KU с другими средствами системы и с надсистемой. Связи представлены в виде формуляров обмена информацией. Их совокупность образует информационную модель системы.

Например, информирующий формуляр радиолокационного обнаружителя имеет вид

$$F.ZI [LC, N_C, K, M, D],$$

где LC — количество сопровождаемых целей, N_C — номер цели в нумерации данного обнаружителя.

Управляющий формуляр носителя (SD) имеет вид

$$F.DU [V, EZ, EY].$$

Аналогичным образом могут быть описаны и все другие связи.

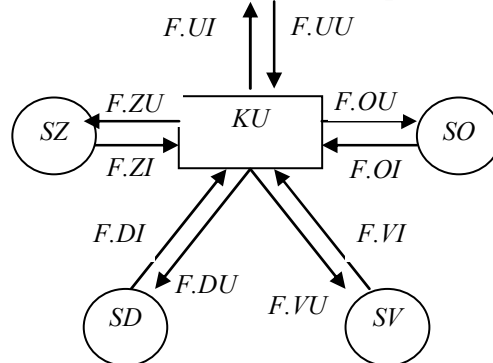


Рис. 2

Описание процессов функционирования СТС. Информационная модель объекта может служить для системного описания процесса его функционирования. Модель (алгоритм) функционирования какого-либо подвижного объекта (системы) $M.X$ может быть представлена в виде преобразования информации из входного формуляра $F.XU$ в выходной $F.XI$ в соответствии с характеристиками объекта, задаваемыми его типом $T.X$ и типом его размещения $T.RX$:

$$M.X = F.XU \xrightarrow{T.X \& T.RX} F.XI.$$

В общем случае число входных и выходных формуляров не ограничено. Например, модель комплекса управления СТС (см. рис. 2) можно записать как

$$M.KU = F.ZI \& F.OI \& F.DI \& F.VI \& F.UU \xrightarrow{T.KU} F.ZU \& F.OU \& F.DU \& F.VU \& F.UI.$$

Для представления алгоритмов обработки информации и моделей функционирования систем с использованием объектно-признакового языка может служить улучшенная авторами форма структурограмм [1].

Функциональное программное обеспечение комплекса управления *KU* любой СТС включает в себя две группы программ: 1) программы обработки информации и 2) программы выработки команд управления. К 1-й группе относятся программы отождествления объектов, их классификации, преобразования координат, расчета характеристик взаимного положения объектов и др. Для примера рассмотрим упрощенный алгоритм отождествления воздушных целей (объектов), реализуемый в ФПО корабельного комплекса радиоэлектронного подавления (РЭП) противника.

Надводный корабль обнаруживает цели с помощью РЛС, аппаратуры обнаружения лазерных излучений и станции радиотехнической разведки. Информация о радиолокационных (*F.RL*), лазерных (*F.OL*) и радиотехнических (*F.RT*) целях в виде входных формуляров поступает на вход программных средств комплекса РЭП:

$$\begin{aligned} &F.RL[LC, N_C, KR, MR, TER, DR]; \\ &F.OL[LL, N_L, KL, ML, TEL]; \\ &F.RT[LT, N_T, KT, MT, TET]. \end{aligned}$$

В формулярах обозначено: *LC*, *LL*, *LT* — количество целей; *N_C*, *N_L*, *N_T* — номера целей; *KR*, *KL*, *KT* — курсовые углы; *MR*, *ML*, *MT* — углы места; *TER*, *TEL*, *TET* — точность измерения углов соответственно радиолокационных, лазерных и радиотехнических целей; *DR* — дистанция до радиолокационной цели.

Другая информация, имеющаяся в этих формулярах, но не используемая в алгоритме отождествления, не приведена.

Поскольку расстояния между обнаружителями корабля весьма малы по сравнению с расстояниями до целей, отождествление производится в сферической системе координат [2]. Будем считать, что обзорная РЛС, в отличие от аппаратуры обнаружения лазерных излучений и станции радиотехнической разведки, обнаруживает все существующие цели с большей точностью. Задача программы отождествления состоит в том, чтобы определить, какую цель видят все три обнаружителя, два или один. Это необходимо знать в дальнейшем для назначения средств противодействия. Отождествление можно проводить только по курсовым углам целей ввиду их рассредоточения, превышающего угол места, и большей точности обнаружителей по горизонту.

Алгоритм отождествления приведен на рис. 3. Формуляры обнаружителей показаны в блоке исходных данных. Сначала за счет перебора целей (путем организации цикла в цикле) производится попарное сравнение курсовых углов радиолокационных и лазерных целей. При их совпадении вырабатывается признак отождествления $PO = \langle RL+OL \rangle$ (цели радиолокационная и лазерная одновременно), а при несовпадении — $PO = RL$ (цель только радиолокационная). Как только угол *KR* какой-либо радиолокационной цели совпадет с углом *KL* лазерной цели, перебор последних прекращается за счет присвоения лазерной цели *N_L* значения *LL*, заполняется промежуточный формуляр отождествления *F.OP* и производится переход к сравнению следующей радиолокационной цели со всеми лазерными. По окончании операций сравнения в формуляре *F.OP* указывается общее число радиолокационных целей. Затем аналогичные действия производятся уже при сравнении курсовых углов радиотехнических целей и целей, характеристики которых были записаны в формуляре *F.OP*. В результате сравнения

всех целей признаки отождествления записываются в окончательный формуляр отождествления ($F.O$), в котором указывается общее число целей LC , и на этом алгоритм заканчивается.

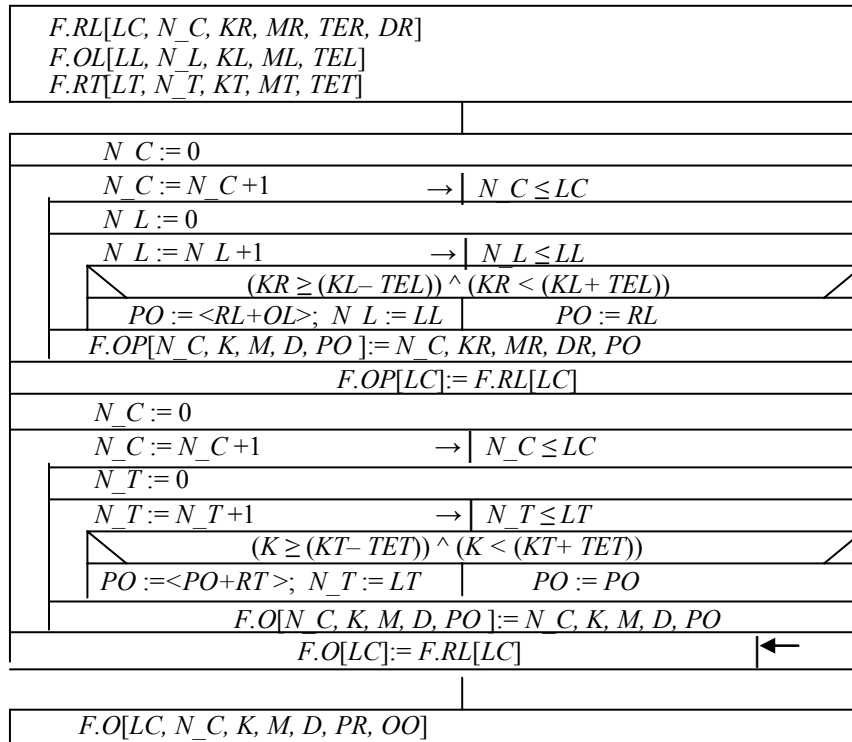


Рис. 3*

Заключение. Объектно-признаковый язык позволяет в формализованном виде описать структуру сложной технической системы, ее пространственное размещение, характеристики составляющих систему компонентов, внутренние и внешние информационные связи, а также модели функционирования и алгоритмы обработки информации и управления, что способствует лучшему взаимопониманию между специалистами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жарковский А. В., Лямкин А. А., Микуленко Н. П. Структурограммы на основе объектно-признакового языка // Программная инженерия. 2012. № 4. С. 23—27.
2. Лямкин А. А. Алгоритмы отождествления подвижных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2004. Т. 48, № 12.

Сведения об авторах

- Александр Анатольевич Лямкин** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления; E-mail: alex-ljamkin@yandex.ru
- Николай Павлович Микуленко** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления; E-mail: nmikulenko@yandex.ru
- Татьяна Федоровна Тревгода** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“, кафедра систем автоматического управления; E-mail: tat.trevgoda@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
систем автоматического управления

Поступила в редакцию
20.11.12 г.

* Знак „:=“ на рис. 3 соответствует операции присвоения.

В. Т. ФИСЕНКО, Т. Ю. ФИСЕНКО

ФРАКТАЛЬНЫЕ МЕТОДЫ СЕГМЕНТАЦИИ ТЕКСТУРНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлены результаты разработки и исследования фрактальных методов сегментации цветных текстурных изображений. Цветовые характеристики текстуры использованы в качестве дополнительного признака для повышения эффективности сегментации. Рассмотрены особенности синтеза текстур на основе фрактальных свойств. Методы предназначены для автоматической обработки текстурных изображений.

Ключевые слова: фрактал, размер фрактала, синтез фракталов, сегментация, текстура.

Введение. Цвет и текстура являются важными характеристиками изображения. Анализ цветных текстур включает в себя их описание и классификацию, т.е. формирование кластеров и сегментацию (разбиение изображения на области, которые являются однородными относительно одной или нескольких характеристик либо принадлежат некоторому кластеру). Под кластером понимается группа объектов, образующих в пространстве описания компактную в некотором смысле область.

Р. Харалик выделяет два подхода к описанию текстур: статистический и структурный [1]. В настоящее время развивается и получает распространение третий подход к описанию текстур — фрактальный. Так, фракталы используются при анализе текстурных изображений ландшафтов, полученных при аэрокосмической съемке, при анализе поверхностей порошков и других пористых сред, при анализе облаков и т.д. [2, 3]. В основе методов фрактального анализа лежит концепция статистического самоподобия цветных текстур природного происхождения в широком диапазоне масштабов.

Размер фрактала представляет собой характеристику сложности поверхности и принимает значения в диапазоне от 2 до 3: меньшим значениям размера фрактала соответствуют гладкие поверхности, а бóльшим — более сложные изрезанные поверхности.

При сегментации цветных текстур необходимо учитывать как пространственные характеристики, так и характеристики цветности. Эффективность выбора признаков зависит от выбора цветового координатного пространства, при этом наиболее информативным из цветовых признаков является компонент тона. Осуществляется преобразование цветового координатного пространства RGB в пространство LSH [4]. Оценка размера фрактала производится по яркостному компоненту изображения. Хотя размер фрактала инвариантен к изменению масштаба, природные поверхности не обладают одинаковым размером фрактала во всем возможном диапазоне масштабов. Оценка фрактальности текстуры является важной характеристикой при сегментации изображений по размеру фрактала. Фрактальность текстуры оценивается по монотонности изменения характеристики фрактала в зависимости от шага оценивания. Диапазон допустимых значений шагов определяется интервалом монотонности.

Оценка фрактальности признаков цветных текстур. Размер фрактала цветной текстуры во многом зависит от выбора метода оценивания. Сопоставление текстур возможно при использовании одного и того же метода (группы методов). Более того, не всякие текстуры хорошо различимы по размеру фрактала. В связи с этим прежде чем включать в систему признаков размер фрактала, необходимо оценить фрактальность текстуры. Оценка фрактальности текстуры производится на основе выбранного метода оценивания размера фрактала.

Размер фрактала оценивается по формуле

$$D = K - \hat{\theta}_1, \quad (1)$$

где $K=2$ или 3 в зависимости от алгоритма оценивания, $\hat{\theta}_1$ — тангенс угла наклона линии выборочной регрессии.

Поскольку размер фрактала вычисляется через оценку выборочной регрессии, то естественно оценивать фрактальность текстуры по коэффициенту корреляции между логарифмом случайной величины и логарифмом заданной функции шага. При этом для принятия решения о фрактальности текстуры необходимо произвести следующие действия:

- построить зависимость коэффициента корреляции от задаваемого шага; значение шага, при котором функция имеет максимум, является максимальным;
- при использовании методов, в которых оценка размера фрактала принимается как среднее значение для серии экспериментов, не учитывать размер фрактала при низких значениях коэффициента корреляции;
- при низких значениях коэффициента корреляции не включать размер фрактала в систему признаков для сегментации текстур.

Процедура оценивания размера фрактала. Производится оценка логарифма некоторой характеристики яркостного компонента $f(L_i)$ изображения для серии размеров шагов s_i . Строится линейная выборочная регрессия логарифма $f(L_i)$ от логарифма шага:

$$y = \theta_0 + \theta_1 x,$$

где $y = \log[f(L)]$, $x = \log s$.

По значениям, полученным при изменении шага в диапазоне допустимых значений, оцениваются коэффициенты θ_0 и θ_1 , минимизирующие средний квадрат отклонения:

$$\hat{\theta} = \begin{bmatrix} \hat{\theta}_0 \\ \hat{\theta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\sum x_i^2 \sum y_k - \sum x_i \sum x_k y_k \right) / \left(N \sum x_i^2 - \left(\sum x_i \right)^2 \right) \\ \left(N \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_k \right) / \left(N \sum x_i^2 - \left(\sum x_i \right)^2 \right) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где N — число шагов, $y_i = \log[f(L_i)]$, $x_i = \log s_i$.

Наименьшее значение среднего квадрата отклонения равно [5]

$$\min(E(y - (\theta_0 + \theta_1 x))) = \sigma_y^2 (1 - \rho_{y,x}),$$

где $E(\cdot)$ — математическое ожидание, σ_y^2 — дисперсия y , $\rho_{y,x}$ — коэффициент корреляции y и x ; отсюда качество „наилучшего“ линейного приближения оценивается значением коэффициента корреляции:

$$\rho_{y,x} = \frac{\text{cov}(y,x)}{\sigma_y \sigma_x} = \frac{E((y - m_y)(x - m_x))}{\sigma_y \sigma_x},$$

где σ — среднеквадратическое отклонение (СКО), m — математическое ожидание соответствующих случайных величин y и x .

Оценка межкластерных расстояний для фрактальных методов. В качестве модели для исследования оценки размера фрактала используем синтезированные фракталы с показателем Херста (h) от 0,1 до 0,9. В качестве критерия оценки примем меру Фишера, получаемую как отношение разности математических ожиданий оценок размера фрактала на сумму СКО этих оценок.

Алгоритм оценивания размера фрактала по длине контура. Производится разбиение динамического диапазона яркостей изображения на равные интервалы [3]. Для полученного набора пороговых значений яркости строятся бинарные изображения. При этом элементам изображения, яркость которых меньше порога, присваивается значение „0“, а элементам,

яркость которых выше или равна порогу, присваивается значение „1“. Производится оценка длин контуров единичной области для серии шагов s_i . Увеличение шага эквивалентно представлению анализируемого изображения с разрешением меньшим, чем разрешение полученного изображения. Длина контура аппроксимируется числом переходов уровней яркости бинарного изображения из 0 в 1 и из 1 в 0 для каждого значения шага. По полученным значениям оценивается регрессия логарифма длины контура от логарифма шага. Для каждого из бинарных изображений вычисляется оценка размера фрактала D_i контуров единичных областей. Оценка размера фрактала D исходного изображения получается усреднением оценок D_i . Оценка D определяется анизотропно (только по строкам, только по столбцам) и изотропно (совместно по строкам и столбцам) для 9 различных фракталов с $h \in [0,1..0,9]$ и 3 размеров окон. Моделирование выполнено для 50 реализаций фракталов. Поскольку распределение оценки размера фрактала имеет большую дисперсию, произведена низкочастотная (НЧ) фильтрация оценки размера фрактала в скользящем окне 64×64 . Значения m и σ соответствуют значениям математического ожидания и СКО размеров фракталов, приведенных к диапазону значений от 2 до 3 и представленных уровнями $[0, 2^q - 1]$, где q — число разрядов квантования яркости изображения ($q=8$). По результатам моделирования построены матрицы межфрактальных расстояний (МФР). В качестве примера в табл. 1 приведены значения МФР, определенных изотропно по длине контура для окна размером 16×16 элементов.

Таблица 1

h	Мера Фишера при h								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,1	0	0,93	1,7	2,31	2,63	3,14	3,96	4,66	4,72
0,2		0	0,79	1,36	1,77	2,33	3,14	3,89	3,91
0,3			0	0,51	0,99	1,59	2,35	3,12	3,14
0,4				0	0,55	1,2	1,97	2,79	2,82
0,5					0	0,63	1,33	2,1	2,16
0,6						0	0,64	1,39	1,48
0,7							0	0,78	0,9
0,8								0	0,14
0,9									0

На основании проведенного исследования сделаны следующие выводы:

— данный метод можно использовать для оценки размера фрактала D при условии ее НЧ-фильтрации;

— исключение некоторых интервалов из рассмотрения при оценке размера фрактала приводит к неразличимости фракталов, имеющих разный размер;

— для изотропных текстур большей эффективностью обладает алгоритм оценки размера фрактала по строкам и по столбцам.

Метод пирамиды [6]. Этот метод устанавливает соотношение между площадью поверхности, создаваемой яркостью изображения, и пространственным разрешением двумерных единиц, используемых для измерения этой площади. Изображение рассматривается на квадратной сетке, и измерения производятся для серии размеров этой сетки.

На расстоянии заданного шага s_i ($EF = FG = GH = HE$) по строке и столбцу восстанавливаются 4 перпендикуляра к плоскости растра, длины которых равны яркости соответствующих элементов изображения, как показано на рис. 1. Соединение вершин этих перпендикуляров задает основание пирамиды $ABCD$. Вершина пирамиды O — есть вершина

Метод броуновской функции. Математической моделью таких фракталов является фрактальная (обобщенная) броуновская функция $L(\mathbf{x})$ [8] — вещественная случайная функция, такая что для всех \mathbf{x} и $\Delta\mathbf{x}$ существует значение h , при котором выполняется равенство

$$P\left\{\left[\frac{L(\mathbf{x} + \Delta\mathbf{x}) - L(\mathbf{x})}{\|\Delta\mathbf{x}\|^h}\right] < t\right\} = F(t),$$

где \mathbf{x} — точка в n -мерном евклидовом пространстве \mathbf{R}^n , $\Delta\mathbf{x}$ — расстояние между элементами изображения, $F(t)$ — функция распределения случайной величины t .

Функция $F(t)$ описывает нормальное распределение с нулевым математическим ожиданием и дисперсией σ^2 . Обобщение броуновской функции состоит в том, что вместо $1/2$ вводится действительный параметр h — некоторая постоянная, диапазон изменения которой $[0,1]$. Оценка D определяется выражением (1) при $K=3$. Изображение рассматривается как двумерная функция яркости $L(\mathbf{x})$, определенная для $\mathbf{x}=(x,y) \in \mathbf{R}^2$, формирующая трехмерную поверхность. Для вычисления h необходимо получить оценку линейной выборочной регрессии логарифма математического ожидания модуля разностей яркостей всех пар элементов, находящихся на определенном расстоянии $\Delta\mathbf{x}$, от логарифма этого расстояния. Расстояния объединяются в кластеры, и математические ожидания вычисляются для каждого кластера. В табл. 3 приведены значения МФР для оценки размера фрактала по методу броуновской функции для окна размером 16×16 элементов.

Таблица 3

h	Мера Фишера при h								
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0,1	0	1,86	2,08	2,92	3,83	4,51	4,61	5,81	6,52
0,2		0	0,19	1,01	1,7	2,32	2,49	3,65	4,26
0,3			0	0,83	1,51	2,13	2,3	3,49	4,09
0,4				0	0,59	1,2	1,4	2,58	3,16
0,5					0	0,67	0,92	2,25	2,89
0,6						0	0,28	1,65	2,28
0,7							0	1,32	1,91
0,8								0	0,53
0,9									0

На основании выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

— эффективность метода броуновской функции может быть повышена за счет НЧ-фильтрации оценки размера фрактала;

— оценку размера фрактала можно производить, учитывая изменения яркости только по строкам или только по столбцам, что позволит повысить эффективность сегментации аннотированных текстур;

— метод броуновской функции обладает наибольшей эффективностью по сравнению с рассмотренными выше методами.

Синтез цветных фрактальных текстур. Задача синтеза текстур возникает при создании образцов цветных текстур для проверки эффективности построения системы признаков и алгоритмов сегментации текстур. Цветные фракталы формируются в пространстве LSH. Синтез яркостного компонента цветной фрактальной текстуры осуществлен на основе двух алгоритмов: синтеза гауссово-марковских полей, программа которого представлена в работе [9], и алгоритма последовательных случайных сложений, предложенного Фоссом [10]. Наряду с синтезированными фракталами использованы текстуры из альбома Бродатца [11]. Алгоритм синтеза построен в соответствии с законом обобщенного броуновского движения, при котором

дисперсия разностей яркостей элементов, отстоящих на заданном расстоянии Δx друг от друга, подчиняется соотношению

$$\sigma^2 = \|\Delta x\|^{2h} \sigma_0^2,$$

где σ_0^2 — начальная дисперсия случайных сложений, $\|\Delta x\|$ — норма вектора расстояния.

Синтез яркостного компонента изображения производится по сетке с шагом $s=(x,y)$, $0 \leq x,y \leq M$, при использовании датчика случайных чисел, распределенных по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и дисперсией, изменяемой на каждом шаге в соответствии с формулой

$$\sigma_j^2 = r^{2jh}, \quad (3)$$

где $r = 1/\sqrt{2}$ — масштабный коэффициент изменения расстояния между предыдущими и последующими отсчетами; j — номер шага; фрактальная размерность при этом $D = 3 - h$.

Синтез яркостного компонента производится в последовательности, представленной на рис. 2 в виде матрицы элементов изображения фрактала, цифры указывают номер шага алгоритма синтеза.

0.1	3.1	2.1	3.1	1.1	3.1	2.1	3.1	0.1
3.1	2.2	3.1	2.2	3.1	2.2	3.1	2.2	3.1
2.1	3.1	1.2	3.1	2.1	3.1	1.2	3.1	2.1
3.1	2.2	3.1	2.2	3.1	2.2	3.1	2.2	3.1
1.1	3.1	2.1	3.1	0.2	3.1	2.1	3.1	1.1
3.1	2.2	3.1	2.2	3.1	2.2	3.1	2.2	3.1
2.1	3.1	1.2	3.1	2.1	3.1	1.2	3.1	2.1
3.1	2.2	3.1	2.2	3.1	2.2	3.1	2.2	3.1
0.1	3.1	2.1	3.1	1.1	3.1	2.1	3.1	0.1

Рис. 2

Алгоритм синтеза фрактала.

Шаг 0. 0.1. Исходные значения яркостного компонента в элементах с координатами $(0,0)$, $(0,M)$, $(M,0)$, (M,M) задаются равными нулю:

$$L(0,0) = 0; L(0,M) = 0; L(M,0) = 0; L(M,M) = 0.$$

0.2. Значение яркостного компонента в элементе с координатами $(M/2, M/2)$ выбирается как случайное число, распределенное по нормальному закону с математическим ожиданием, равным нулю, и СКО $\sigma_0=1$: $L(M/2, M/2) = n(0,1)$.

Шаг 1. 1.1. Вычисляются значения яркостного компонента на границах области изображения в элементах с координатами $(0, M/2)$, $(M/2, 0)$, $(M/2, M)$, $(M, M/2)$ как среднее арифметическое значений яркостного компонента в двух ближайших узлах матрицы, например:

$$L(0, M/2) = (L(0,0) + L(0,M))/2.$$

В результате вычислений четыре области размером $(M/2) \times (M/2)$ определены четырьмя узловыми точками.

1.2. Для каждой области вычисляются значения яркостного компонента в ее центре как среднее арифметическое яркостей, например:

$$L(M/4, M/4) = (L(0,0) + L(M/2,0) + L(M/2, M/2) + L(0, M/2))/4.$$

1.3. К каждому из вычисленных на шагах 0 и 1 значений яркости прибавляется случайное число $n(0, \sigma_1)$, СКО вычисляется в соответствии с уравнением (3).

Шаг 2. 2.1. Число областей, заданных своими узловыми точками, увеличивается в 4 раза. Для каждой области вычисляются значения яркостного компонента на ее границах как среднее арифметическое значений яркостного компонента в двух ближайших узлах.

2.2. Для каждой области вычисляются значения яркостного компонента в ее центре как среднее арифметическое яркостей в узлах области.

2.3. К каждому из вычисленных на шагах 0—2 значений яркости прибавляется случайное число $n(0, \sigma_2)$.

Последующие *шаги* $[3, \log_2 M]$ выполняются так же как и шаг 2, число определенных областей при этом увеличивается в 4 раза. После выполнения последнего шага все элементы изображения оказываются заданными.

Поскольку в реальных изображениях компонент насыщенности S оказывается коррелированным с негативом яркости, то в соответствии с физическими представлениями этот компонент определяется как некоторое взвешенное значение негатива яркостного компонента:

$$S(\mathbf{x}) = \alpha(2^q - 1 - L(\mathbf{x})),$$

где α — вещественный коэффициент $[0, 1]$.

Компонент тона H формируется как реализация случайного нормального процесса $n(m, \sigma)$ с математическим ожиданием и СКО, определяющими тоновые характеристики синтезируемого фрактала.

Экспериментальные исследования. Выполнены экспериментальные исследования по оценке эффективности алгоритмов сегментации цветных текстурных изображений с использованием как синтезированных текстур, так и реальных изображений. На рис. 3 приведены примеры сегментации цветных текстур по компоненту тона и по яркости в соответствии с модифицированным методом броуновской функции: показаны тестовые изображения, полученные наложением текстур по маске (рис. 3, *г*); синтезированные фрактальные текстуры, имеющие разные и одинаковые цветовые характеристики (рис. 3, *а*), реальные текстуры из альбома Бродатца [11] (рис. 3, *б*), текстуры синтезированных гауссово-марковских полей (рис. 3, *в*).

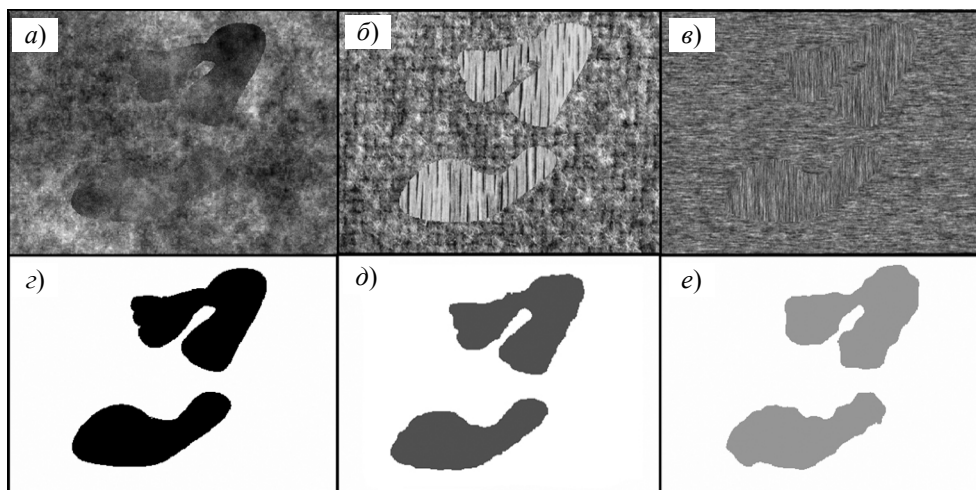


Рис. 3

При отличии по цвету текстуры могут быть успешно разделены на основе простого алгоритма: преобразование пространства RGB в пространство LSH и пороговое ограничение по гистограмме тонового компонента.

При сегментации по тоновому компоненту текстур коричневого и синего тона получены точные маски областей текстур. Однако когда текстуры имеют близкие цветовые характеристики,

для различения текстур необходимо в пространство признаков включать пространственные характеристики. На рис. 3, *д*, *е* представлены результаты сегментации текстур, приведенных на рис. 3, *б*, *в* соответственно.

Выводы. Исследования по сегментации цветных текстур проведены на основе объединения их цветовых и фрактальных характеристик при описании текстур в цветовом координатном пространстве LSH. Исследования выполнены на синтезированных цветных текстурах и на природных текстурах.

Сравнительный анализ трех методов сегментации текстур, построенных на оценке размера фрактала, показал, что метод броуновской функции более эффективен, чем другие исследованные методы. Оценку размера фрактала можно производить, используя изменения модуля разности яркостей элементов изображения в направлениях только по строкам, только по столбцам или только в диагональных направлениях для улучшения сегментации анизотропных текстур. Эффективность сегментации повышается благодаря НЧ-фильтрации оценки размера фрактала. Использование признаков цветности и фрактальных характеристик позволяет уменьшить ошибки сегментации. Оценка размера фрактала вызывает дополнительные ошибки при вычислении тангенса угла наклона линии выборочной регрессии. Для сегментации можно использовать характеристики, по которым вычисляется размер фрактала, поскольку задача состоит в различении текстур, а не в оценке размера фрактала этих текстур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Харалик Р. М. Статистический и структурный подходы к описанию текстур // ТИИЭР. 1979. Т. 67, № 5. С. 98—120.
2. Lovejoy S. Area-perimeter relation for rain and cloud areas // Science. 1982. Vol. 216. P. 185.
3. Lam N. S-N. Description and measurement of landsat TM images using fractals // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1990. N 2. P. 187—195.
4. Фисенко В. Т., Фисенко Т. Ю. Метод автоматического анализа цветных изображений // Оптич. журн. 2003. Т. 70, № 9. С. 18—23.
5. Корн Г., Корн Т. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.
6. Jaggi S., Quattrochi D., Lam N. Multiresolution processing for fractal analysis of airborne remotely sensed data // Proc. of Intern. Conf. "AeroSpace 92", Orlando, USA, April 1992.
7. Потапов А. А. Новейшие методы обработки изображений. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 496 с.
8. Yokoya N., Yamamoto K., Funakubo N. Fractal-based analysis and interpolation of 3D natural surface shapes and their application to terrain modeling // Computer Vision Graphics Image Processing. 1989. Vol. 46. P. 284—302.
9. Аристархов Ю. Н., Вальшиков В. И., Горьян И. С., Фисенко В. Т. Определение эффективности работы контурных операторов // Техника средств связи. Сер. Техника телевидения. 1985. Вып. 1. С. 51—59.
10. Федер Е. Фракталы. М.: Мир, 1991. 259 с.
11. Brodatz P. A Photographic Album for Artists and Designers. N. Y.: Dover, 1966.

Сведения об авторах

- Валерий Трофимович Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Филиал ОАО «Корпорация „Комета“» — НПЦ оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; директор; E-mail: valery@eoss.ru
- Татьяна Юрьевна Фисенко** — канд. техн. наук, доцент; Филиал ОАО «Корпорация „Комета“» — НПЦ оптоэлектронных комплексов наблюдения, Санкт-Петербург; E-mail: tatiana@eoss.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной фотоники
и видеоинформатики СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию
26.04.12 г.

ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

УДК 536.629.7

Н. В. Пилипенко, Г. В. Польщиков, И. А. Сиваков

УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СЕНСОРОВ ТЕПЛООВОГО ПОТОКА

Представлена конструкция стенда для задания нестационарного теплового потока и измерения динамических характеристик датчиков. Приведены результаты эксперимента, показывающие возможность применения батарейного приемника теплового потока (датчика Геращенко) в нестационарной теплотометрии.

Ключевые слова: нестационарная теплотометрия, датчик Геращенко, обратная задача теплопроводности, параметрическая идентификация.

Решение задач прикладной теплотометрии для таких отраслей науки и техники, как теплоэнергетика, металлургия, авиа-, судо- и ракетостроение, мощное приборостроение и пр., определяет дальнейший потенциал их развития. В некоторых практически важных случаях интерес представляет исследование переходных процессов в изучаемых объектах, когда измерения постоянных или переменных во времени плотностей тепловых потоков выполняются в нестационарном режиме работы приемников теплового потока (ППП).

Один из интенсивно развивающихся в последние 30—40 лет подходов к этой проблеме — использование методов решения обратных задач теплопроводности (ОЗТ) и различных алгоритмов оптимизации. Особенности данного подхода являются расчетное определение (восстановление) теплового потока по измеряемым температурам в отдельных точках ППП и возможность определения температур, которые по каким-либо причинам нельзя непосредственно измерить, уточнение глубин заделки термопар, начальных распределений температур и др.

Существуют различные методы решения обратных задач. Выбор наиболее универсального, помехозащищенного и вычислительно эффективного метода решения для определенного класса задач является достаточно сложной проблемой.

В работах Д. Ф. Симбирского, А. В. Олейника, Н. В. Пилипенко, Дж. Бека и других авторов предложено использовать рекуррентные (последовательные) методы параметрической идентификации, базирующиеся, в частности, на модифицированном алгоритме цифрового фильтра Калмана. Изначально разработанные для использования в измерительных системах реального времени, данные методы доказали свою эффективность при решении ряда граничных задач для различных типов ППП [1, 2]. Оценка возможностей подхода на основе решения обратных задач теплопроводности показала [3—5], что его применение позволяет получить приемлемые для практики результаты.

В настоящей статье рассматривается метод восстановления нестационарного теплового потока на основе параметрической идентификации модели теплопереноса в ППП, представлена конструкция разработанной установки для задания нестационарных тепловых потоков и определения динамических характеристик ППП, а также приведены результаты эксперимента по восстановлению плотности теплового потока с использованием тепломера Геращенко.

Рассмотрим кратко способ получения оптимальных оценок теплового потока $q(\tau)$. Динамика тепловых процессов в общем случае описывается одним или несколькими параболическими уравнениями в частных производных с соответствующими граничными условиями и представляется в виде температурного поля в некоторой многосвязной области. Процесс теплопереноса в ПТП может быть описан с использованием дифференциально-разностной модели (ДРМ), которая в общем случае имеет следующий вид [1, 2]:

$$\frac{d}{d\tau} \mathbf{T}(\tau) = F\mathbf{T}(\tau) + G\mathbf{U}(\tau),$$

где F — $n \times n$ -матрица обратных связей, G — $n \times 2$ -матрица управления; вектор управления $\mathbf{U}(\tau)$, в частности для условий 2-го рода на торцах ПТП, определяется как $\mathbf{U}(\tau) = [q_1(\tau) \quad q_2(\tau)]^T$.

Тепловая схема, подробный вывод и топология ДРМ батарейного ПТП, а также структура матриц управления и обратных связей приведены в работе [6].

В приемниках теплового потока измерению подлежат либо температуры в отдельных точках, либо их разности, либо среднеобъемные температуры, что отражено в $m \times n$ -матрице измерений D универсальной модели измерений:

$$\mathbf{Y}_k = D\mathbf{T}_k + \boldsymbol{\varepsilon}_k,$$

где \mathbf{Y}_k — $m \times 1$ -вектор измерений в k -й момент времени, $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ — $m \times 1$ -вектор случайных погрешностей измерений температур.

Искомый тепловой поток задается уравнением [4]

$$q(\tau) = \sum_{j=1}^r q_j \varphi_j(\tau),$$

где $\varphi_j(\tau)$ — система базисных функций времени; q_j — априори неизвестные коэффициенты, которые объединяются в $r \times 1$ -вектор искомых параметров $\mathbf{Q}_z = [q_1 \quad q_2 \quad \dots \quad q_r]^T$.

В качестве базисной функции используются В-сплайны 1-го порядка.

Такую аппроксимацию $q(\tau)$ называют параметризацией ОЗТ. Тогда задача восстановления $q(\tau)$ сводится к последовательному получению оптимальных оценок $\hat{\mathbf{Q}}_{z,l}$ вектора искомых параметров \mathbf{Q}_z путем минимизации по \mathbf{Q}_z квадратичной функции невязки:

$$\Phi(\mathbf{Q}_z) = \sum_{k=1}^l (\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q}_z))^T R^{-1} (\mathbf{Y}_k - \hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q}_z)),$$

где $\hat{\mathbf{Y}}_k(\mathbf{Q}_z)$ — модельный вектор измерений, являющийся аналогом вектора \mathbf{Y}_k и рассчитываемый по ДРМ теплопереноса в ПТП для различных значений вектора \mathbf{Q}_z ; R — ковариационная $m \times m$ -матрица вектора $\boldsymbol{\varepsilon}_k$ случайных погрешностей.

Для получения оптимальных оценок \mathbf{Q}_{k+1} вектора искомых параметров \mathbf{Q}_z в $(k+1)$ -й момент времени используется рекуррентный алгоритм фильтра Калмана по искомым параметрам [3—5]:

$$\mathbf{Q}_{k+1} = \hat{\mathbf{Q}}_k + K_{k+1} [\mathbf{Y}_{k+1} - \hat{\mathbf{Y}}_{k+1}(\hat{\mathbf{Q}}_k)],$$

$$K_{k+1} = P_k H_k^T (H_k P_k H_k^T + R)^{-1}, \quad P_{k+1} = P_k - K_{k+1} H_k P_k,$$

где P_k, P_{k+1} — ковариационные матрицы погрешностей оценок параметров для моментов времени $\tau_k = k\Delta\tau$ и $\tau_{k+1} = (k+1)\Delta\tau$; H_k — матрица коэффициентов чувствительности изме-

ряемой температуры ПТП к изменению искомым параметров в момент времени τ_{k+1} ; K_k — весовая матрица.

Теоретическая возможность использования высокоинерционных датчиков при исследовании быстропротекающих процессов показана в работе [6], однако полученные в ней результаты требуют экспериментальной проверки.

В качестве объекта исследования был выбран батарейный ПТП (тепломер Геращенко) как наиболее распространенный и обладающий рядом положительных характеристик. Для оценки возможности применения батарейных ПТП в нестационарной теплотрии была создана установка для задания нестационарного потока, структурная схема которой приведена на рис. 1.

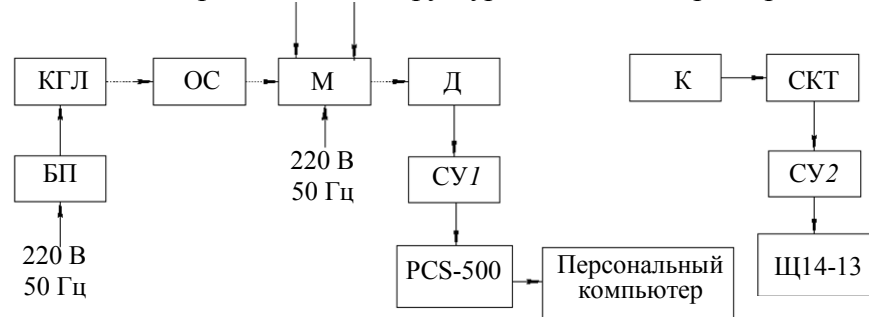


Рис. 1

В качестве излучателя использовалась галогенная лампа типа КГЛ-100-12V с оптической системой (ОС) в виде эллиптического отражателя. Использование такого отражателя позволяет сфокусировать на объекте значительно большую часть излучаемой лампой мощности по сравнению с линзовыми конденсорами. Питание лампы осуществлялось через трансформаторный блок (БП). Между оптической системой и исследуемым датчиком (Д) располагался модулятор (М), используемый при проведении испытаний с модулированным потоком излучения. Согласующий усилитель (СУ1) обеспечивает работу датчика, сигнал которого регистрируется компьютерным цифровым осциллографом типа PCS500 фирмы “Velleman” (Бельгия).

Так как спектр излучения лампы находится в широком спектральном диапазоне (от ультрафиолетового до дальнего инфракрасного), а пучок излучения, формируемый эллиптическим отражателем, имеет сложную пространственную структуру, то измерить тепловой поток лампы в плоскости исследуемого датчика стандартными средствами не представляется возможным. Поэтому был разработан и изготовлен калориметр (К) с квазиобъемным поглотителем и апертурной зеркальной диафрагмой. Конструктивная схема калориметра приведена на рис. 2.

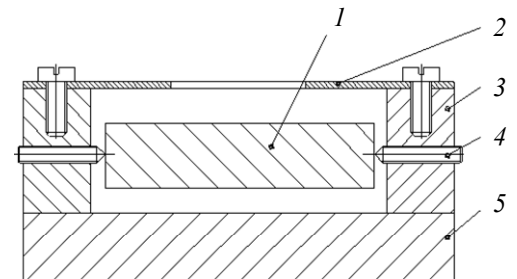


Рис. 2

Измерительное ядро 1 калориметра, представляющее собой алюминиевую пластинку, на одну сторону которой нанесено поглощающее покрытие (остальные грани ядра свободны), закреплено с помощью двух кернов 4 с большим тепловым сопротивлением относительно боковых стоек 3, жестко установленных на основании 5. Коэффициент отражения внутренних поверхностей всех деталей составляет не менее 0,95. Зеркальная диафрагма 2 формирует входной зрачок калориметра $10 \times 10 \text{ мм}^2$. Для уменьшения тепловых потерь за счет конвективных потоков расстояние между конструктивными элементами не превышает 2—3 мм.

Для обеспечения эффективного поглощения излучения во всем спектральном диапазоне использовалось комбинированное поглощающее покрытие. Первоначально наносилось глубокое аноксовое покрытие, а затем наносился лак Паркинсона с медленной сушкой в малом свободном объеме. Эффективность такого покрытия характеризуется коэффициентом поглощения 0,98—0,99.

Система контроля температуры (СКТ) — см. рис. 1 — содержит медьконстантановые термопары. Согласующий усилитель (СУ2) позволяет использовать для регистрации сигнала термопар любой вольтметр постоянного тока; в данном случае выбран вольтметр Щ14-13.

Галогенная лампа, эллиптический отражатель и модулятор потока излучения конструктивно объединены в блок излучателя, общий вид которого показан на рис. 3. Основанием блока служит алюминиевая плита 1, обеспечивающая жесткость всей конструкции. На оси 3 расположен двухлопастной диск модулятора 2, который приводится во вращение синхронным двигателем типа Г32. На оси двигателя установлен шкив, обеспечивающий различные скорости вращения диска модулятора. Частота модуляции (от 0,1 до 10 Гц) зависит от количества оборотов двигателя, количества лопастей модулятора и диаметра шкива двигателя.

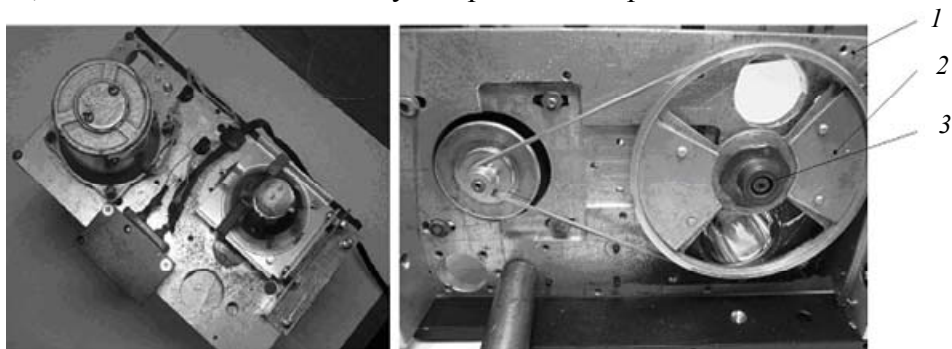


Рис. 3

При разработке электрической схемы установки учитывалось влияние помех, шумов и температурного дрейфа всех ее элементов. При этом в первом каскаде использовались операционный усилитель с автоматической балансировкой начального смещения и малым уровнем шума, система гальванической развязки для снижения уровня помех, а также дополнительный каскад усиления.

После сборки и юстировки установки с помощью калориметра определялась плотность теплового потока, выполнялась стабилизация галогенной лампы в течение длительного времени, после чего проводилась 20-секундная экспозиция входного окна калориметра и записывалась динамика изменения температуры ядра. На основе полученных данных установлено, что плотность теплового потока, генерируемого галогенной лампой, составляет порядка $q_0 = 6 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$.

Так как форма модуляции близка к синусоидальному виду, можно считать, что при включенном модуляторе действующий тепловой поток определяется соотношением $q(\tau) = 0,5q_0(1 + \sin \omega\tau)$, где ω — частота вращения диска модулятора.

В ходе испытаний плоскость установки приемника теплового потока совмещалась с плоскостью, в которой находилась диафрагма калориметра, проводилась юстировка ПТП относительно светового пятна излучателя и определялась постоянная времени датчика — в рассматриваемом случае равная примерно 5 с. В ходе эксперимента фиксировалось изменение перегрева (ΔT) по толщине батарейного ПТП во времени. Затем датчик подвергался воздействию модулированного лучистого потока того же источника при различных частотах модуляции. Между экспериментами выдерживалась пауза, достаточная для остывания датчика и конструктивных элементов установки.

Полученные экспериментальные результаты сохранялись в компьютере, после чего производилась их обработка с помощью программного комплекса “Heat Flow”, разработанного на кафедре компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. На рис. 4, а, б соответственно в виде графиков зависимостей $\Delta T(\tau)$ и $q(\tau)$ приведены результаты эксперимента по восстановлению плотности теплового потока,

изменяющегося с частотой 2 Гц, с использованием батарейного приемника теплового потока с постоянной времени порядка 5 с.

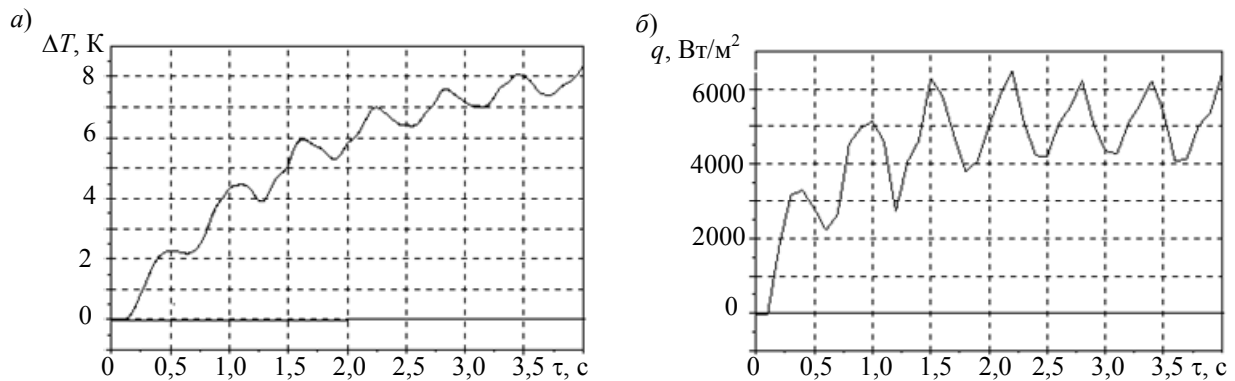


Рис. 4

Проведенные экспериментальные исследования батарейного датчика показали возможность его использования в нестационарной теплотрии. Согласно полученным результатам предложенный метод параметрической идентификации при восстановлении плотности теплового потока позволяет существенно расширить возможности некоторых видов датчиков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пилипенко Н. В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотрии. Часть 1 // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т. 46, № 8. С. 50—54.
2. Пилипенко Н. В. Методы параметрической идентификации в нестационарной теплотрии. Часть 2 // Там же. 2003. Т. 46, № 10. С. 67—71.
3. Кириллов К. В., Пилипенко Н. В. Алгоритмы программ для решения прямых и обратных задач теплопроводности при использовании дифференциально-разностных моделей // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2010. № 5. С. 106—110.
4. Пилипенко Н. В., Сиваков И. А. Метод определения нестационарного теплового потока и теплопроводности путем параметрической идентификации // Измерительная техника. 2011. № 3. С. 48—51.
5. Pilipenko N. V., Sivakov I. A. A method of determining nonstationary heat flux and heat conduction using parametric identification // Measurement Techniques. 2011. Vol. 54, N 3. P. 318—323.
6. Пилипенко Н. В., Лазуренко Н. В., Лебедев П. В. Параметрическая идентификация нестационарных тепловых потоков с помощью тепломера типа „вспомогательная стенка“ // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 9. С. 47—51.

Сведения об авторах

Николай Васильевич Пилипенко

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: Pilipenko38@mail.ru

Георгий Владимирович Польщиков

— канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: polschikov@list.ru

Иван Анатольевич Сиваков

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: I.A.Sivakov@gmail.com; SivakovIA@mail.ru

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергофизического мониторинга

Поступила в редакцию
04.05.12 г.

Ю. В. БАЁВА, С. И. ХАНКОВ

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТИ ТЕЛЕСКОПА ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ЗА СЧЕТ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ БЛЕНДЫ

Обсуждается проблема обеспечения термостабильности телескопов космического базирования для наблюдения за Землей. Введено понятие фоновой температуры на входном зрачке телескопа, которая характеризует степень отклонения его теплового баланса от начального, реализуемого в дежурном режиме при закрытой крышке на входном зрачке. Получены формулы для расчета зависимости требуемой рабочей температуры бленды от заданной фоновой температуры на входном зрачке телескопа и от отношения длины бленды к диаметру входного зрачка.

Ключевые слова: космический телескоп, бленда, коэффициент облученности, тепловой режим, теплообмен излучением.

Для поддержания термостабильности телескопа дистанционного зондирования Земли после открытия крышки на входном зрачке необходимо обеспечить минимальное искажение начального теплового баланса.

При формировании тепловой модели телескопа введем следующие ограничения:

- непрерывное наблюдение осуществляется в направлении центра Земли, в случае использования сканирования такая ситуация будет отражать среднее положение телескопа;
- телескоп находится в замкнутом термостатированном объеме и все процессы теплообмена, способные вызвать изменения его теплового режима и возникновение термоаббераций, могут осуществляться только через входной зрачок;
- прямое солнечное излучение не попадает в полость бленды и тем более во входной зрачок телескопа;
- засветки Солнца снаружи бленды не вызывают ее нагрева, поскольку парируются системой термостатирования и высоким коэффициентом отражения ее поверхности; представляет интерес особый случай, когда поглощаемая наружной поверхностью бленды мощность солнечного излучения сама может использоваться для управления температурным уровнем.

Тепловая модель не имеет ограничений, связанных с рабочим спектральным диапазоном телескопа. Она применима для случая наблюдения как за частью поверхности Земли, подсвеченной Солнцем, так и за теневой частью поверхности Земли.

Если ось входного зрачка телескопа направлена на Землю, реализуется осесимметричная модель вложенных конусов, ограничивающих наблюдаемые с плоскости зрачка элементы внешней среды. Внутренним конусом ограничивается телесный угол ω , в пределах которого входной зрачок принимает излучение Земли. Средний конус содержит телесный угол, образованный внешним срезом цилиндрической бленды, в пределах этого угла осуществляется теплоотдача с входного зрачка в холодный космос за вычетом внутреннего телесного угла ω , в пределах которого видна Земля. Внешний телесный угол ограничен предельным углом 2τ за вычетом телесного угла ξ , в пределах которого осуществляется теплообмен входного зрачка с блендой.

При исследовании теплового баланса на входном зрачке телескопа использовались данные по всем компонентам баланса, приведенные в работе [1].

Уравнение стационарного теплового баланса на входном зрачке телескопа можно записать следующим образом:

$$Q_m \varphi_0 \varepsilon + \alpha_s \varphi_k A E = \frac{\xi - \omega}{2\pi} \varepsilon \sigma T_w^4 + \frac{2\pi - \xi}{2\pi} \varepsilon \sigma (T_w^4 - T_b^4), \quad (1)$$

где $Q_m = 235 \text{ Вт/м}^2$ — максимальный удельный тепловой поток, излучаемый поверхностью Земли; φ_0 — коэффициент облученности Землей горизонтальной площадки, лежащей в плоскости местного горизонта, которая может быть представлена как плоскость входного зрачка телескопа при наблюдении в надири; ε — степень черноты входного зрачка; α_s — коэффициент поглощения солнечного излучения поверхностью входного зрачка; φ_k — комбинированный коэффициент облученности, учитывающий отраженное Землей солнечное излучение; A — альбедо Бонда; $E = 1366 \text{ Вт/м}^2$ — солнечная постоянная; $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}^4$ — постоянная Стефана — Больцмана; T_w — фоновая температура на входном зрачке, определяющая приращение результирующего теплового потока; T_b — температура бленды.

Решение уравнения (1) относительно температуры T_w можно представить в следующем виде:

$$T_w = \sqrt[4]{\frac{\theta_p \varphi_0 (1+U) + (1-\xi') T_b^4}{1-\omega'}} = T_e^* \sqrt[4]{\frac{1+U + (1-\xi') \theta_m}{1-\omega'}}; \quad (2)$$

$$\theta_p = \frac{Q_m}{\sigma} = 41,45 \cdot 10^8 \text{ К}^4; \quad \xi' = \frac{\xi}{2\pi}; \quad \omega' = \frac{\omega}{2\pi}; \quad U = U_0 n_s \frac{\varphi_k}{\varphi_0}; \quad U_0 = \frac{AE}{Q_m} = 1,74; \quad n_s = \frac{\alpha_s}{\varepsilon};$$

$$T_e^* = \sqrt[4]{\frac{Q_m}{\sigma} \varphi_0} = T_e \sqrt[4]{\varphi_0}; \quad T_e = \sqrt[4]{\theta_p} = 254 \text{ К}; \quad \theta_m = \frac{T_b^4}{\theta_p \varphi_0} = \frac{1}{\varphi_0} \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^4,$$

где T_e — эффективная температура Земли, т.е. температура, соответствующая равновесному тепловому состоянию планеты с абсолютно черной поверхностью; T_e^* — условный температурный фон на высоте h орбиты телескопа над поверхностью Земли, обусловленный ее собственным тепловым излучением.

Выражения для телесных углов нетрудно определить через соответствующие геометрические параметры, в результате получим

$$1 - \xi' = (1 + \rho^2)^{-0,5} = b; \quad \rho = r/H; \quad 1 - \omega' = \sqrt{1 - \varphi_0}; \quad \varphi_0 = (1 + a)^{-2}; \quad a = h/R,$$

где H — высота бленды; r — радиус входного зрачка телескопа; R — радиус Земли.

В результате формула (2) может быть преобразована к виду

$$T_w = T_e \sqrt[4]{\frac{\varphi_0 (1+U) + b \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^4}{\sqrt{1 - \varphi_0}}} = T_e \left[k(1+U) + \frac{1}{\psi} \left(\frac{T_b}{T_e} \right)^4 \right]^{0,25}; \quad (3)$$

$$k = \frac{\varphi_0}{\sqrt{1 - \varphi_0}}; \quad \psi = \sqrt{(1 + \rho^2)(1 - \varphi_0)},$$

здесь коэффициент $b = (1 + \rho^2)^{-0,5}$ характеризует относительную длину бленды.

Для практических расчетов представляет интерес получение на основе формулы (3) обратной зависимости T_b от T_w , которая позволит оценить требования к температуре бленды для сохранения начальной температуры фона на входном зрачке телескопа:

$$T_b = T_w \psi^{0,25} [1 - kN(1+U)]^{0,25}; \quad N = \left(\frac{T_e}{T_w} \right)^4. \quad (4)$$

На высоте геостационарной орбиты 40 000 км коэффициент облученности входного зрачка как плоской площадки равен $\varphi_0 = 0,0189$, а телесный угол, в пределах которого видна Земля, $\omega = 0,06$ ср. При условии $T_w > T_e$ в формуле (4) можно пренебречь произведением с малой величиной k , поскольку коэффициент φ_0 мал. Тогда в случае наблюдения за теневой поверхностью Земли ($U = U_0 = 0$) соотношение (4) упрощается:

$$T_b = T_w \sqrt[4]{\psi} = T_w (1 + \rho^2)^{0,125}. \quad (5)$$

Из выражения (5) следует, что для высокоорбитальных систем температура бленды должна быть выше фоновой температуры, равной рабочей температуре телескопа.

Предельная длина бленды, при которой через нее видна Земля в ее полном размере (при $\omega = \xi$), определяется из соотношения

$$H = r \sqrt{2a + a^2}.$$

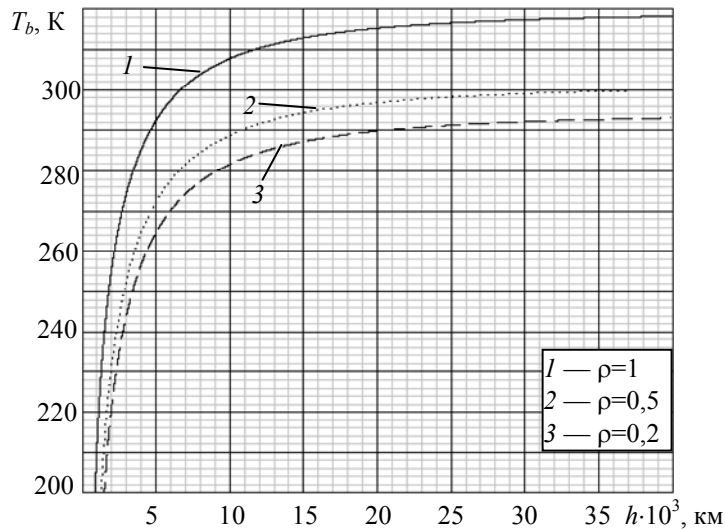
Для геостационарной орбиты $a = 5,9$, откуда при $r = 0,1$ м длина бленды, сквозь которую видна только поверхность Земли, должна быть равна $H = 0,68$ м. При этом $\rho = 0,147$, и при $T_w = 293$ К в соответствии с уравнением (5) можно получить $T_b = 293,8$ К.

Для оценки степени значимости величины U в уравнении (4) можно применить формулу, которая получена с использованием данных монографии [2]:

$$\frac{\varphi_k}{\varphi_0} = \frac{60}{60 + h_0} \cos \zeta \cos \gamma; \quad h_0 = \frac{h}{1000},$$

где высота h_0 задается в тысячах километров; ζ — угол наклона плоскости входного зрачка к плоскости местного горизонта (ранее принято $\zeta = 0$); γ — угол между направлением на Солнце и на центр Земли с вершиной в центре входного зрачка.

На рисунке представлены вычисленные по формуле (5) зависимости требуемой рабочей температуры бленды, обеспечивающей поддержание уровня фоновой температуры $T_w = 293$ К, от высоты орбиты. На участках зависимостей $T_b(T_w)$ ниже уровня 293 К существенное тепловое влияние Земли создает положительное приращение теплового баланса, что требует охлаждения бленды до соответствующих температур, определяемых по графику.



Полученные формулы позволяют произвести быструю оценку значимых параметров, определяющих требования к температуре бленды, обеспечивающей заданную фоновую температуру на входном зрачке телескопа, а также сохранение начального теплового баланса в телескопе. Если телесный угол ω равен нулю, реализуется ситуация, характерная для наблюдения за звездами; в этом случае также можно обеспечить термостабильность телескопа за счет управления температурой бленды, при этом могут быть использованы полученные формулы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Trenberth K. E., Fasullo J. T., Keihl J. Earth's global energy budget // Bull. Amer. Meteorol. Soc. 2009. Vol. 90, N 3, P. 311—323.
2. Каменев А. А., Лаповок Е. В., Ханков С. И. Аналитические методы расчета тепловых режимов и характеристик собственного теплового излучения объектов в околоземном космическом пространстве. СПб: НТЦ им. Л. Т. Тучкова, 2006. 186 с.

Сведения об авторах

- Юлия Валерьевна Байва** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Сергей Иванович Ханков** — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютерной теплофизики и энергофизического мониторинга

Рекомендована кафедрой
компьютерной теплофизики
и энергетического мониторинга

Поступила в редакцию
29.12.12 г.

УДК 621.372.82:621.383.8-752.4:536.7

Е. И. ВАХРАМЕЕВ, К. С. ГАЛЯГИН, А. С. ИВОНИН, М. А. ОШИВАЛОВ

ПРОГНОЗ И КОРРЕКЦИЯ ТЕПЛООВОГО ДРЕЙФА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА

Рассматривается методика алгоритмического прогноза показаний волоконно-оптического гироскопа в условиях внешних тепловых воздействий на датчик чувствительности. Приведено обоснование методики и представлены результаты ее использования для численной коррекции показаний гироскопа в условиях натуральных тепловых испытаний.

Ключевые слова: *волоконно-оптический гироскоп, тепловой дрейф, датчик чувствительности, прогноз, коррекция, расчет, термометрия.*

Одной из множества проблем при создании волоконно-оптических гироскопов (ВОГ) является их подверженность внешним тепловым воздействиям, приводящим к возникновению фиктивной, термически индуцированной „кажущейся“ угловой скорости [1, 2]. Исследования показывают, что причина появления теплового дрейфа угловой скорости ВОГ связана с изменением показателя преломления светопроводящей жилы в условиях нестационарного поля термоупругих напряжений в витках оптического контура (пьезооптический эффект).

В предыдущих работах [3, 4] авторами рассматривалась возможность прямого математического моделирования поведения ВОГ в условиях тепловой нестабильности состояния оптического блока на основе численного решения системы уравнений термофотоупругости. В результате была создана математическая модель, позволяющая достаточно корректно прогнозировать термически индуцированный дрейф показаний ВОГ. Однако применение такой расчетной модели для коррекции показаний гироскопа в условиях реальной его работы оказалось малопригодным в силу чрезвычайно высокой вычислительной трудоемкости процедуры прогноза дрейфа и неоднозначности исходных данных для расчета.

В продолжение исследований теплового дрейфа в настоящей статье предлагается принципиально иной подход к алгоритмическому прогнозу показаний прибора для коррекции теплового смещения ВОГ в реальном масштабе времени по данным натурной термометрии

датчика чувствительности. Для обоснования и иллюстрации предлагаемой методики прогноза используется ранее разработанная численная дифференциальная модель описания показаний неподвижного гироскопа в условиях тепловой нестабильности оптоволоконного контура [4]. В целях сокращения вычислительных затрат используется упрощенный вариант модели, в котором фазовый набег определяется только тепловым удлинением световода и температурной зависимостью показателя преломления волокна без учета эффектов фотоупругости.

Рассмотрим датчик чувствительности ВОГ, представляющий собой цилиндрическую катушку с оптоволоконным контуром, залитым компаундом. Элементы металлического каркаса, обрамляющие оптоволоконный узел, имеют, как правило, более высокие теплопроводящие свойства, поэтому можно пренебречь термическим сопротивлением элементов каркаса и считать наружную поверхность контура расчетной схемой изотермической, температура $t(\tau)$ которой изменяется с течением времени.

Предлагаемая методика прогноза показаний ВОГ основывается на понятии „единичный дрейф“, который представляет собой тарировочную зависимость реакции гироскопа на элементарное тепловое возмущение. Единичный дрейф формируется в виде числового массива значений фиктивной угловой скорости для дискретной последовательности моментов времени с шагом h_k , соответствующих моментам формирования прогноза. Для иллюстрации единичного дрейфа приведем результаты расчета дрейфа по дифференциальной модели при элементарном (тарировочном) тепловом возмущении (δ) чувствительного элемента, когда температура поверхности датчика линейно возрастает на Δt^* за время, соответствующее h_k , после чего остается постоянной (рис. 1, а). При этом темп нагрева в пределах временного интервала $0 < \tau < h_k$ также остается постоянным:

$$T^* = \frac{\Delta t^*}{h_k}.$$

Результаты расчета тарировочного дрейфа при $h_k = 5$ с и $T^* = 0,002$ °C представлены на рис. 1, б.

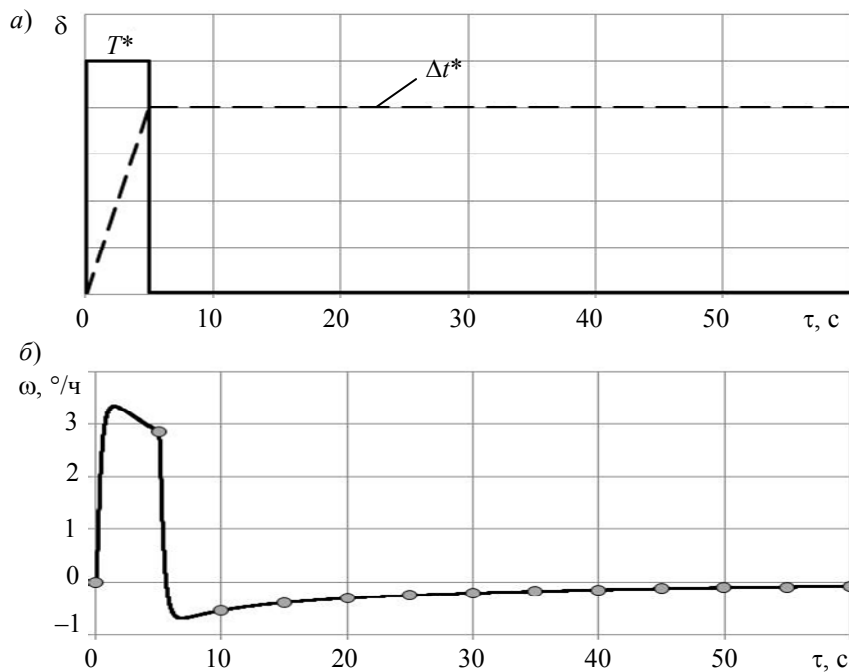


Рис. 1

Как и следовало ожидать, в течение первых 5 с, когда температура датчика линейно возрастает, наблюдается интенсивное смещение показаний гироскопа, а по окончании нагрева дрейф фиктивной угловой скорости ω резко снижается со сменой знака и монотонно затухает в течение длительного времени. Отрицательный дрейф после импульса нагрева объясняется рас-

пространением теплоты внутри оптоволоконного узла, что приводит к изменению его температурного поля даже при постоянной температуре поверхности датчика.

По непрерывной зависимости смещения гироскопа от времени производится выборка дискретных значений угловой скорости с шагом h_k (на рис. 1, б отмечены маркерами), которые формируются в виде массива единичного дрейфа D_k^* , где $k = 1, 2, \dots, N$, N — размер тарировочного массива, принимаемый в соответствии с затуханием дрейфа.

Алгоритм расчетного формирования прогноза на базе единичного дрейфа строится следующим образом. По температуре поверхности оптоволоконного датчика в каждый момент времени путем численного дифференцирования рассчитывается темп ее изменения

$$T_i = \frac{t_i - t_{i-1}}{h_k},$$

где $i = 1, 2, 3 \dots$ — номер разбиения по времени с шагом h_k .

Далее последовательно для каждого момента формируется элементарный прогноз дрейфа, вызванного текущим темпом нагрева T_i , в виде произведения массива единичного дрейфа на относительный темп нагрева:

$$D_i = D_k^* T_i / T^*, \quad k = 1 \dots N.$$

Предварительный прогноз на каждом временном шаге записывается относительно текущего момента. Для получения результирующего значения теплового дрейфа в произвольный момент времени необходимо просуммировать все предыдущие элементарные прогнозы для этого момента. Алгоритм расчета может быть представлен следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} i = 1; \quad D_1^p &= D_1^* \frac{T_1}{T^*}; \\ i = 2; \quad D_2^p &= D_2^* \frac{T_1}{T^*} + D_1^* \frac{T_2}{T^*}; \\ i = 3; \quad D_3^p &= D_3^* \frac{T_1}{T^*} + D_2^* \frac{T_2}{T^*} + D_1^* \frac{T_3}{T^*} \dots \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Таким образом, путем суммирования элементарных прогнозов для N предшествующих моментов времени рассчитывается результирующий тепловой дрейф для каждого момента t_i :

$$D_i^p = \sum_{j=1}^i D_j^* \frac{T_{i-j+1}}{T^*} \quad \text{при } i \leq N; \quad D_i^p = \sum_{j=1}^N D_j^* \frac{T_{i-j+1}}{T^*} \quad \text{при } i > N. \quad (2)$$

Проиллюстрируем данную процедуру прогноза на следующем примере. Рассмотрим ситуацию, когда температура поверхности датчика чувствительности изменяется по закону косинуса в течение 60 с (рис. 2, а). Рассчитанный методом конечно-разностного дифференцирования темп изменения температуры в этот период времени подчиняется синусоидальному распределению. На рис. 2, б приведены результаты расчета теплового дрейфа гироскопа в условиях данного теплового возмущения двумя различными способами: сплошная линия соответствует расчету по дифференциальной модели (высокотрудоёмкой по вычислительным затратам) на основе уравнений термоупругости и пьезооптики; маркерами на графике отмечены результаты прогноза дрейфа с интервалом $h_k = 5$ с, полученные на основе соотношений (2) с использованием массива единичного дрейфа (см. рис. 1, б). Оба варианта расчета дают согласованные результаты, причем не только на участке интенсивного дрейфа, но и на участке затухания дрейфа фиктивной угловой скорости. Небольшие различия результатов связаны

с дискретностью методики прогноза во времени и очевидно будут снижаться при уменьшении величины h_k .

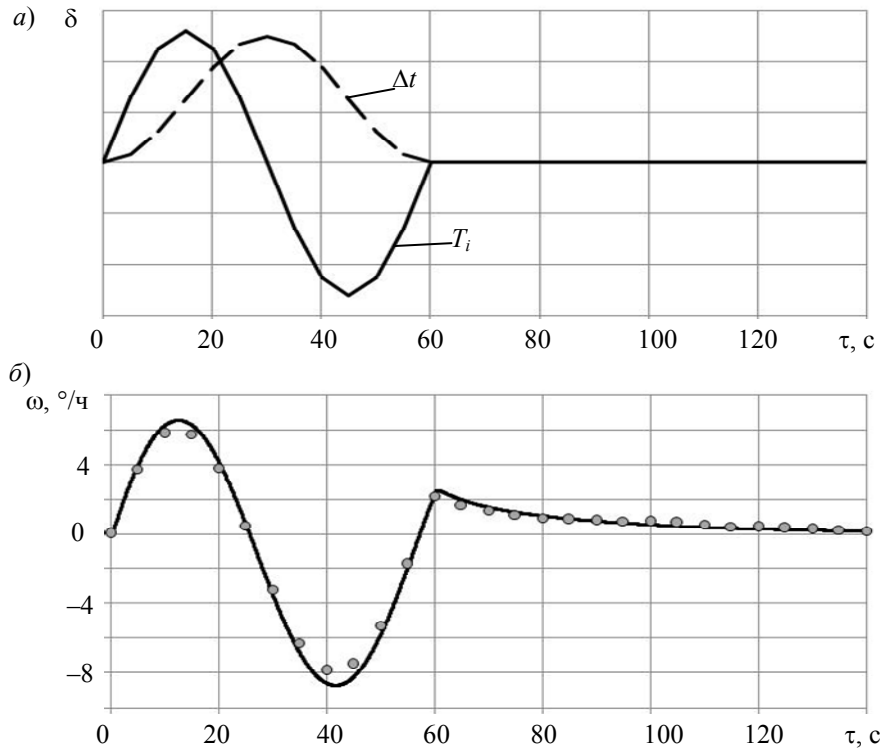


Рис. 2

В рассмотренном примере расчета термическое сопротивление элементов каркаса катушки было принято нулевым. Следует отметить, что предлагаемая методика численного прогноза дрейфа может быть успешно применима и при конечной тепловой проводимости каркаса. В этой ситуации реакция гироскопа на внешнее тепловое возмущение будет происходить с некоторым временным запаздыванием, что естественным образом найдет отражение в характере тарировочного массива единичного дрейфа.

Переходя к вопросу практической реализации алгоритма прогноза, отметим, что применение средств математического моделирования для расчета массива единичного дрейфа малоэффективно в силу недостаточной точности исходных данных для расчета (теплофизических характеристик материалов конструкции, информации о дефектах укладки оптоволоконного контура и т.д.).

В связи с этим предлагается следующий способ формирования единичного дрейфа. На этапе тарировки проводится термоиспытание неподвижного гироскопа с непрерывной синхронной регистрацией дрейфа и температуры поверхности датчика чувствительности. По данным термометрии рассчитывается темп изменения температуры T_i в $2N-1$ последовательных точках с временным шагом h_k . При наличии информации о величине результирующего дрейфа гироскопа D_i^p в эти моменты времени, полученной в ходе натурного испытания прибора, на основе соотношений (2) формируется система линейных алгебраических уравнений N -го порядка относительно элементов массива единичного дрейфа D_j^* . В соответствии с решением этой системы уравнений рассчитывается тарировочный дрейф D_j^* , который в дальнейшем может быть использован для прогноза дрейфа, согласно алгоритму суммирования (2), в реальном масштабе времени работы прибора по данным натурной термометрии.

Очевидно, что в этом случае будут учтены не только физические особенности возникновения термоиндуцированного смещения гироскопа, но и индивидуальные особенности (дефекты) изготовления данного экземпляра оптоволоконного блока.

Рассмотрим результаты практической апробации предложенной методики. На рис. 3, а показана динамика изменения температуры датчика в ходе многочасового циклического теплового испытания образца гироскопа в диапазоне $-40\dots+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. На рис. 3, б представлены результаты конечно-разностного расчета темпа изменения температуры оптического блока, а на рис. 3, в — соответствующая запись показаний угловой скорости неподвижного гироскопа, обработанная скользящим числовым фильтром.

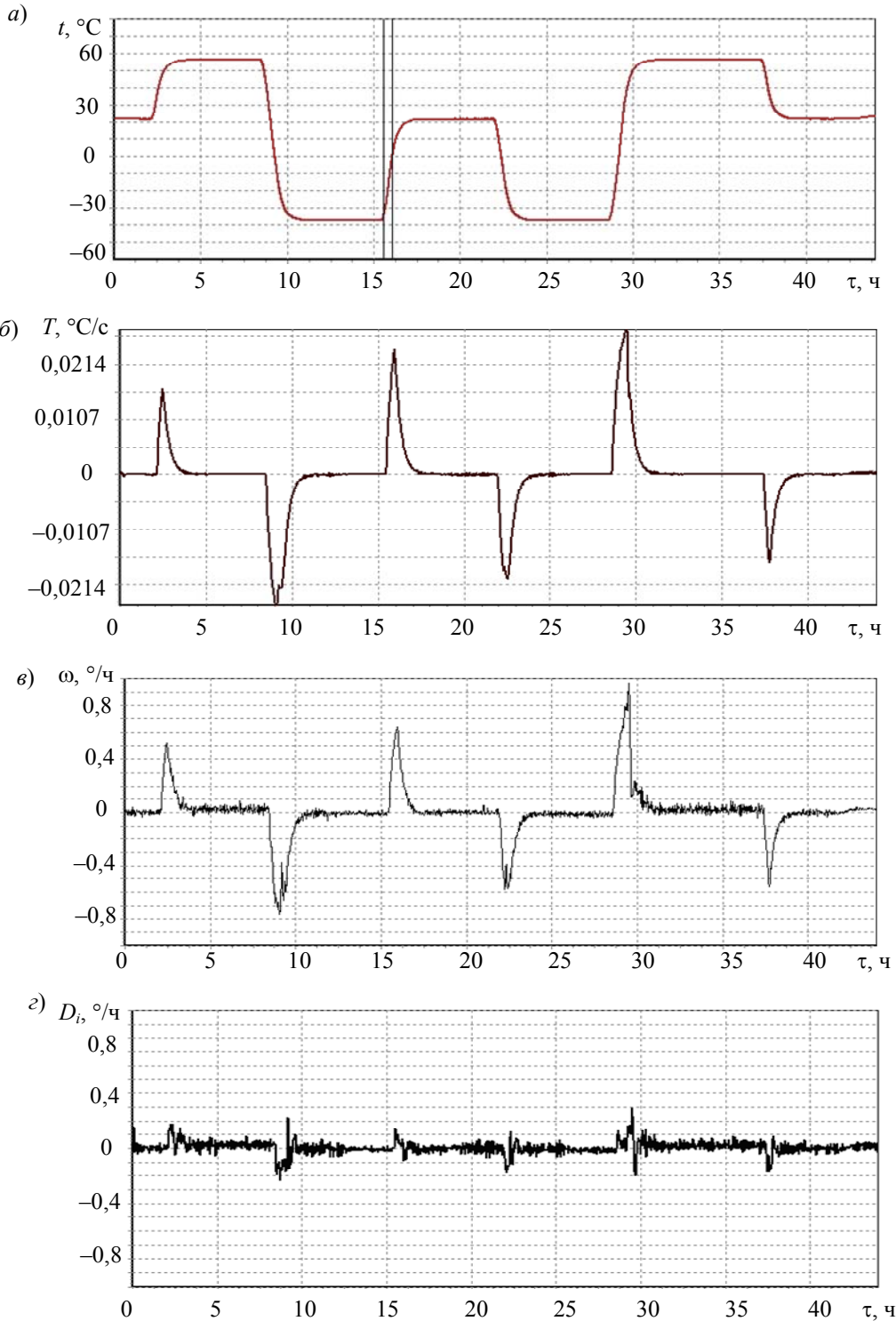


Рис. 3

Из анализа графиков следует, что поведение гироскопа абсолютно адекватно имеющимся представлениям о механизме возникновения теплового дрейфа. При нестационарном изменении температуры наблюдаются знакопеременные всплески фиктивной угловой скорости, достигающие уровня $-0,6 \dots 1,0$ °/ч.

Для тарировки данного гироскопа был выбран получасовой интервал времени записи (15,6—16,1 ч), когда температура датчика повышалась от -37 до 0 °С (на рис. 3, а этот интервал отмечен вертикальными линиями). Посредством обработки сигнала на этом интервале записи сформирован тарировочный массив единичного дрейфа. Результаты компенсации наглядно проиллюстрированы рис. 3, з. Сопоставляя графики, приведенные на рис. 3, в и 3, з, можно сделать вывод о том, что в результате компенсации с использованием рассмотренной процедуры численного прогноза дрейфа удалось снизить величину термически индуцированного смещения гироскопа в 3—5 раз, что свидетельствует об эффективности предложенного подхода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шереметьев А. Г. Волоконный оптический гироскоп. М.: Радио и связь, 1987.
2. Джашитов В. Э., Панкратов В. М. Математические модели теплового дрейфа гироскопических датчиков инерциальных систем. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2001.
3. Галягин К. С. и др. Программный комплекс расчета теплового дрейфа волоконно-оптического гироскопа // Вестн. ПГТУ. Аэрокосмическая техника. 2005. № 21. С. 23—28.
4. Вахрамеев Е. И., Галягин К. С., Ивонин А. С., Ошивалов М. А., Ульрих Т. А. Тепловой дрейф волоконного оптического гироскопа // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1. С. 32—37.

Сведения об авторах

- Евгений Иванович Вахрамеев** — канд. техн. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра теплотехники;
E-mail: abins@pstu.ru
- Константин Спартакович Галягин** — канд. техн. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра теплотехники;
E-mail: abins@pstu.ru
- Александр Сергеевич Ивонин** — аспирант; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра теплотехники;
E-mail: alex_sambist@mail.ru
- Михаил Анатольевич Ошивалов** — канд. техн. наук, доцент; Пермский национальный исследовательский политехнический университет, кафедра теплотехники;
E-mail: abins@pstu.ru

Рекомендована кафедрой
теплотехники

Поступила в редакцию
30.11.12 г.

С. А. ЯКОВЛЕВА, А. Г. ЩЕРБАК, С. Н. БЕЛЯЕВ

МЕТОДЫ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ АЭРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОФИЛЯ ГАЗОВОГО ПОДШИПНИКА

Представлены результаты исследования особенностей формообразования аэродинамического профиля газового подшипника с использованием лазерной обработки и ионного травления. Рассматривается разработанная технология создания аэродинамического профиля переменной глубины на полусферической детали.

Ключевые слова: газовый подшипник, аэродинамический профиль, лазерная обработка, ионное травление.

В современных изделиях точного приборостроения в качестве опорных элементов широко применяются различные конструкции подшипникового узла на газовой смазке. Так, например, в поплавковом гироскопе для взвешивания главной оси ротора гироскопа используется газодинамический полусферический обращенный подшипник катушечного типа с нагнетанием смазки к полюсу. На рис. 1, а показаны элементы конструкции поплавкового гироскопа, где 1 — корпус, 2 — поплавковая камера, 3 — игольчатые подшипники, 4 — жидкость, 5 — неподвижные опоры газового подшипника, 6 — ротор, 7 — вращающиеся фланцы подшипника [1]. Несущая способность подшипника создается за счет аэродинамического профиля, выполняемого в виде спиральных канавок на неподвижной опоре (рис. 1, б). Оси канавок — сферические винтовые линии, глубина канавок составляет 3...6 мкм, а шероховатость поверхности Ra 0,16 мкм (рис. 1, в). Материал опоры и фланца — прецизионный сплав 40ХНЮ-ВИ (Cr~40%, Al~3,5%, Ni — ост.).

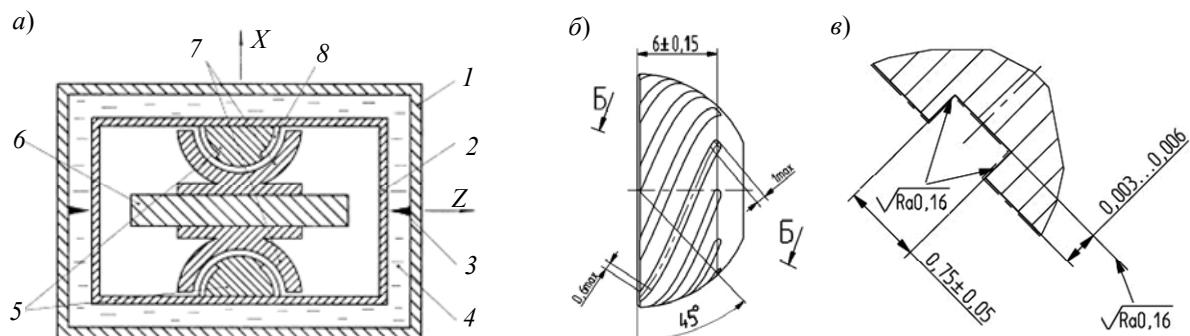


Рис. 1

К деталям газового подшипника поплавкового гироскопа предъявляются высокие требования по геометрической точности и ее сохранению в течение длительного периода эксплуатации. Допустимое отклонение от круглости рабочей сферической поверхности детали составляет 0,4 мкм. При этом точность гироскопа и стабильность его технических характеристик

во многом зависят от параметров газовых подшипников: стабильности геометрии и качества рабочих поверхностей деталей подвеса, включая параметры аэродинамического профиля [2].

Важной операцией в технологии изготовления прецизионного газового подшипника является формообразование аэродинамического профиля на деталях подвеса. Основные параметры профиля, такие как форма, угол наклона, глубина и ширина микроканалов, непосредственно влияющие на несущую способность узла, зависят только от технологии формообразования.

В настоящее время формообразование аэродинамического профиля на деталях газового подшипника поплавоквого гироскопа осуществляется методом механической обработки — притиркой с алмазной пастой (шлифовально-доводочный метод). Этот метод имеет недостатки, связанные с неравномерностью получаемой геометрии, низкой воспроизводимостью результатов, невысокой точностью и чистотой ($Ra\ 0,16—0,75\ \mu\text{м}$) выполнения канавок. Кроме того, шлифовально-доводочный метод формообразования вносит значительные напряжения при обработке, что обуславливает формирование явно выраженного неосесимметричного поля распределения остаточных напряжений, которые на последующей операции нанесения покрытия, сопровождаемой отжигом при $350\ ^\circ\text{C}$, вследствие процессов релаксации могут приводить к искажению формы детали. Из-за этого отклонение от круглости сферической поверхности деталей может выходить за допустимые пределы. Для сохранения точности прецизионных деталей газового подшипника на уровне $0,3—0,4\ \mu\text{м}$ в технологии их изготовления необходимо применять операции формообразования, обеспечивающие минимальные механические воздействия и осесимметричную эпюру внутренних напряжений детали.

В настоящей статье представлены результаты исследования и разработки прогрессивных технологических методов немеханического формообразования аэродинамического профиля газового подшипника, а именно электрофизических методов, использующих потоки высокоэнергетических частиц (так называемые „пучковые технологии“), — светолучевой (лазерной) обработки и ионно-вакуумной обработки. При этом были решены следующие задачи:

- выявление особенностей технологий ионного распыления поверхности (травления) и лазерной обработки при формообразовании на плоскости заданного профиля;
- сравнительный анализ результатов формообразования и выбор более эффективного метода для обеспечения аэродинамического профиля;
- разработка технологии формообразования профиля на полусферической детали.

Рассмотрим особенности этих методов немеханического формообразования.

Лазерная обработка. Принцип лазерной обработки заключается в воздействии сфокусированного луча лазера на поверхность обрабатываемого изделия. Результатом этого воздействия является изменение структуры материала, его расплавление, испарение поверхностных слоев материала. Преобладание того или иного эффекта воздействия зависит от вида материала, типа лазера и режимов обработки [3].

В ходе исследований для лазерной обработки применялся „Минимаркер 20 Вт“ с диаметром лазерного пятна $50\ \mu\text{м}$ и длительностью импульса $\tau=100\ \text{нс}$. Для формирования на плоскости заданного прямоугольного профиля с шероховатостью $Ra\ 0,16\ \mu\text{м}$ (см. рис. 1, в) необходимы следующие этапы лазерной обработки:

- получение профиля заданной глубины;
- полировка поверхности для обеспечения заданной чистоты.

При этом целесообразно формировать глубину профиля при более щадящих режимах обработки в целях сокращения количества полировочных проходов, так как уменьшение толщины слоя материала, испаряемого под воздействием одного импульса, позволяет достичь меньшей шероховатости [3].

Экспериментально определен многопроходный режим наиболее щадящей обработки для формирования глубины (h) канавки: 5 проходов при мощности лазерного излучения $P=6$ Вт, частоте следования импульсов $f=90$ кГц, длительности импульса $\tau=100$ нс, скорости сканирования $v=900$ мм/с, линейатуре $l=200$ линий/мм (рис. 2, а). Для уменьшения шероховатости выполнялась дополнительная полировка: 5 проходов при $P=2$ Вт и указанных выше параметрах и затем 5 проходов при $P=2$ Вт и $\tau=4$ нс (остальные параметры те же), что обеспечивает шероховатость Ra 0,33 мкм (рис. 2, б). Однако даже щадящие режимы лазерного воздействия, изменяющие только шероховатость поверхности, приводят к образованию наплывов на краях контуров канавки, которые связаны с процессами истечения и перераспределения жидкой фазы (рис. 2, в: 10 проходов при $P=4$ Вт, $f=90$ кГц, $\tau=100$ нс, $v=900$ мм/с, $l=200$ линий/мм). После формирования профиля требуется дополнительная доводка поверхности для снятия наплывов по краям, поэтому в данном случае метод профилирования с использованием лазерной обработки не может быть финишной операцией.

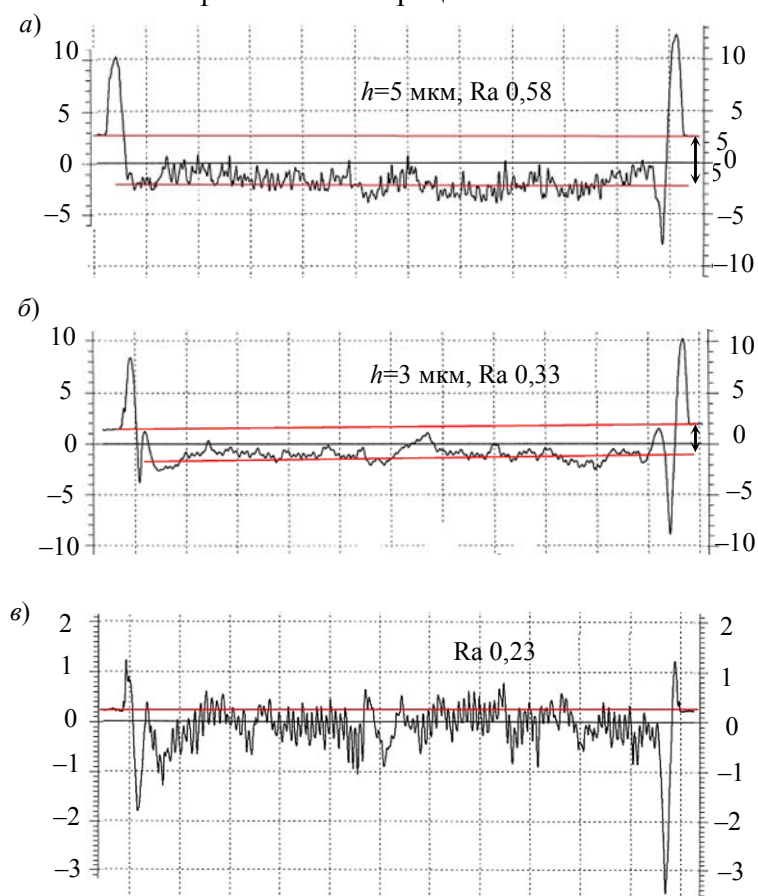


Рис. 2

Ионно-вакуумная обработка. Распыление атомов материала ионами инертного газа имеет следующие преимущества: получение высокой чистоты и точности формы канавок, почти полное отсутствие остаточных напряжений после обработки [4].

Для ионно-вакуумной обработки применялся источник ионов ИИ-4-0,15, имеющий следующие постоянные параметры — ионный ток $I=0,15$ А и ускоряющее напряжение $U=4$ кВ. Варьируемыми параметрами обработки являются: давление p рабочего газа (аргона), расстояние L между ионным источником и обрабатываемой поверхностью и угол падения q ионного потока, отсчитываемый от нормали к поверхности.

Ионное травление образца при $p=1,4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст., $L=90$ мм, $q=0$ в течение 2 ч позволило сформировать профиль глубиной 1 мкм с шероховатостью Ra 0,12 мкм (рис. 3, а), в течение 3 ч — глубиной 1,5 мкм с Ra 0,12 мкм (рис. 3, б). Шероховатость базовой поверхности

составляла Ra 0,14 мкм. При этом видно, что технология ионного травления обеспечивает шероховатость обработанной поверхности Ra 0,12 мкм и профиль без каких-либо краевых эффектов.

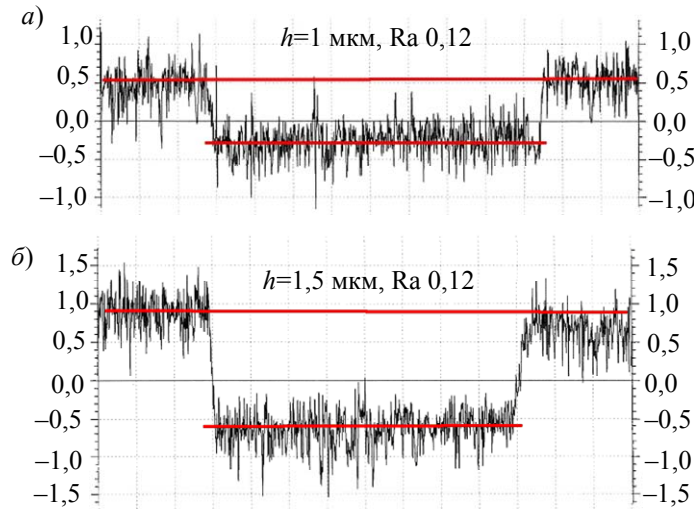


Рис. 3

Результаты формообразования прямоугольного профиля на плоскости позволяют сравнить оба метода и выбрать наиболее эффективный для создания аэродинамического профиля на полусферической поверхности. Критерии сравнения приведены в табл. 1.

Таблица 1

Критерии сравнения	Ионное травление	Лазерная обработка
Необходимость маски	Да	Нет
Точность получаемого профиля	Зависит от точности маски	Зависит от диаметра луча
Краевые эффекты	Нет	Да
Структура материала профиля	Без изменений	Микрооплавления
Возможность реализации на сфере	Да	Необходимо управление фокусировкой луча
Возможность применения в качестве финишной операции	Да	Необходима финишная доводка поверхности

Сравнительный анализ показал, что технология ионного травления более эффективна. Поэтому эта технология выбрана для дальнейшей реализации на полусферической поверхности.

Для формирования канавок заданной глубины необходимо выявить зависимость скорости травления от варьруемых параметров процесса.

Скорость ионного травления для чистых металлов при падении ионов по нормали рассчитывается следующим образом [5]:

$$v = \frac{h}{t} = \frac{M}{eN_A \rho} S j, \quad (1)$$

где t — время травления; M — молярная масса распыляемого материала, г/моль; e — заряд электрона, Кл; N_A — число Авогадро; ρ — плотность материала, г/см³; S — коэффициент распыления материала, атом/ион; j — плотность ионного тока в сечении, перпендикулярном направлению падения ионов, А/см².

В рассматриваемом случае $j = 0,01$ А/см², коэффициенты распыления $S_{Ni}=2,00$ атом/ион, $S_{Cr}=2,23$ атом/ион, $S_{Al}=1,75$ атом/ион [5]. Рассчитанные теоретические скорости травления чистых металлов: $v_{Ni}=49,5$ мкм/ч, $v_{Cr}=41,2$ мкм/ч, $v_{Al}=65,6$ мкм/ч. Экспериментальная скорость травления сплава 40ХНЮ-ВИ составляет 0,5 мкм/ч, что значительно ниже теоретических скоростей травления для чистых металлов, причем подобное явление наблюдается и для других сплавов, например пермаллоя 79НМ [5].

Для практического применения зависимость (1) необходимо дополнить эмпирическими коэффициентами, учитывающими сложный состав сплава ($K_{\text{сп}}$), влияние давления газа ($K(p)$) и расстояния между ионным источником и поверхностью ($K(L)$). При травлении полусферической поверхности очевидным является изменение угла падения ионного потока на поверхность (рис. 4), а следовательно, и изменение скорости травления, поэтому необходимо учесть коэффициент $K(q)$, равный единице при падении ионного потока по нормали. Таким образом,

$$v = \frac{h}{t} = \frac{M}{eN_A \rho} S_{\text{Ni}} j K_{\text{сп}} K(L) K(p) K(q), \quad (2)$$

где $K_{\text{сп}} K(L) K(p) = 0,014$ при $L = 81,5$ мм, $p = 1,4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.

Для реализации на полусферической детали полного аэродинамического профиля, состоящего из 10 спиральных канавок, была разработана специальная маска, имеющая соответствующие заданному профилю сквозные пазы (рис. 5, а). Для обеспечения равномерности травления детали сообщается вращение вокруг своей оси. Полученная опора показана на рис. 5, б (при $t = 8,5$ ч, $L = 41,5$ мм и $p = 1,4 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст.), а переменный профиль канавки, снятый у полюса ($q = 0$), под углом $q = 10^\circ$ и у экватора ($q = 30^\circ$), — на рис. 6, а—в соответственно. Изменение глубины канавок и скорости травления в зависимости от угла падения ионного потока показано в табл. 2.

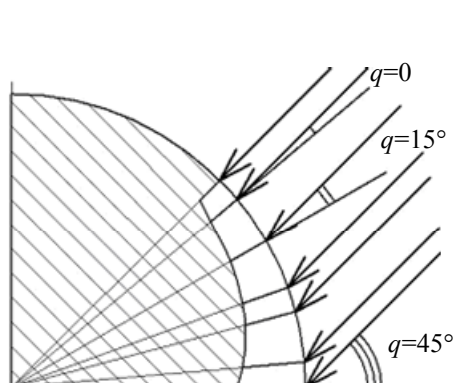


Рис. 4

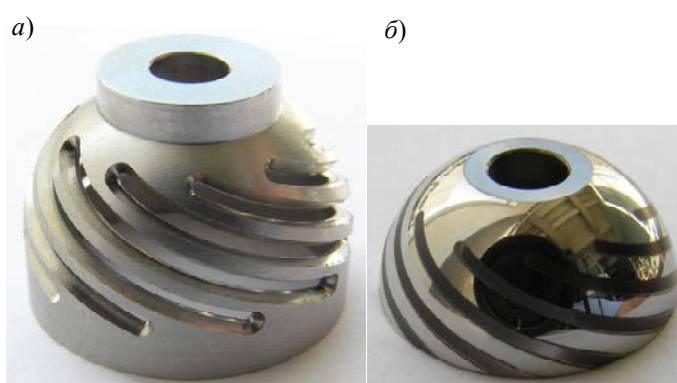


Рис. 5

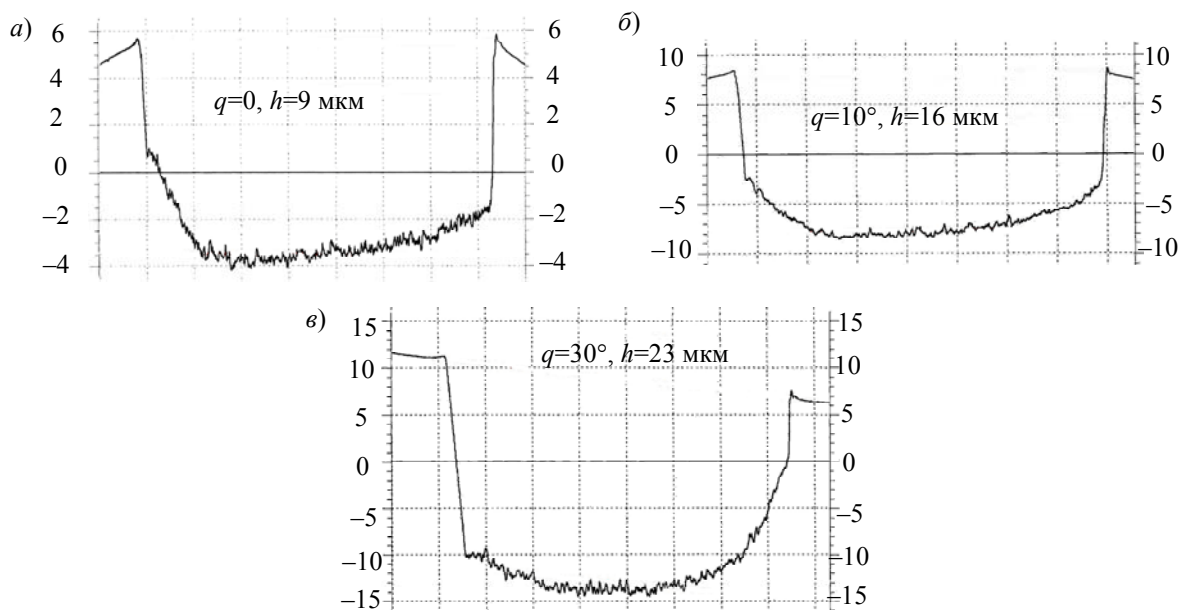


Рис. 6

Таблица 2

q, \dots°	$h, \text{мкм}$	$v, \text{мкм/ч}$
0	9	1,05
5	12	1,41
10	16	1,88
20	19	2,26
30	23	2,71

Как видно из табл. 2, скорость травления увеличивается с увеличением угла падения ионного потока, и, ориентируя сферическую поверхность согласно рис. 4, получаем профиль с уменьшением глубины канавки в 2,5 раза от экватора к полюсу. Таким образом, технология ионного травления позволяет получать для сферической поверхности профиль переменной глубины, являющийся, по законам газовой динамики, оптимальным, в отличие от профиля, имеющего постоянную глубину [1], и который невозможно было реализовать с использованием существующих технологий. Полученный переменный профиль позволяет существенно повысить характеристики газовых подшипников.

Экспериментальная оценка влияния ионного травления на прецизионную форму детали показала, что после выполнения профиля отклонение от круглости сферической поверхности сохраняется на уровне 0,3—0,4 мкм. Кроме того, обеспечивая практически одновременное формирование всего профиля, ионное травление позволяет снизить уровень остаточных напряжений и сохранить осесимметричную эпюру их распределения в готовой детали в отличие от существующей технологии механической шлифовки-доводки, что весьма важно для сохранения полученной высокой точности с течением времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сипенков И. Е., Филиппов А. Ю., Болдырев Ю. Я., Григорьев Б. С., Заблоцкий Н. Д., Лучин Г. А., Панич Т. В. Прецизионные газовые подшипники. СПб: ЦНИИ „Электроприбор“, 2007.
2. Филиппов А. Ю. О влиянии величины смазочного зазора на качество гироскопов с неконтактным сферическим газодинамическим подшипником // Гироскопия и навигация. 1995. № 3 (10). С. 18—23.
3. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюрков А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
4. Григоров А. И., Семенов А. П. Обработка газовых подшипников с применением ионного распыления. М.: Наука, 1976.
5. Данилин Б. С., Киреев В. Ю. Ионное травление микроструктур. М.: Сов. радио, 1979.

Сведения об авторах

- Светлана Анатольевна Яковлева** — аспирант; ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; E-mail: yorkunoi@gmail.com
- Александр Григорьевич Щербак** — д-р техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; начальник сектора; E-mail: a_sch@gtn.ru
- Сергей Николаевич Беляев** — канд. техн. наук; ЦНИИ „Электроприбор“, Санкт-Петербург; ст. науч. сотрудник; E-mail: serenible@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения
СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию
28.05.12 г.

И. К. МЕШКОВКИЙ, С. В. ВАРЖЕЛЬ, М. Н. БЕЛИКИН, А. В. КУЛИКОВ, В. С. БРУНОВ

ТЕРМИЧЕСКИЙ ОТЖИГ РЕШЕТОК БРЭГГА ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ФАЗОВЫХ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ ДАТЧИКОВ

Предложен метод изготовления волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков измерения различных физических величин с помощью термического отжига волоконных брэгговских решеток. Определены оптимальные условия отжига для получения решеток Брэгга с требуемыми спектральными характеристиками.

Ключевые слова: волоконная брэгговская решетка, термический отжиг, волоконно-оптический фазовый интерферометрический датчик.

В настоящее время одним из актуальных направлений оптической техники является создание волоконно-оптических фазовых интерферометрических датчиков (ФИД) измерения различных физических величин на основе брэгговских решеток, которые характеризуются электромагнитной невосприимчивостью, низкой себестоимостью и малыми массогабаритными параметрами. Так, системы акустического мониторинга, использующие волоконно-оптические гидрофоны на брэгговских решетках, способны полностью заменить существующие аналоги на пьезокерамических элементах [1]. Проблема, с которой сталкиваются разработчики ФИД на основе волоконных брэгговских решеток (ВБР), связана с записью массивов широкополосных решеток Брэгга с требуемым соотношением коэффициентов отражения.

Один из методов получения высокоэффективных отражательных брэгговских решеток в волноводах из $\text{GeO}_2\text{:SiO}_2$ -стекла — это облучение оптического волокна сквозь фазовую маску одиночным импульсом эксимерного лазера с плотностью энергии близкой, к порогу разрушения материала ($\sim 1 \text{ Дж/см}^2$) [2]. При такой плотности энергии возникает решетка показателя преломления оптического волокна с глубиной модуляции, достигающей 6×10^{-3} . Такая волноводная структура называется волоконной брэгговской решеткой типа II [3].

ВБР, исследуемые в настоящей статье, были записаны одиночным импульсом эксимерного KrF -лазера методом фазовой маски. Схема записи представлена в работе [4].

Чувствительным элементом волоконно-оптического фазового датчика является участок волокна (длиной L), заключенный между двумя ВБР (рис. 1). В случае одиночного датчика коэффициенты отражения ВБР₁ и ВБР₂ равны соответственно $R_1 = 30 \dots 40 \%$ и $R_2 = 100 \%$, а ширина спектра отражения на полувысоте $\Delta\lambda \geq 0,5 \text{ нм}$.

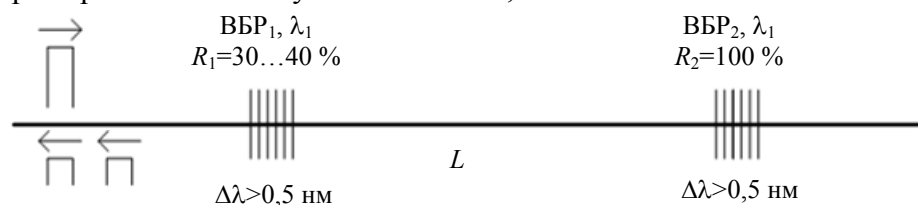


Рис. 1

Известно, что ВБР типа I можно записать практически с любыми значениями R и $\Delta\lambda$, однако это требует использования методов записи с длительной экспозицией (10—20 мин) [5], а также применения специальных методов создания чирпированных ВБР [6], без использования которых значение $\Delta\lambda$ не превышает 0,1 нм. Применение ВБР типа II позволяет получать высокоэффективные брэгговские зеркала, используя метод одноимпульсной записи и нечирпированные фазовые маски [7]. При этом глубина модуляции показателя преломления

ВБР типа II, индуцированная одиночным импульсом длительностью 20 нс, может превосходить эту величину для ВБР типа I более чем в 100 раз. Это позволяет осуществить технологию одноимпульсной записи брэгговских решеток с коэффициентом отражения, близким к 100 %, и сравнительно большим значением $\Delta\lambda$ (~ 1 нм).

Недостатком ВБР типа II является резкая зависимость наведенной модуляции показателя преломления оптического волокна от плотности энергии в импульсе длительностью 20 нс, что усложняет контроль коэффициента отражения решетки в процессе записи [3]. Поэтому для создания чувствительного элемента волоконно-оптического ФИД с требуемым соотношением коэффициентов отражения двух решеток авторами был предложен и апробирован метод термического отжига ВБР типа II.

При нагреве ВБР длина волны брэгговского резонанса увеличивается вследствие как термического расширения оптического волокна, а вместе с ним и периода решетки, так и изменения (увеличения) эффективного показателя преломления материала световода. При достижении температуры отжига (~ 900 °C для ВБР типа II) коэффициент отражения решетки плавно уменьшается. Задавая различные интервалы времени, можно добиться различных значений коэффициента отражения. Скорость отжига решетки пропорциональна температуре нагрева. На рис. 2 продемонстрирован график зависимости коэффициента отражения R от времени отжига t при различных его температурах T . Анализ графика показывает, что при увеличении температуры отжига быстрее достигается требуемый коэффициент отражения ВБР.

Спектр решетки Брэгга в процессе отжига приведен на рис. 3. Коэффициент отражения ВБР контролируется оптическим спектроанализатором.

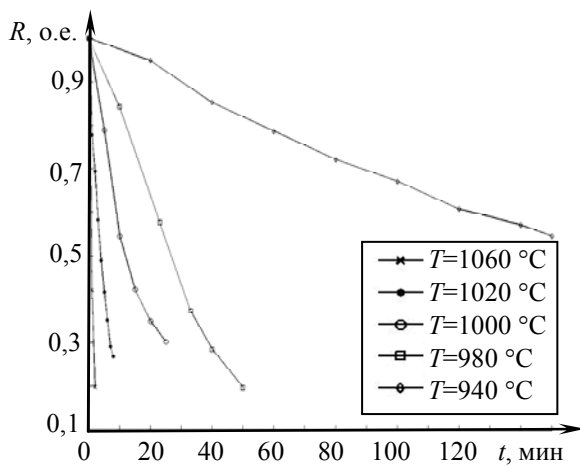


Рис. 2

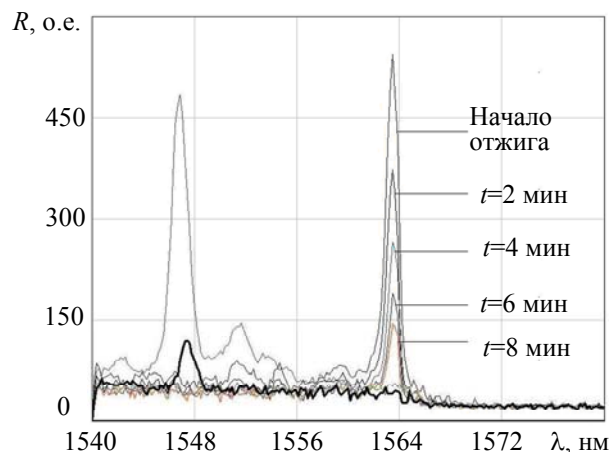


Рис. 3

Как показали экспериментальные данные, во время отжига решеток при постоянной температуре происходит дополнительное смещение пика отражения в сторону больших длин волн. Это смещение прямо пропорционально времени отжига (чем больше время термического воздействия, тем больше смещение), и оно сохраняется и после охлаждения волокна до исходной температуры. Сдвиг, не превышающий 0,2 нм, является приемлемым для создания чувствительных элементов волоконно-оптических ФИД.

Таким образом, в ходе апробации предложенного метода установлено, что при изготовлении чувствительных элементов волоконно-оптических ФИД, например волоконно-оптического гидрофона, необходимо правильно подбирать оптимальные условия термического отжига для получения решеток Брэгга с требуемыми спектральными характеристиками и соотношениями коэффициентов отражения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

6. Cusano A., Camporiano S., D'Addio S., Balbi M., Balzarini S., Giordano M., Cutolo A. Optical fiber hydrophone using polymer-coated fiber Bragg grating // OSA/OFS. 2006. Paper ThE85.
7. Варжель С. В., Куликов А. В., Брунов В. С., Асеев В. А. Метод понижения коэффициента отражения волоконных брэгговских решеток с помощью эффекта фотохромизма // Науч.-техн. вестн. информационных технологий, механики и оптики. 2012. № 1(77). С. 151—152.
8. Reekie L., Archambault J.-L., Russell P. St. J. 100 % reflectivity fibre gratings produced by a single excimer laser pulse // OSA/OFC. 1993. Paper PD14. P. 327—330.
9. Варжель С. В., Куликов А. В., Асеев В. А., Брунов В. С., Калько В. Г., Артеев В. А. Запись узкополосных волоконных брэгговских отражателей одиночным импульсом эксимерного лазера методом фазовой маски // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. № 5(75). С. 27—30.
10. Becker M., Bruckner S., Lindner E., Rothhardt M., Unger S., Kobelke J., Schuster K., Bartelt H. Fiber Bragg grating inscription with UV femtosecond exposure and two beam interference for fiber laser applications // Proc. of SPIE. 2010. Vol. 7750. P. 775015—1.
11. Bernier M., Sheng Y., Vallée R. Ultrabroadband fiber Bragg gratings written with a highly chirped phase mask and infrared femtosecond pulses // Optics Express. 2009. Vol. 17, N 5. P. 3285—3290.
12. Malo B., Johnson D.C., Bilodeau F., Albert J., Hill K.O. Single-excimer-pulse writing of fiber gratings by use of a zero-order nulled phase mask: grating spectral response and visualization of index perturbations // Opt. Lett. 1993. Vol. 18, N 15. P. 1277—1279.

Сведения об авторах

- Игорь Касьянович Мешковский** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Сергей Владимирович Варжель** — канд. физ.-мат. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: vsv187@gmail.com
- Михаил Николаевич Беликин** — магистр; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: mbelikin@gmail.com
- Андрей Владимирович Куликов** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра физики и техники оптической связи; E-mail: a.kulikov86@gmail.com
- Вячеслав Сергеевич Брунов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптоинформационных технологий и материалов; E-mail: brunov@oi.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
физики и техники оптической связи

Поступила в редакцию
14.02.12 г.

И. Ю. КИНЖАГУЛОВ, В. А. БЫЧЕНОК

МЕТОДИКА ЛАЗЕРНО-УЛЬТРАЗВУКОВОГО КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Рассматривается возможность применения лазерно-ультразвукового контроля для оценки качества изготовления паяных соединений элементов ракетно-космической техники. Изложены основные принципы разработанной методики контроля и приведены результаты ее апробации на натуральных образцах камер жидкостных ракетных двигателей.

Ключевые слова: лазерно-ультразвуковой контроль, ракетно-космическая техника, неразрушающий контроль, пайка.

В настоящее время резко увеличилось число нештатных ситуаций при выведении космических аппаратов на околоземную орбиту. Одной из причин такого состояния дел является низкий уровень контроля качества изготовления элементов ракетно-космической техники (РКТ). Вследствие высокой стоимости изготовления таких элементов широкое применение в системе контроля качества находят методы неразрушающего контроля (МНК).

Современные жидкостные ракетные двигатели (ЖРД) представляют собой двустенные конструкции, наружная и внутренняя стенки которых соединены при помощи пайки. С увеличением удельного импульса двигателей, а следовательно, и с увеличением рабочих давлений внутри камер и в межстеночном пространстве проблема контроля данных соединений приобретает особую актуальность. Решение этой проблемы с использованием традиционных методов неразрушающего контроля, таких как магнитный, рентгеновский и ультразвуковой, по различным причинам не привело к положительному результату. Как альтернатива традиционным МНК авторами был предложен лазерно-ультразвуковой метод контроля, разработана методика его проведения и осуществлена ее апробация на примере контроля качества изготовления паяных соединений сопел камер ЖРД 14Д23 ракеты-носителя „Союз 2-1-Б“.

Сопло камеры ЖРД 14Д23 имеет такую отличительную особенность, как сложная геометрическая форма верхнего коллектора, который является концентратором напряжений различного рода. Поэтому в качестве наиболее критичной области, с точки зрения ее контроля, была выбрана зона подколлекторного кольца, в которой наблюдалось наибольшее количество обнаруженных дефектов. Схема подколлекторной зоны показана на рис. 1.

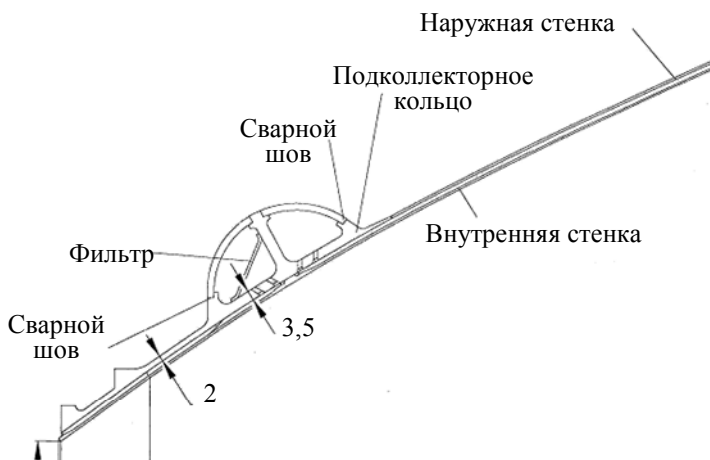


Рис. 1

Паяные соединения в зоне подколлекторного кольца получают методом вакуумно-компрессионной пайки. Типовой дефект паяных соединений, возникающий как в процессе изготовления, так и при эксплуатации, — отсутствие контакта (неплотность: неспай, непропай, отрыв) между поверхностями вследствие нарушения технологии или больших тепловых и (или) механических напряжений при ис-

пытаниях. Внешний вид несплошности в зоне подколлекторного кольца двигателя 14Д23 представлен на рис. 2.

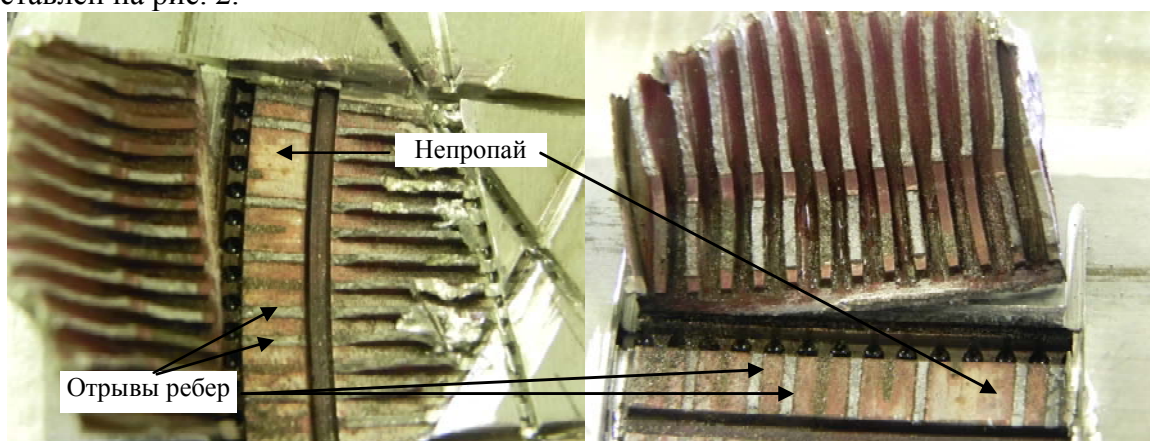


Рис. 2

Разработанная методика позволяет проводить лазерно-ультразвуковой контроль качества паяных соединений на предмет наличия несплошностей ребер внутренней стенки и подколлекторного кольца верхнего сопла камеры двигателя. В качестве средства контроля используется лазерно-ультразвуковой дефектоскоп УДЛ-2М, в состав которого входят:

- оптоэлектронный блок, содержащий импульсный Nd:YAG-лазер с модуляцией добротности и высокой частотой повторения импульсов;
- широкополосный оптико-акустический преобразователь ПЛУ-15Ц-02;
- оптоволоконный кабель;
- специализированное программное обеспечение.

Контроль проводится эхо-методом при контактном вводе продольных ультразвуковых колебаний с использованием оптико-акустического преобразователя, генерирующего продольную волну, путем ручного сканирования внутренней поверхности подколлекторной зоны сопла.

На рис. 3 представлена схема, демонстрирующая принцип работы широкополосного оптико-акустического преобразователя ПЛУ-15Ц-02 [1].

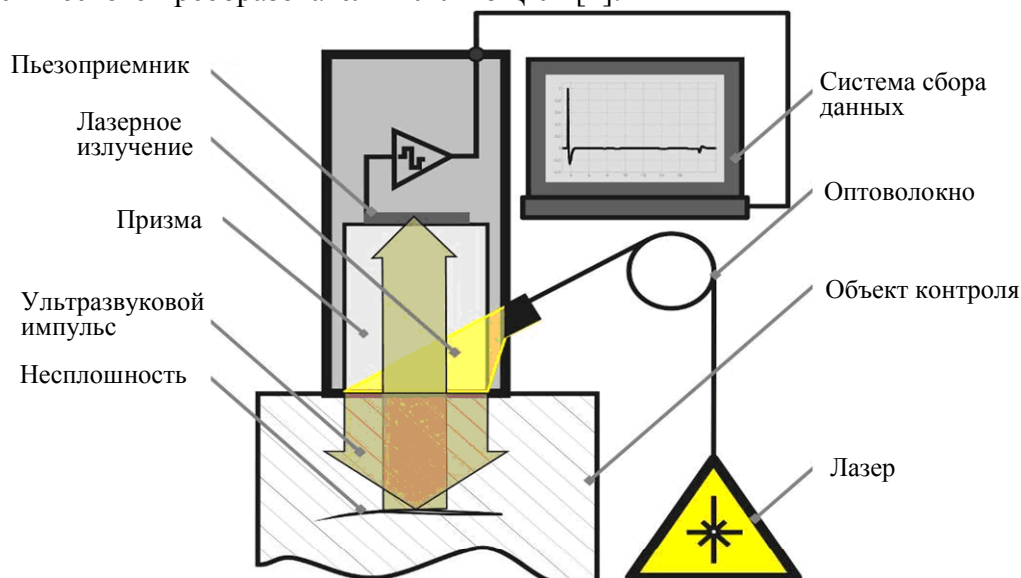


Рис. 3

Излучение лазера, проходя через прозрачную призму, падает под углом на лицевую поверхность объекта контроля (подколлекторного кольца верхнего сопла). Призма находится в акустическом контакте с объектом контроля и является одновременно звукопроводом широкополосного пьезоэлектрического приемника. Выходная поверхность преобразователя имеет

цилиндрическую форму с кривизной, соответствующей кривизне подколлекторного кольца в окружном направлении. Акустический контакт при контроле обеспечивается прижимом преобразователя к внутренней поверхности подколлекторного кольца через тонкий иммерсионный слой контактной жидкости. Поглощаясь в металле, лазерное излучение нагревает тонкий поверхностный слой объекта контроля и граничащий с ним слой жидкости, что приводит к тепловому расширению и возбуждению ультразвуковых импульсов — акустических сигналов, временной профиль которых повторяет форму огибающей интенсивности лазерного импульса. Этот ультразвуковой импульс распространяется как в объекте контроля, так и в прозрачной призме-звукопроводе [1].

Особенностью данного объекта контроля является то, что контроль качества пайки осуществляется между канавками перетока в зоне 10 мм (в меридиональном направлении).

Для оценки чувствительности применяемой при контроле дефектоскопической аппаратуры используется комплект контрольных образцов [3]. Контрольные образцы представляют собой сегменты металла, вырезанные из верхнего сопла камеры двигателя.

Комплект содержит следующие контрольные образцы.

1. *Контрольный образец КО-1*, его изображение, а также обозначение и расположение имитаторов дефектов представлены на рис. 4, а, б соответственно. В этом образце выделены следующие зоны:

— зона 1 (обозначена как КО-1БД1, КО-1БД2, КО-1БД3) — бездефектный участок (отсутствуют несплошности) для определения типовой дефектограммы образца;

— зона 2 (обозначена как КО-1Д1, КО-1Д2, КО-1Д3), в которой выполнены имитаторы несплошностей в виде прорезей размером 1 мм по длине ребра.

2. *Контрольный образец КО-2*, в нем выделены зоны, аналогичные зонам КО-1, где в зоне 2 имитаторы несплошностей выполнены в виде прорезей размером 2 мм по длине ребра.

3. *Контрольный образец КО-3*, в котором выделены зоны, аналогичные зонам предыдущих образцов, и в зоне 2 имитаторы несплошностей выполнены в виде прорезей размером 3 мм по длине ребра.

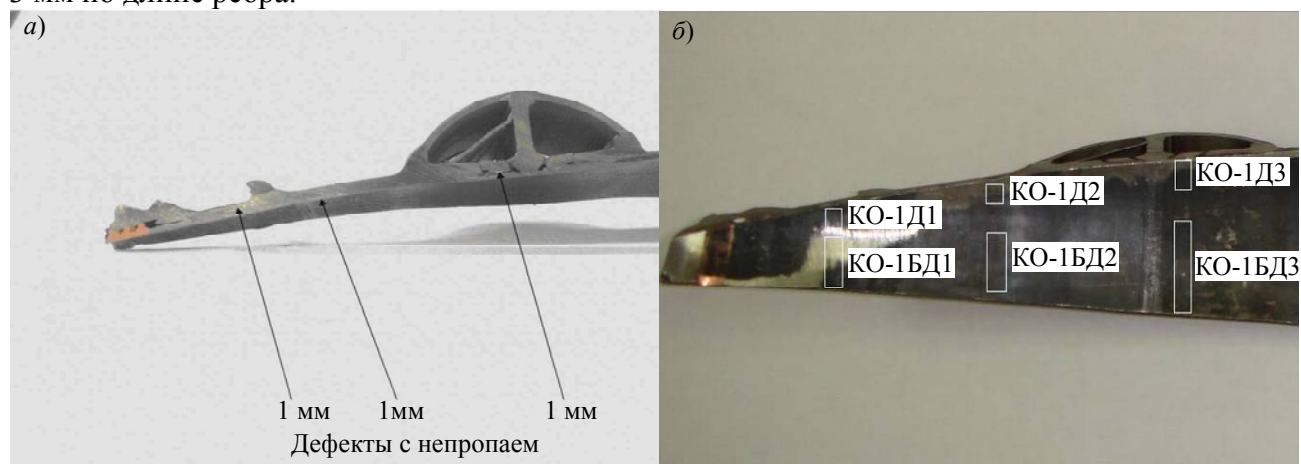


Рис. 4

Камера двигателя 14Д23, подлежащая контролю, закрепляется в стенде отдельно или в сборке так, чтобы обеспечить возможность удобного сканирования датчиком внутренней поверхности подколлекторной зоны. Сканирование производится от нулевой метки, нанесенной на внутреннюю поверхность. Положение и способ нанесения нулевой метки определяются согласно ГОСТ 3.1102-81 и ГОСТ 3.1502-85.

При контроле в процессе сканирования необходимо располагать датчик на контролируемой поверхности с приложением усилия не более 1 кг перпендикулярно поверхности. Качество акустического контакта контролируется по виду акустического изображения на экране монитора.

В зоне нулевой метки необходимо провести сканирование поверхности в меридиональном направлении (вдоль образующей) в целях определения местоположения датчика относительно перемычки и канавок перетока. Вид акустического изображения указанной области показан на рис. 5.

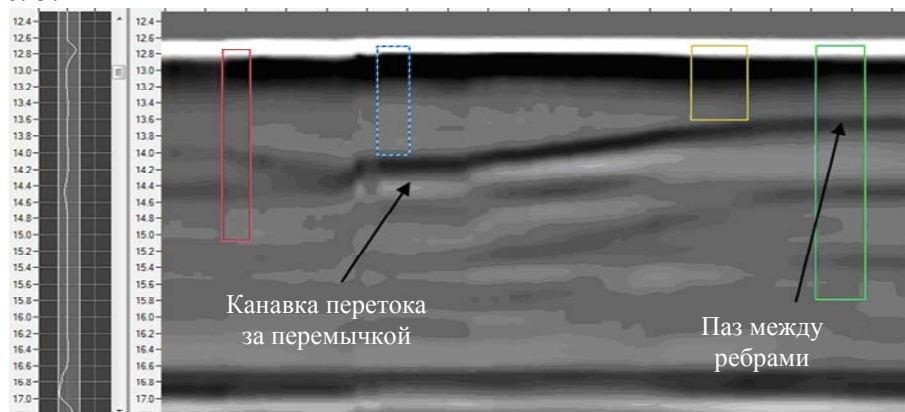


Рис. 5

Наличие дефектов в подколлекторной зоне после проведения контроля определяется путем анализа полученных дефектограмм.

На бездефектном участке, акустическое изображение которого приведено на рис. 6, на экране монитора периодически появляется и „проседает“ темная полоса, характеризующая переход с желоба между ребрами на ребро. Отсутствие темной полосы на глубине $H=2,3$ мм в зоне „проседания“ свидетельствует об отсутствии несплошности в зоне пайки ребра.

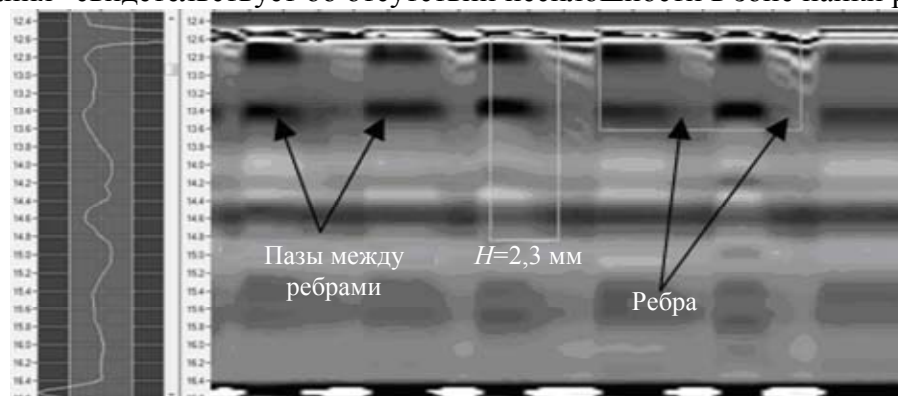


Рис. 6

На дефектном участке в области „просадки“ темной полосы на глубине 2,3 мм регистрируются сигналы, свидетельствующие о наличии дефекта. Данное акустическое изображение представлено на рис. 7.

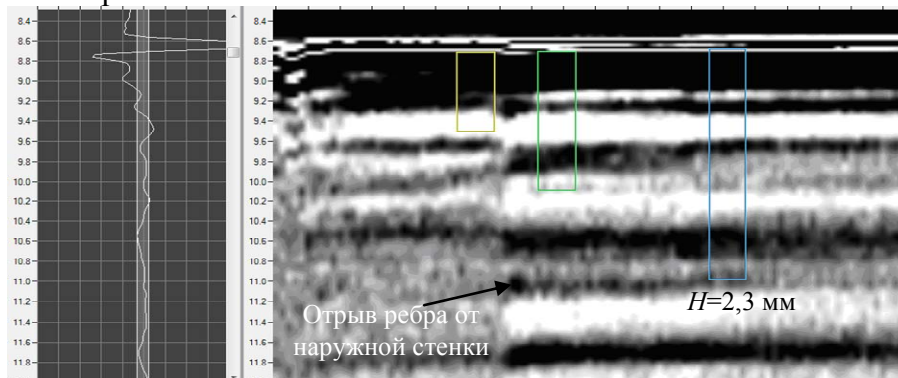


Рис. 7

Проведенная апробация на примере контроля качества изготовления паяных соединений сопел камер ЖРД 14Д23 позволяет сделать вывод о применимости разработанной методики

неразрушающего контроля. Чувствительность лазерно-ультразвукового метода и дефектоскопа УДЛ-2М с преобразователем ПЛУ-15Ц-02 позволяет обнаруживать несплошности в паяных соединениях в зоне подколлекторного кольца верхнего сопла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Карабутов А. А., Матросов М. П., Подымова Н. Б.* Термооптический генератор широкополосных импульсов сдвиговых волн // Акуст. журн. 1993. Т. 39(2). С. 373.
2. *Ахманов С. А., Руденко О. В.* Параметрический лазерный излучатель ультразвука // Письма в ЖТФ. 1975. Т. 1(15). С. 725.
3. *Неразрушающий контроль: Справочник. В 8 т. / Под общ. ред. В. В. Клюева. Т. 3: Ермолов И. Н., Ланге Ю. В. Ультразвуковой контроль. М.: Машиностроение, 2006. 864 с.*

Сведения об авторах

- Игорь Юрьевич Кинжагулов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: kinzhiki@mail.ru
- Владимир Анатольевич Быченок** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра измерительных технологий и компьютерной томографии;
E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru

Рекомендована кафедрой
измерительных технологий
и компьютерной томографии

Поступила в редакцию
18.10.12 г.

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.7.067.22, 681.7.068.6, 681.7.075

А. А. МАРЦУКОВ, А. А. ВОРОНИН, А. М. БУРБАЕВ

АНАЛИЗ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ ПОСТОРОННИХ ОБЪЕКТОВ

Приведен анализ существующих досмотровых систем, предназначенных для проверки транспортных средств в пунктах таможенного контроля. Предложено конструктивное решение по усовершенствованию поворотного узла досмотровой системы.

Ключевые слова: телевизионная досмотровая система, визуальное обследование, обнаружение скрытых предметов, таможенный контроль.

Развитие железнодорожного, автомобильного, морского и авиационного транспорта обуславливает необходимость создания универсальной и компактной аппаратуры для проведения инструментального углубленного таможенного досмотра всех видов и типов транспортных средств отечественного и зарубежного производства как внутри (салона, фюзеляжа, судна, вагона), так и снаружи при различных погодных условиях и уровнях освещенности в целях обнаружения и визуального обследования посторонних скрытых предметов (незаконных вложений).

В настоящее время используются различные виды досмотровых систем, как визуальных, так и телевизионных. Их классификация приведена на рис. 1.

На сегодняшний день применение визуальных досмотровых устройств без видеорегистрирующей системы нецелесообразно в связи с тем, что они не позволяют документально сохранять изображения объектов, вызвавших подозрение при обнаружении, а также не обеспечивают необходимый уровень комфорта инспектора при визуальном обследовании в труднодоступных местах и в условиях плохой освещенности.

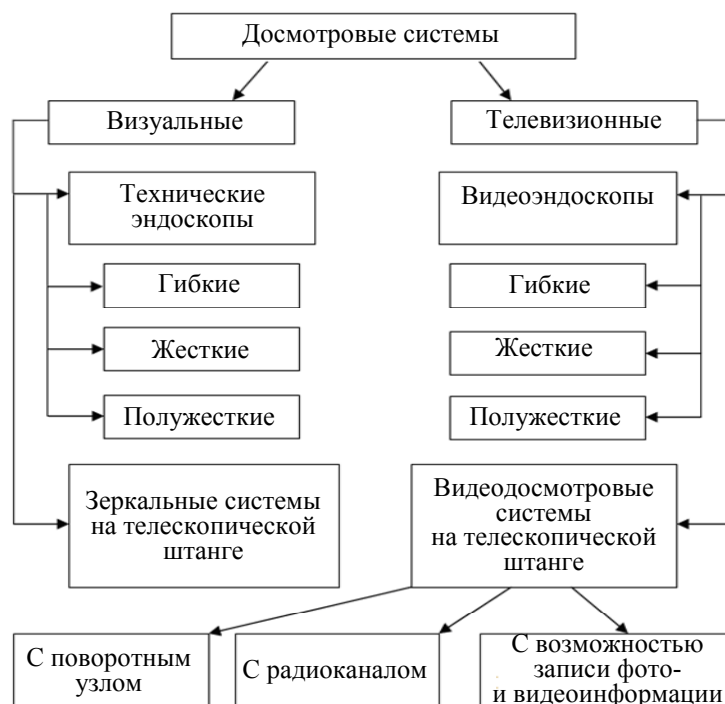


Рис. 1

Сравнительный анализ технических характеристик некоторых наиболее применяемых телевизионных досмотровых систем приведен в таблице.

Характеристика	Система досмотра			
	Видеоэндоскоп “Pentax EPK-1000”	Видеоэндоскоп “Olympus CV-180”	VPC-64	КТС „Авиатор“
Максимальный диаметр рабочей части, мм	8,6	9,2	22	25
Длина рабочей части, мм	1030	1050	620—2000	800—6000
Угол поворота рабочей части, ...°	90—210	120—210	25—115	180—360
Наличие дополнительной подсветки	Нет	Нет	Нет	Да
Наличие видеосистемы привязки к месту досмотра	Нет	Нет	Нет	Да
Угол поля зрения видеокамеры, ...°	140	140	30, 60	30, 60
Глубина резкости, мм	3—100	4—100	3,6—16	10—2000
Общая длина, мм	1345	1350	2000	6000
Масса устройства, кг	23	14	1,63	6,5

Используемые в настоящее время оптические эндоскопы [1—5] имеют определенные недостатки. К ним можно отнести недостаточную длину рабочей части, что сказывается в случаях, когда размер досматриваемого закрытого пространства велик или оно находится высоко над головой инспектора. Также отсутствие встроенной подсветки в таких эндоскопах затрудняет поиск и визуальный анализ в неосвещенных труднодоступных местах. Определенные трудности вызывает отсутствие возможности дистанционного управления поворотом световода.

Существующие телевизионные досмотровые системы [6—10], так же как и эндоскопы, не идеальны в эксплуатации. Серьезные неудобства вызывает скручивание кабеля внутри досмотровой штанги при повороте камеры. Громоздкие следящие головки являются причиной малого сектора обзора в узком пространстве. Неполная автоматизация процесса поворота камеры либо автоматизация поворота только вокруг одной оси приводит к необходимости вращения досмотровой штанги вручную, что вызывает дополнительное спутывание кабелей. Большие габариты и масса телевизионных досмотровых систем зачастую не позволяют быстро осуществить досмотровые операции. Расположение осветительных светодиодов вокруг объектива камеры ведет к слишком резкому контрасту изображения и нагрузке на зрение оператора.

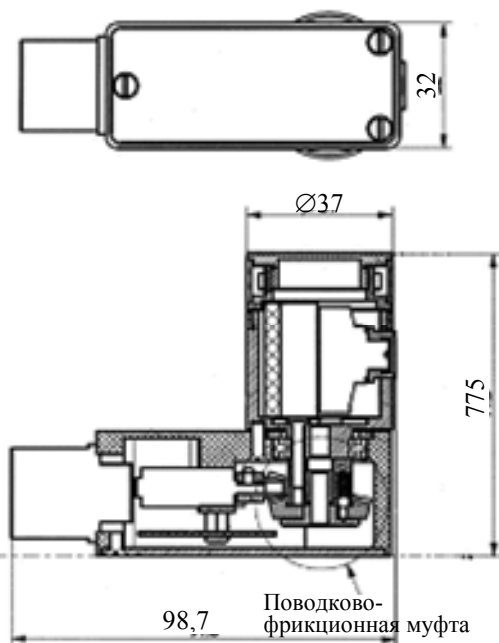


Рис. 2

Анализ рассмотренных вариантов досмотровых систем показал, что комплект технических средств (КТС) „Авиатор“ [8, 11] имеет максимальную длину рабочей части и угол ее поворота, обладает дополнительной подсветкой и видеосистемой привязки к месту досмотра. Кроме того, устройство характеризуется достаточно малой массой, что в

совокупности с указанными характеристиками позволяет увеличить возможности прибора для обнаружения и визуального осмотра скрытых предметов в труднодоступных и плохо освещенных местах, а также обеспечить комфорт проверяющего инспектора.

Однако прибор не позволяет осуществлять досмотр в пространствах меньших чем 44 мм, поэтому для уменьшения габаритов рабочей части прибора, в частности механизма

поворотного узла видеокамеры, требуется изменить конструкцию с применением современной элементной базы (редуктора и видеокамеры). Усовершенствованная конструкция прибора показана на рис. 2. В предложенной конструкции применена поводково-фрикционная муфта, что позволило уменьшить габариты редуктора. Это новшество наряду с применением видеокамеры с современной элементной базой позволяет уменьшить длину поворотного узла с 131,8 до 97,8 мм, а его диаметр с 44 до 32 мм, что в результате будет способствовать повышению качества и надежности досмотровой системы в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://www.avek.ru/equipment/?section_id=90&item_id=692
2. <http://guardmag.com/thesaurus/show/id/145>
3. <http://www.mvision.ru/pentax/epk1000/Pentax-Olympus.htm>
4. <http://endoskop.ru/>
5. <http://www.chipdip.ru/product/8803al.aspx>
6. <http://www.tc-secur.ru/index.php?id=97>
7. <http://ittcom.spb.ru/production.php?id=1>
8. <http://ittcom.spb.ru/production.php?id=2>
9. http://www.allofsafety.ru/index.php?act=showgood&good_id=397
10. <http://oe.eposgroup.ru/production/argus/>
11. Портативная телевизионная система досмотра КТС „Авиатор“ — руководство по эксплуатации. АТЕЦ 437200.230.00.00РЭ. СПб, 2011. 33 с.

Сведения об авторах

- Алексей Александрович Марцук** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов; E-mail: marstrue666@mail.ru
- Андрей Анатольевич Воронин** — канд. техн. наук; НПЦ „Инновационная техника и технологии“, Санкт-Петербург; главный метролог, зам. генерального директора по науке; E-mail: V-electronics@mail.ru
- Амир Маруанович Бурбаев** — доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра компьютеризации и проектирования оптических приборов

Рекомендована кафедрой
компьютеризации и проектирования
оптических приборов СПбНИУ ИТМО

Поступила в редакцию
25.06.12 г.

ИНФОРМАЦИЯ

СООБЩЕНИЕ

О КОНКУРСЕ ВЫПУСКНЫХ КВАЛИФИКАЦИОННЫХ РАБОТ СПЕЦИАЛИСТОВ, БАКАЛАВРОВ, МАГИСТРОВ ПО НАПРАВЛЕНИЯМ „ПРИБОРОСТРОЕНИЕ“, „ОПТОТЕХНИКА“, „ФОТОНИКА И ОПТОИНФОРМАТИКА“, „ЛАЗЕРНАЯ ТЕХНИКА И ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ“ 2012 г.

17-й Всероссийский конкурс выпускных квалификационных работ (ВКР) специалистов, бакалавров, магистров по направлениям „Приборостроение“, „Оптотехника“, „Фотоника и оптоинформатика“, „Лазерная техника и лазерные технологии“ в 2012 г. по традиции проведен Санкт-Петербургским национальным исследовательским университетом информационных технологий, механики и оптики (СПбНИУ ИТМО) — базовым вузом по образованию в области приборостроения и оптотехники. Конкурсы проводятся с 1996 г. по решению Совета учебно-методического объединения по образованию в области приборостроения и оптотехники (далее — Совет УМО). Для координации действий по организации и проведению студенческих олимпиад и конкурсов, в том числе данных конкурсов, в составе УМО создан Совет по студенческим олимпиадам и конкурсам. Совет собирается один-два раза в год и обсуждает методические и другие текущие вопросы организации студенческих олимпиад и конкурсов, проводимых вузами России, реализующими учебные программы высшего профессионального образования в области приборостроения, оптотехники, фотоники и оптоинформатики. Совет координирует всю работу по проведению данных конкурсов. Советом разработана и утверждена методика оценки ВКР, поступивших на конкурс.

Конкурс выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров по направлениям „Приборостроение“, „Оптотехника“, „Фотоника и оптоинформатика“, „Лазерная техника и лазерные технологии“ 2012 г. проводился в соответствии с планом организации Всероссийской студенческой олимпиады 2012 г., в котором указаны сроки и регламент проведения мероприятий олимпиады. Состав оргкомитета, жюри и рабочей группы конкурса утверждены приказом ректора СПбНИУ ИТМО. Этим же приказом утверждено Положение о конкурсе.

С 2006 г. конкурсы ВКР проводятся с использованием электронных средств связи (сети Интернет) на этапах получения и рецензирования работ.

В 2012 г. в рабочую группу конкурса выпускных квалификационных работ по приборостроению, оптотехнике, фотонике и оптоинформатике, лазерной технике и лазерным технологиям поступило 48 работ из 9 вузов РФ. Участниками Всероссийского конкурса ВКР 2012 г. стали: Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых (ВлГУ); Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева, филиал „Восток“ (КНИТУ, „Восток“); Московский государственный университет приборостроения и информатики (МГУПИ); Национальный

исследовательский Томский государственный университет (НИТГУ); Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (СПбНИУ ИТМО); Сибирская государственная геодезическая академия (СГГА); Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР); Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс (ГУ УНПК, Орел); Петрозаводский государственный университет (ПетрГУ).

Среди поступивших на конкурс выпускных квалификационных работ материалы 25 работ апробированы на конференциях различного уровня с публикацией материалов докладов. Авторами работ, представленных к награждению дипломами конкурса, выполнено 30 докладов на различных конференциях. Более 100 работ участников конкурса опубликованы в открытой печати.

Авторы 35 работ использовали при их написании материалы научных статей и конференций.

Материалы сети Интернет использованы авторами при написании 31 работы.

По результатам конкурса определены следующие победители:

I место среди работ бакалавров:

- Кучинская Олеся Игоревна (КНИТУ, „Восток“);
- Альфимов Антон Владимирович (СПбНИУ ИТМО);

II место среди работ бакалавров:

- Эрдыниева Эмилия Жаргаловна (КНИТУ, «Восток»);

III место среди работ бакалавров:

- Повелайтес Наталья Александровна (СГГА);
- Френель Давид Александрович (СПбНИУ ИТМО);
- Фадеев Иван Владимирович (СПбНИУ ИТМО);

I место среди работ специалистов:

- Подмастерьев Алексей Константинович (ГУ УНПК);

II место среди работ специалистов:

- Давлетшина Лилия Аглямовна (КНИТУ, „Восток“);

III место среди работ специалистов:

- Кузнецов Александр Юрьевич (СПбНИУ ИТМО);
- Баландин Алексей Олегович (ВлГУ);
- Ковалева Виктория Викторовна (СГГА) — диплом за качественное выполнение инженерных расчетов;

- Колчанов Андрей Петрович (СГГА);

- Спирин Дмитрий Яковлевич (СГГА);

I место среди диссертаций магистров:

- Литвин Александр Петрович (СПбНИУ ИТМО);

II место среди диссертаций магистров:

- Откеева Анна Викторовна (СПбНИУ ИТМО);
- Куроптев Вадим Андреевич (ПетрГУ);

III место среди диссертаций магистров:

- Скворцов Дмитрий Александрович (СГГА);

Дипломами за практическую ценность работы награждены:

специалисты

- Гудков Юрий Владиславович (СПбНИУ ИТМО);
- Каширин Сергей Сергеевич (МГУПИ),

магистры

— Алехин Артем Андреевич (СПбНИУ ИТМО);

— Лашманов Олег Юрьевич (СПбНИУ ИТМО).

Награды представителям вузов вручены на заседании Совета УМО с подарками, предоставленными спонсорами конкурса — ЗАО НПФ „Уран“.

*Заместитель председателя Совета УМО,
проректор по учебно-методической работе СПбНИУ ИТМО
А. А. ШЕХОНИН*

*Председатель рабочей группы конкурса
С. С. ГВОЗДЕВ*

*Член рабочей группы конкурса
С. А. АЛЕКСЕЕВА*

SUMMARY

P. 5—9.

METHOD FOR EVALUATION OF THE MAGNITUDE OF SOLAR RADIATION REFLECTED BY INTERNATIONAL SPACE STATION

A technique of calculating reflected solar radiation magnitude of the International Space Station (ISS) is presented. The method is based on the use of the brightness factor as an optical characteristic of the light reflected by the station and description of the reflecting surface as a superposition of cylindrical, conical, spherical and flat elements. An algorithm and software for calculation of the ISS magnitude as a function of the station and observer orientation angles are developed. The results of calculation are compared with data obtained from the Internet and special measurements.

Keywords: stellar magnitude, International Space Station, reflection coefficient of overall brightness.

Data on authors

- Vasily M. Tymkul* — Cand. Techn. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Nanosystems and Optotechnology, Novosibirsk; E-mail: kaf.oep@ssga.ru
- Lyubov V. Tymkul* — Cand. Techn. Sci., Professor; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Nanosystems and Optotechnology, Novosibirsk; E-mail: kaf.oep@ssga.ru
- Yury A. Fesko* — Post-Graduate Student; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Nanosystems and Optotechnology, Novosibirsk; E-mail: y.a.fesko@gmail.com
- Kirill V. Kudryashov* — Master of Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Nanosystems and Optotechnology, Novosibirsk; E-mail: kir-kudryashov@yandex.ru
- Svatlana V. Lugovskiyh* — Bachelor of Sci.; Siberian State Academy of Geodesy, Department of Nanosystems and Optotechnology, Novosibirsk; E-mail: mumak2004@yandex.ru

P. 10—14.

WAY TO IMPROVE RESOLUTION OF SPECTROPHOTOMETER WITH CONCAVE DIFFRACTION SCREEN

Resolution of spectrophotometer Cedar-M designed for analysis of wood species is considered. The possibility of improvement of the instrument resolution by variation of the diffraction lattice the operation area is demonstrated. A numerical method to calculate the intensity distribution over the circle of confusion and resolution of the spectrum analyzer with concave diffraction screen is presented.

Keywords: concave diffraction screen, order of spectrum, resolution, circle of confusion.

Data on authors

- Maria V. Smirnova* — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design, E-mail: listsv@mail.ru
- Andrey A. Voronin* — Cand. Techn. Sci.; Joint-Stock Company Research-and-Production Centre “Innovational Technique and Technologies”, St. Petersburg; Deputy Director General for Science; E-mail: V-electronics@mail.ru
- Amir M. Burbaev* — Associate Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design

P. 14—18.**METHOD TO MEASURE POLARIZATION SENSITIVITY OF OPTICAL RADIATION DETECTOR**

A new method is proposed for measurement of sensitivity of optical detector to polarization of incident radiation. The method is based on harmonic analysis of output signal of the detector in “polarizer – discreet analyzer – detector” setup. The method accuracy is estimated with the use of digital modeling of the measurement errors. Results of experimental study of polarization sensitivity of silicon photodiodes and optical pyrometers are presented.

Keywords: polarization sensitivity of the receiver, ellipsometry.

Data on authors

- Sergey A. Alekseev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics;
E-mail: alekseev@grv.ifmo.ru
- Nikolay V. Matveev** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics;
E-mail: matveev_nv@mail.ru

P. 18—21.**ANALYSIS OF THE EFFECT OF CROSS-INTERFERENCE ON SHEARING INTERFEROMETER ACCURACY**

Operation of a shearing interferometer as an element of interference fringes adjustment for processing of double-exposure holograms of diffuse reflecting object is considered. Theoretical analysis of the impact of cross-interference on error in fringe phase measurement is presented.

Keywords: holography, interference, shearing interferometer.

Data on authors

- Oleg P. Bolshakov** — Dr. Med. Sci., Professor; St. Petersburg Pavlov State Medical University, Department of Operative Surgery and Clinical Anatomy; E-mail: irkotov@mail.ru
- Igor R. Kotov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Pavlov State Medical University, Laboratory of Holography; E-mail: irkotov@mail.ru
- Evgeny E. Mayorov** — Cand. Techn. Sci.; Northwest Mechnikov State Medical University, Department of Medical Informatics and Physics;
E-mail: mayorov_ee@mail.ru
- Victor T. Prokopenko** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics;
E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru

P. 21—25.**DESIGN OF CHANNEL WAVEGUIDES GEOMETRY FOR ELECTRO-OPTICAL MODULATORS**

A method for design of geometrical parameters of channel waveguides is presented. The proposed approach is based on the effective refractive index method.

Keywords: channel waveguide, effective index method.

Data on authors

- Tatiana V. Yakovleva** — Master of Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems;
E-mail: tatianayako@yandex.ru
- Natalia N. Arefeva** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optics of Quantum Sized Systems; Assistant;
E-mail: natali-arefeva@rambler.ru

P. 25—30.

MODELING OF INTEGRATING SPHERE WITH A BAFFLE

Numerical modeling of integrating sphere is performed for the case of additional baffle introduced to prevent incidence of direct radiation from emitter positioned near the sphere center upon the measured sample (diffuse reflector). Results of calculation of irradiance distribution inside the sphere under examination are presented.

Keywords: integrating sphere, irradiance, diffuse reflection index, photometric accuracy.

Data on authors

- Nikolay P. Belov* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; Senior Scientist
- Vladimir N. Grisimov* — Dr. Med. Sci., Professor; St. Petersburg Pavlov State Medical University, Laboratory of Laser and Fiberoptic Technologies; E-mail: vngrisimov@gmail.com
- Aleksandra S. Sherstobitova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics; E-mail: ashev87@mail.ru
- Andrey D. Yaskov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics

P. 31—34.

MODELING OF MULTI-ELEMENT RADIATION SOURCE

Digital model of multi-element color radiation source is developed on the base of representation of spatial distribution of the irradiation by a linear combination of Lambert functions. The derived equations may be used in design of sources on the base of LED structures.

Keywords: multi-element radiation source, LED matrix, chromaticity.

Data on author

- 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; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Vladimir S. Peretyagin* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: peretyagin@mail.ru
- Alexander N. Chertov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: a.n.chertov@mail.ru

P. 34—39.**STEREOSCOPIC SYSTEM FOR RAILWAY TRACK POSITION CONTROL**

An optical-electronic stereoscopic system is designed for railway track position control. Results of the system tests are presented.

Keywords: railway track position control, stereoscopic system, test bed experiments, measurement error.

Data on authors

- Konstantin G. Arakantsev** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: kostya3312@yandex.ru
- 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: gorbachyov@grv.ifmo.ru
- Mariya G. Serikova** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: serikovamg@gmail.com

P. 40—44.**DETECTION OF HEATED SMALL-SIZED OBJECT IN IR-SPECTRAL RANGE**

The problem of shell detection with the use of large-dimension IR optical systems and uncooled bolometric type TV matrix is considered.

Keywords: artillery reconnaissance, photo receiver, optical-mechanical system.

Data on authors

- Vladimir A. Golovkov** — Cand. Techn. Sci.; Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad Region; E-mail: golovkov_ggg@mail.ru
- Vladislav N. Emelyanov** — Dr. Techn. Sci., Professor; Ustinov Baltic State Technical University, Department of Plasmogazodinamic and Heating Engineering, St. Petersburg, E-mail: ve5303@mail.ru
- Sergey V. Solk** — Cand. Techn. Sci.; Scientific Research Institute for Optoelectronic Instrument Engineering, Sosnovy Bor, Leningrad Region; E-mail: solk@sbor.net

P. 45—51.**OBJECT-ORIENTED TECHNOLOGY FOR CREATION OF VIRTUAL WORKING PLACES USING CLOUD COMPUTING ENVIRONMENT CLAVIRE**

Technology of automated design of virtual working places within the eScience paradigm framework is considered. An automated tool on the base of cloud computing environment CLAVIRE is developed. The tool potentials in development of cloud services for various applications are demonstrated.

Keywords: composite application, cloud computing, object-oriented language, intelligent editor, cloud service.

Data on authors

- Alexey V. Dukhanov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, eScience Research Institute; E-mail: dukhanov@niuitmo.ru
- Ekaterina V. Bolgova** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, eScience Research Institute; Junior Scientist; E-mail: bolgova@gmail.com
- Lev R. Gervich** — Post-Graduate Student; Southern Federal University, Department of Algebra and Discreet Mathematics, Rostov-on-Don; E-mail: lgerwith@gmail.com
- Vasily G. Kolpakov** — Post-Graduate Student; Kharkevich Institute for Information Transmission Problems of Russian Academy of Sciences, Department of Distributed Calculations, Moscow; E-mail: vasilykolpakov@gmail.com

- Evgeny N. Kravchenko* — Post-Graduate Student; Southern Federal University, Department of Algebra and Discreet Mathematics, Rostov-on-Don; E-mail: peon_sxe@ gmail.com
- Iliia I. Kurochkin* — Institute of Systems Analysis of Russian Academy of Sciences, Department of Distributed Calculations, Moscow; Senior Scientist; E-mail: qurochkin@ gmail.com
- Evgeny D. Maslennikov* — Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center; Technician; E-mail: ixidiciti@ gmail.com
- Igor V. Oferkin* — Lomonosov Moscow State University, Research Computing Center; Technician; E-mail: oferkin@ physics.msu.ru
- Anton O. Rubtsov* — Institute of Systems Analysis of Russian Academy of Sciences, Department of Distributed Calculations, Moscow; Senior Scientist; E-mail: rubtsov493@ gmail.com
- Sergey A. Smirnov* — Institute of Systems Analysis of Russian Academy of Sciences, Department of Distributed Calculations, Moscow; Engineer; E-mail: sasmir@ gmail.com
- Oleg B. Shteinberg* — Southern Federal University, Department of Algebra and Discreet Mathematics, Rostov-on-Don; Assistant Lecturer; E-mail: olegsteinb@ gmail.com
- Mikhail V. Yurushkin* — Post-Graduate Student; Southern Federal University, Department of Algebra and Discreet Mathematics, Rostov-on-Don; E-mail: m.yurushkin@ gmail.com

P. 52—57.

APPLICATION OF SUPERCOMPUTERS TO MATHEMATICAL MODELING OF FILTRATION PROCESSES IN PERCOLATION LATTICE

Numerical simulation of dynamic percolation model (DPM) for oil field flooding is realized in supercomputers with GPU. An algorithm for workload balance is proposed. Modeling is carried out for a lattice consisting of 10^9 points.

Keywords: petroleum production, GPU, percolation, pseudorandom number generation, Monte-Carlo method, workload balance.

Data on author

- Mikhail N. Voronyuk* — Post-Graduate Student; Moscow State Technological Institute, Department of Information Systems; E-mail: voronyukm@gmail.com

P. 58—62.

LANGUAGE FOR DESCRIBING INFORMATION PROCESSING ALGORITHMS IN ENGINEERING SYSTEMS

An object-feature language is proposed for describing the structure of complicated engineering systems, spatial arrangement of such systems, characteristics of systems and their components, information links as well as models of operation and information processing algorithms.

Keywords: engineering system, object-feature language, description, structure, algorithm.

Data on authors

- Alexander A. Lyamkin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Electrotechnical University LETI, Department of Automated Control Systems; E-mail: alex-ljamkin@yandex.ru
- Nikolay P. Mikulenko* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Electrotechnical University LETI, Department of Automated Control Systems; E-mail: nmikulenko@yandex.ru
- Tatyana F. Trevgoda* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Electrotechnical University LETI, Department of Automated Control Systems; E-mail: tat.trevgoda@yandex.ru

P. 63—70.**SEGMENTATION OF TEXTURED IMAGES USING FRACTAL METHODS**

Fractal methods of segmentation of color texture images for automated texture processing systems are developed and studied. The texture color characteristics are used as additional indicators to improve the segmentation effectiveness. Peculiarities of texture synthesis on the base of fractal features are considered.

Keywords: fractal, fractal dimension, fractal synthesis, segmentation, texture.

Data on authors

- Valery T. Fisenko** — Cand. Techn. Sci.; Kometa Open Joint-Stock Company, Scientific Design Centre of Electro-Optical Surveillance Systems, St. Petersburg; Director;
E-mail: valery@eoss.ru
- Tatyana Yu. Fisenko** — Cand. Techn. Sci.; Kometa Open Joint-Stock Company, Scientific Design Centre of Electro-Optical Surveillance Systems, St. Petersburg; E-mail: tatiana@eoss.ru

P. 71—75.**SETUP FOR DETERMINATION OF DYNAMIC CHARACTERISTICS OF HEAT FLUX SENSORS**

An experimental setup providing nonstationary heat flux for measurement of dynamic characteristics of flux sensors is developed. Results of experiments demonstrate the possibility of using battery heat flux sensor (Gerashchenko sensor) for nonstationary heat measurements.

Keywords: unsteady heat measurements, Gerashchenko sensor, inverse heat conduction problem, parametric identification.

Data on authors

- Nikolay V. Pilipenko** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: Pilipenko38@mail.ru
- Georgiy V. Polschikov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: polschikov@list.ru
- Ivan A. Sivakov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: I.A.Sivakov@gmail.com; SivakovIA@mail.ru

P. 76—79.**MAINTAINING THERMAL STABILITY OF THE EARTH REMOTE-SENSING SPACE-BASED TELESCOPE BY THE LENS HOOD PARAMETERS OPTIMIZATION**

The problem of thermal stability of space-based telescope for remote sensing of the Earth is discussed. The concept of background temperature of the telescope pupil is introduced to characterize deviation of the instrument thermal regime from the initial value realized in the stand-by mode with closed pupil cap. A formula is derived to describe dependence of desired operating temperature of the lens hood on present background temperature at the entrance pupil of the telescope, and on the ratio of the lens hood length to the pupil diameter.

Keywords: space telescope, lens hood, view factor, thermal condition, radiative heat transfer.

Data on authors

- Yulia V. Bayova** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring; E-mail: yul.bayo@yandex.ru
- Sergey I. Khankov** — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Thermal Physics and Energy-Physical Monitoring

P. 79—84.

PREDICTION AND CORRECTION OF FIBER-OPTIC GYROSCOPE THERMAL DRIFT

A method for algorithmic prediction of fiber-optic gyroscope drift under external thermal variations is developed. Justification of the proposed method is carried out, results of the algorithm application for correction of cyclic thermal tests of the device are presented.

Keywords: fiber-optic gyroscope, thermal drift, sensitivity sensor, prediction, correction, calculation, thermometry.

Data on authors

- Evgeny I. Vahrameev* — Cand. Techn. Sci.; Perm National Research Polytechnic University, Department of Heating Technology; E-mail: abins@pstu.ru
- Konstantin S. Galyagin* — Cand. Techn. Sci.; Perm National Research Polytechnic University, Department of Heating Technology; E-mail: abins@pstu.ru
- Alexander S. Ivonin* — Post-Graduate Student; Perm National Research Polytechnic University, Department of Thermotechnics; E-mail: alex_sambist@mail.ru
- Mikhail A. Oshivalov* — Cand. Techn. Sci.; Perm National Research Polytechnic University, Department of Heating Technology; E-mail: abins@pstu.ru

P. 85—90.

METHODS OF FORMATION OF AERODINAMIC PROFILE OF GAS BEARING

Features of formation of aerodynamic profile of gas bearing with the use of laser processing technology and ion etching are studied. A technology of formation of aerodynamic profile of variable depth at half-spherical part is proposed.

Keywords: gas bearing, aerodynamic profile, laser marking, ion etching.

Data on authors

- Svetlana A. Yakovleva* — Post-Graduate Student; The State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg; E-mail: yorkunoi@gmail.com
- Alexander G. Scherbak* — Dr. Techn. Sci.; The State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg; Head of Department; E-mail: a_sch@gtn.ru
- Sergey N. Belyaev* — Cand. Techn. Sci.; The State Research Center of the Russian Federation — Concern CSRI Elektropribor, JSC, St. Petersburg; Senior Scientist; E-mail: serenible@mail.ru

P. 91—93.

THERMAL ANNEALING OF BRAGG GRATING ON MANUFACTURING OF FIBER-OPTIC PHASE SENSOR

A method is proposed for fabrication of fiber-optic phase sensor with the use of thermal annealing of fiber Bragg grating. Optimal conditions of the annealing for Bragg gratings with the required spectral properties are determined.

Keywords: fiber Bragg grating, thermal annealing, fiber-optic phase sensor, fiber-optic hydrophone.

Data on authors

- Igor K. Meshkovsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology; E-mail: igorkm@spb.runnet.ru
- Sergey V. Varzhel* — Cand. Phys.-Math. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology; E-mail: vsv187@gmail.com

- Mikhail N. Belikin** — Master of Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology; E-mail: mbelikin@gmail.com
- Andrey V. Kulikov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Communications Physics and Technology; E-mail: a.kulikov86@gmail.com
- Vyacheslav S. Brunov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Material Science; E-mail: brunov@oi.ifmo.ru

P. 94—98.

METHOD OF LASER ULTRASONIC QUALITY CONTROL OF SOLDERED JOINT

Basic principles of a laser ultrasonic technique for quality control of soldered joints of thin-walled elements of space-rocket equipment are formulated. Results of approbation of the developed technique with real samples of liquid rocket engines chambers are presented.

Keywords: laser ultrasonic control, space-rocket equipment, nondestructive control, soldering.

Data on authors

- Igor Yu. Kinzhagulov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measurement Technologies and Computer Tomography; E-mail: kinzhiki@mail.ru
- Vladimir A. Bychenok** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Measurement Technologies and Computer Tomography; E-mail: bychenok-vladimr@mail.ru

P. 99—101.

ANALYSIS OF MEANS FOR UNAUTHORIZED OBJECT DETECTION

Analysis of existing customs examination means used at transportation facilities checking points are analyzed. A design of improved rotary unit for customs examination system is proposed.

Keywords: television customs system, visual inspection, unauthorized object detection, customs control.

Data on authors

- Alexey A. Martsukov** — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design; E-mail: marstrue666@mail.ru
- Andrey A. Voronin** — Cand. Techn. Sci.; Joint-Stock Company Research-and-Production Centre “Innovational Technique and Technologies”, St. Petersburg; Chief Metrologist; Deputy Director General for Science; E-mail: V-electronics@mail.ru
- Amir M. Burbaev** — Associate Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical Instruments Computerization and Design