

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Мионов В. И., Мионов Ю. В., Юсупов Р. М.** Регуляризация вариационных оценок параметров состояния нелинейных динамических систем 5
- Рубина И. С., Тропченко А. Ю.** Исследование алгоритмов выбора опорных пикселей в задачах выделения сегментов кадра видеопоследовательности 9
- Гирина Н. В.** Оценка вероятности первого пересечения уровней гауссовыми марковскими последовательностями 15
- Андронов В. Г., Дегтярёв С. В., Лазарева Е. В.** Фотограмметрическая модель космических панорамных изображений 19

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

- Никифоров В. В., Шкиртиль В. И.** Составное блокирование взаимосвязанных задач в системах на многоядерных процессорах 25
- Демин А. В., Гатчина Ю. Ю., Жуков С. И.** Численное моделирование светолокационных систем 31
- Аллес М. А., Соколов С. В., Ковалев С. М.** Оптические нечетко-логические устройства 34

ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ

- Пирогов С. П., Чуба А. Ю.** Расчет частот собственных колебаний манометрических трубчатых пружин 39
- Майоров В. С.** Метод повышения надежности гидродинамических подшипников скольжения 43
- Красильников А. В.** Проектное обоснование конструктивно-технологических характеристик устройства торможения движущегося подводного аппарата 48

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Знатдинов С. И.** Теорема отсчетов для комплексного и действительного сигналов 53
- Юрков К. В., Петров С. Е.** О двух подходах к параметрическому кодированию стереосигнала 57
- Кузнецов В. Н., Гранкин А. С.** Разработка теплового сканера для исследования электромагнитного поля в волноводной линии передачи 62

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Илларионов А. И., Иванов М. С. Нелинейно-оптический метод измерения величины сферической аберрации германиевых линз в инфракрасной области спектра	68
Беломутская П. С., Данилова Т. М., Храмцовский И. А. Определение оптических характеристик элементов лазерной техники методом внутрирезонаторных потерь излучения	73
Зонов Р. Г., Стяпшин В. М., Михеев Г. М. Гониометрическое устройство для исследования угловых зависимостей оптоэлектрического отклика в проводящих пленках.....	79
SUMMARY (<i>перевод Ю. И. Копилевича</i>).....	83

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

Mironov V. I., Mironov Yu. V., Yusupov R. M. Regularization of Variational Estimations of Nonlinear Dynamic System State Parameters	5
Rubina I. S., Tropchenko A. Yu. Analysis of Reference Point Selection Algorithms in Segment Frames Classification in Video Sequence	9
Girina N. V. Estimation of Probability of the First Levels-Crossing of Gaussian Markov Sequence.....	15
Andronov V. G., Degtyarev S. V., Lazareva E. V. Photogrammetric Model of Space Panoramic Images.....	19

COMPUTING TECHNIQUE

Nikiforov V. V., Shkirtil V. I. Composite Blocking of Cooperative Tasks in Systems with Multi-Core Processors	25
Demin A. V., Gatchina Yu. Yu., Zhukov S. I. Digital Modeling of Lidar Systems.....	31
Alles M. A., Sokolov S. V., Kovalev S. M. Optical Fuzzy-Logic Devices.....	34

FINE MECHANICS DEVICES

Pirogov S. P., Chuba A. Yu. Calculation of Natural Vibrations Frequencies of Manometric Tubular Springs.....	39
Mayorov V. S. Enhancement of the Hydrodynamic Bearing Reliability	43
Krasilnikov A. V. Technical and Constructive Justification of Design of a Moving Underwater Vehicle Braking Device	48

ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

Ziatdinov S. I. The Theorem of Samples for Complex and Real Signals.....	53
Yurkov K. V., Petrov S. E. On Two Approaches to Parametric Encoding of Stereo Signal.....	57
Kuznetsov V. N., Grankin A. S. Development of a Thermal Scanner for Electromagnetic Field in Waveguide Transmission Line.....	62

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

Illarionov A. I., Ivanov M. S. Nonlinear-Optical Method for Measuring Spherical Aberration of Germanium Lenses in the Infrared	68
Belomutskaya P. S., Danilova T. M., Khramtsovsky I. A. Determination of Optical Characteristics of Laser Hardware Elements by Intracavity Loss Method	73
Zonov R. G., Styapshin V. M., Mikheev G. M. A Goniometrical Device for Investigation of Angle Dependences of Photovoltage Response of Conductive Films.....	79
SUMMARY	83

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

В. И. МИРОНОВ, Ю. В. МИРОНОВ, Р. М. ЮСУПОВ

РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ВАРИАЦИОННЫХ ОЦЕНОК ПАРАМЕТРОВ СОСТОЯНИЯ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Рассматриваются методические аспекты применения вариационного подхода для регуляризации решения задач статистического оценивания параметров состояния нелинейных динамических систем по критерию максимального правдоподобия при дискретных измерениях.

Ключевые слова: статистическое оценивание, регуляризация, нелинейные динамические системы, критерий максимального правдоподобия.

Введение. Разработка, испытания и эксплуатация образцов авиационной и ракетно-космической техники, а также других сложных автоматических и автоматизированных систем и комплексов различного целевого назначения часто связаны с решением задач оценивания параметров состояния и характеристик динамических систем по результатам измерений.

Наиболее сложные задачи оценивания приходится, в частности, решать при навигационно-баллистическом обеспечении полетов космических аппаратов (КА), при разработке систем автономной навигации, в ходе летных испытаний и др.

На практике нередко возникают ситуации, связанные с недостаточной наблюдаемостью или обусловленностью задач статистического оценивания. Эффективным средством решения таких задач является метод регуляризации, предложенный А. Н. Тихоновым для решения некорректных обратных задач и развитый во многих работах [1—4 и др.].

Методология решения задач такого рода предусматривает формирование так называемого стабилизирующего функционала и в основном базируется на непосредственном применении в динамических задачах оценивания прямых условий метода максимального правдоподобия (ММП) и метода наименьших квадратов [1, 2, 5—7 и др.].

Вместе с тем необходимо отметить, что создание и развитие методов, применяемых в теории оптимальной обработки измерений, как и в теории оптимального управления, может быть основано на использовании вариационных условий оптимальности статистических оценок. В работах [8—11 и др.] были рассмотрены вопросы обоснования вариационного подхода к задачам статистического оценивания нелинейных динамических систем. Настоящая статья посвящена методическим аспектам применения вариационного подхода для регуляризации решения плохо обусловленных задач статистического оценивания параметров состояния нелинейных динамических систем по критерию максимального правдоподобия при дискретных измерениях.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу оценивания параметров движения динамического объекта, которая заключается в определении по некоторому критерию n -мерного вектора его исходного состояния x_0 на заданный начальный момент времени $t = t_0$ по результатам

измерений, проводимых в N точках, заданных на интервале измерений $\tau = T - t_0$.

Пусть динамика объекта описывается векторным дифференциальным уравнением

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t), \quad \mathbf{x}(t_0) = \mathbf{x}_0, \quad t \in [t_0, T].$$

Определяется m -мерный вектор

$$\boldsymbol{\psi}(t) = \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t)].$$

Измеренное значение вектора $\boldsymbol{\psi}$ в момент t_i обозначим как $\mathbf{y}(t_i) = \mathbf{y}_i$ и представим модель измерений в виде

$$\mathbf{y}(t_i) = \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)] + \boldsymbol{\delta}_i, \quad i = 1(1)N, \quad t_i \in [t_0, T].$$

Здесь $\boldsymbol{\delta}_i$ — m -мерный вектор случайных ошибок измерений, стохастическое изменение которого зададим некоторым многомерным непрерывным дифференцируемым распределением $f(\boldsymbol{\delta}_i, \boldsymbol{\alpha}_i)$ с параметрами $\boldsymbol{\alpha}_i$, отличающимся в общем случае от нормального распределения.

При выполнении известных условий наблюдаемости (хорошей обусловленности) требуется найти такую оценку вектора \mathbf{x}_0 , которая обеспечивает минимальное значение функционала

$$I = \sum_{i=1}^N \rho_i \{ \mathbf{y}(t_i), \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)], \boldsymbol{\alpha}_i \}, \quad (1)$$

где

$$\rho_i = -\ln f_i \{ \mathbf{y}(t_i) - \boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i), \boldsymbol{\alpha}_i] \}, \quad i = 1(1)N.$$

Функции $\boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t)$ и $\boldsymbol{\psi}[\mathbf{x}(t_i)]$ будем считать однозначными, ограниченными, непрерывными и дифференцируемыми по всем аргументам во всей области их определения.

Очевидно, что функционал (1) есть не что иное, как логарифмическая функция правдоподобия.

Вариационные условия оптимальности оценок. Для решения указанной задачи в работе [9] с использованием традиционных приемов вариационного исчисления определены условия оптимальности оценок вариационного типа, которые сформулированы следующим образом.

Оптимальная оценка вектора \mathbf{x}_0 и порождаемая ею оптимальная траектория $\mathbf{x}(\mathbf{x}_0, t)$ доставляют решение двухточечной краевой задаче для канонической системы

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t), \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \boldsymbol{\varphi}^T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} \quad (2)$$

при граничных условиях

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \mathbf{0}; \quad \boldsymbol{\lambda}(T) = \mathbf{0}; \quad \boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \frac{\partial \rho}{\partial \mathbf{x}} [\mathbf{y}_i, \boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}_i), t_i]^T, \quad (3)$$

где $\boldsymbol{\lambda}$ — n -мерная вектор-функция сопряженных переменных.

Таким образом, рассматриваемую задачу можно интерпретировать как двухточечную краевую задачу с промежуточными ограничениями на значение сопряженного вектора $\boldsymbol{\lambda}(t)$.

Приведенные условия оптимального оценивания (2), (3) нетрудно конкретизировать применительно к заданному виду распределения вектора случайных ошибок измерений.

Так, если для вектора $\boldsymbol{\delta}_i$ принимается нормальное распределение $N(0, \mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i})$ с нулевым вектором математического ожидания и корреляционной матрицей $\mathbf{K}_{\boldsymbol{\delta}_i}$, что, как правило,

имеет место на практике, решение задачи оптимального оценивания сводится к решению краевой задачи

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t), \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}^T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda}; \quad (4)$$

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \mathbf{0}; \quad \boldsymbol{\lambda}(T) = \mathbf{0}; \quad \boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \frac{\partial \boldsymbol{\Psi}^T}{\partial \mathbf{x}} \mathbf{K}_{\delta_i}^{-1} \{\mathbf{y}_i - \boldsymbol{\Psi}[\mathbf{x}(t_i)]\}, \quad i = 1(1)N. \quad (5)$$

Регуляризация оптимальных статистических оценок. В случае плохой обусловленности исходной задачи в соответствии с методом регуляризации [3] в качестве ее приближенного решения следует принять такое значение вектора \mathbf{x}_0 , на котором сглаживающий функционал

$$I_\alpha = I(\mathbf{x}_0) + \alpha F(\mathbf{x}_0) \quad (6)$$

принимает экстремальное значение.

Выбор стабилизирующего функционала (стабилизатора) $F(\mathbf{x}_0)$ определяется характером решаемой задачи и обычно основан на априорной информации об искомых параметрах \mathbf{x}_0 . Параметр регуляризации $\alpha > 0$ также должен быть определенным образом согласован и с априорными данными о векторе \mathbf{x}_0 , и с характеристиками ошибок измерений.

Необходимые условия оптимальности регуляризованных оценок вариационного типа применительно к функционалу I_α (6) могут быть определены аналогично рассмотренным в работе [9], либо на основе анализа и использования вариационных условий оптимальности, приведенных выше.

Действительно, применение функционала (6) эквивалентно дополнению к функционалу (1) слагаемого

$$\rho_0[\mathbf{x}(t_0)] = \alpha F(\mathbf{x}_0).$$

Тогда в системе условий (4), (5) появляется дополнительное граничное условие

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_0^-) + \frac{\partial \rho_0(\mathbf{x}_0)^T}{\partial \mathbf{x}_0}.$$

Так как, согласно условиям (5), $\boldsymbol{\lambda}(t_0^-) = \mathbf{0}$, то при регуляризации оптимальных оценок интегрирование сопряженной системы должно проводиться при начальном условии

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \frac{\partial \rho_0(\mathbf{x}_0)^T}{\partial \mathbf{x}_0} = \alpha \frac{\partial F(\mathbf{x}_0)^T}{\partial \mathbf{x}_0}.$$

Соответствующий результат сформулируем применительно к нормальному закону распределения ошибок измерений в виде следующей теоремы.

Теорема. Регуляризованная оценка вектора \mathbf{x}_0 и порождаемая ею регуляризованная траектория $\mathbf{x}(\mathbf{x}_0, t)$ доставляют решение двухточечной краевой задачи для канонической системы

$$\dot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\varphi}(\mathbf{x}, t), \quad \dot{\boldsymbol{\lambda}} = -\frac{\partial \boldsymbol{\Phi}^T}{\partial \mathbf{x}} \boldsymbol{\lambda} \quad (7)$$

при граничных условиях

$$\boldsymbol{\lambda}(t_0) = \alpha \frac{\partial F(\mathbf{x}_0)^T}{\partial \mathbf{x}_0}; \quad \boldsymbol{\lambda}(T) = \mathbf{0}; \quad \boldsymbol{\lambda}(t_i^+) = \boldsymbol{\lambda}(t_i^-) + \frac{\partial \boldsymbol{\Psi}^T(t_i)}{\partial \mathbf{x}_i} \mathbf{K}_{\delta_i}^{-1} \{\mathbf{y}_i - \boldsymbol{\Psi}[\mathbf{x}(t_i)]\}, \quad i = 1(1)N. \quad (8)$$

Полученные условия оптимальности можно конкретизировать для типовых задач, связанных с определением регуляризованных оценок при различных структурах стабилизатора $F(\mathbf{x}_0)$.

В частности, при решении задач навигационного оценивания обычно для стабилизирующего функционала принимается выражение следующего вида [2]:

$$\alpha F(\mathbf{x}_0) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_0)^T \mathbf{C}(\mathbf{x}_b - \mathbf{x}_0),$$

где \mathbf{x}_b — заданный опорный вектор, близкий к истинному значению \mathbf{x}_0 ; \mathbf{C} — некоторая симметрическая положительно-определенная матрица.

В этом случае начальное значение сопряженного вектора $\lambda(t_0)$ по условиям (8) определяется в соответствии с расчетным соотношением:

$$\lambda(t_0) = \mathbf{C}(\mathbf{x}_0 - \mathbf{x}_b).$$

Для поиска оптимальных регуляризованных оценок можно использовать известные методы численного решения краевых задач (метод Ньютона, градиентные методы, их модификации, метод приближенного корректирующего оператора [10] и др.).

В заключение отметим, что предлагаемые методические средства могут быть использованы при разработке и модернизации алгоритмов оптимального оценивания параметров состояния нелинейных динамических объектов различных типов в составе автоматизированных комплексов обработки наблюдений.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 09-08-00259.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Статистические методы обработки результатов наблюдений / Под ред. Р. М. Юсупова. М.: МО СССР, 1984. 563 с.
2. Степанов М. Г. Введение в теорию смещенного оценивания параметров движения космических аппаратов по ограниченным данным. СПб: ВИККА им. А. Ф. Можайского, 1993. 135 с.
3. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979. 288 с.
4. Тихонов А. Н., Гончарский А. В., Степанов В. В., Ягола А. Г. Регуляризирующие алгоритмы и априорная информация. М.: Наука, 1983. 200 с.
5. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. М.: Физматгиз, 1958. 350 с.
6. Репин В. Г., Тартаковский Г. П. Статистический синтез при априорной неопределенности и адаптация информационных систем. М.: Сов. радио, 1977. 432 с.
7. Эльясберг П. Е. Определение движения по результатам измерений. М.: Наука, 1976. 416 с.
8. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Адекватность прямого и вариационного подходов в задачах оценивания состояния нелинейных динамических систем при гауссовских ошибках измерений // Мехатроника, автоматизация, управление. 2010. № 11. С. 9—11.
9. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Вариационное оценивание состояния нелинейной динамической системы по критерию максимального правдоподобия // Там же. 2009. № 11. С. 2—6.
10. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Метод наименьших квадратов в задачах вариационного оценивания состояния нелинейных динамических систем // Информационно-управляющие системы. 2009. № 6. С. 2—6.
11. Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М. Синтез итерационных алгоритмов решения краевых задач и нелинейных уравнений // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 1. С. 9—14.

Сведения об авторах

- Вячеслав Иванович Миронов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН; вед. науч. сотрудник;
E-mail: mironuv@yandex.ru
- Юрий Вячеславович Миронов** — д-р техн. наук; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН; ст. науч. сотрудник; E-mail: mironuv@yandex.ru
- Рафаэль Мидхатович Юсупов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН; директор; E-mail: spiiiran@iias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию
02.08.11 г.

УДК 004.627

И. С. РУБИНА, А. Ю. ТРОПЧЕНКО

**ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ВЫБОРА ОПОРНЫХ ПИКСЕЛОВ
В ЗАДАЧАХ ВЫДЕЛЕНИЯ СЕГМЕНТОВ
КАДРА ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ**

Предложена схема выделения опорных пикселей, основанная на исследовании существующих алгоритмов и возможности их применения в задачах классификации сегментов кадра видеопоследовательности.

Ключевые слова: сегментный подход, блок переменного размера, опорные точки, классификация сегментов, компенсация движения.

Введение. Задача классификации сегментов кадра возникает при компенсации движения объектов в целях устранения временной избыточности видеоряда, предполагающей наличие подобия соседних кадров видеопоследовательности. Кроме того, разделение сегментов на группы в соответствии с некоторым признаком позволяет осуществить приближение к объектному подходу, что обеспечивает возможность более гибкого манипулирования содержимым видеоряда, а также решения таких прикладных задач, как выявление факта движения и определение траектории движущихся объектов.

Выбор данного подхода к компенсации движения объектов естественных видеосцен обусловлен возможностью устранения значительного количества недостатков решений, основанных на попиксельном подходе, характеризующемся высокой трудоемкостью алгоритма, и объектном подходе, отличающемся сложностью определения формы объекта прогнозирования.

Исходными данными для подобного рода задач являются прямоугольные блоки (сегменты), каждому из которых соответствует вектор движения, устанавливающий связь блоков двух соседних кадров с максимальным значением коэффициента их соответствия и определяющий параметры параллельного переноса. Разделяя объекты на классы, можно в значительной степени сократить количество векторов движения. Необходимо заметить, что согласно ряду исследований выбор критерия соответствия не влияет существенно на качество компенсации движения [1], в связи с чем следует руководствоваться требованием минимума вычислительных затрат.

Подход к устранению временной избыточности видеопоследовательности на основе блоков можно реализовать при помощи сегментов фиксированного и переменного размера. При этом выбор размера блока всегда является компромиссом, так как использование большего количества мелких блоков позволяет более подробно описывать движение в рамках кадра посредством уменьшения степени сжатия за счет увеличения количества передаваемой

информации о движении. Алгоритм компенсации движения на основе блоков переменного размера позволяет нивелировать данное ограничение за счет применения малых блоков для областей с мелкими деталями и динамичным движением и больших блоков для однородных областей типа „фон“. Как показали эксперименты, применение этого алгоритма для одной и той же видеопоследовательности обеспечивает сокращение потока векторов движения на 60 % по сравнению с подходом, основанным на использовании блоков фиксированного размера [2].

Однако даже в рамках данного подхода возникает ряд проблем. Для блоков большого размера выбор размера сегмента осуществляется по принципу мажоритарности, что способствует поглощению малых областей плавного движения. Кроме того, в связи с небольшим количеством анализируемых пикселей для блоков малого размера возможно возникновение ложных соответствий. Решить первую проблему можно, исключив использование блоков большого размера, а вторую — с помощью классификации блоков в соответствии с некоторым признаком.

В настоящей статье в качестве такого признака предлагается использовать фактор принадлежности большинства пикселей блока некоторой области, определяемой маской, построенной по представленному набору опорных точек.

Схемы алгоритмов. В ходе исследования были проанализированы существующие схемы выделения опорных пикселей на кадрах видеопоследовательности относительно их применимости к решению задач компенсации движения объекта. В настоящее время наибольшее распространение получили следующие алгоритмы:

— алгоритм ADC (Absolute Difference Criteria), в котором используется критерий абсолютного отклонения; данный показатель соответствия отличается минимальными вычислительными затратами, однако в ходе экспериментов было выявлено, что этот алгоритм выделяет неоправданно большое количество опорных точек, зависящее от перепадов освещенности сцены, а также от равномерности представленной текстуры кадра;

— алгоритм детектирования Харриса, описанный в работе [3], при высокой трудоемкости реализации не позволяет выделить стабильный набор точек;

— алгоритм SIFT (Scale-Invariant Feature Transform), описанный в работе [4], в дополнение к алгоритму ADC использует предварительную линейную свертку изображения с ядром Гаусса:

$$y(i, j) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \sum_{k=-m}^m \sum_{n=-m}^m e^{-\frac{k^2+n^2}{2\sigma}} y'(i+k, j+n),$$

где y' и y — значения исходной и сглаженной яркости пикселей в точках кадра с координатами (i, j) ; $(2m+1) \times (2m+1)$ — размер ядра Гаусса; σ — параметр отклонения фильтра.

Исследования проводились для разных размеров ядра Гаусса при $\sigma = 1$. При использовании ядра размером 5×5 была зафиксирована наилучшая способность фильтрации шумов, что обеспечило подходящий набор опорных точек.

По результатам проведенного анализа алгоритм SIFT был выбран в качестве основы для расчета маски классификации.

С учетом выбранной схемы был разработан следующий алгоритм построения маски классификации.

1. Выделение опорных точек по алгоритму SIFT.
2. Создание локальной окрестности — зоны интереса — для каждой точки: границы строки интереса, а также левых и правых границ изображения.
3. Создание массива строк интереса из строк длиной более 2 пкс.
4. Объединение строк в зоны интереса по принципу их стыковки со смещением в 2 пкс сверху или снизу.

5. Создание второго массива строк интереса из коротких строк в областях резких перепадов яркости, а также строк, составленных из опорных точек и точек зоны интереса.

6. Объединение коротких строк в зоны интереса по принципу их стыковки без смещения сверху или снизу.

Данный алгоритм основан на механизме „неслияния“ зон интереса через их границу, имеющую ширину в 1 пкс. Благодаря объединению коротких строк по указанной схеме происходит различение граничных строк обрамления и областей с перепадами яркости. Для уменьшения трудоемкости алгоритма предлагается его реализацию осуществлять на кадре пониженного разрешения, что, как показало исследование, практически не сказывается на качестве классификации. Стартовые кадры видеопоследовательностей (а), а также соответствующие результаты построения масок (б) представлены на рис. 1.

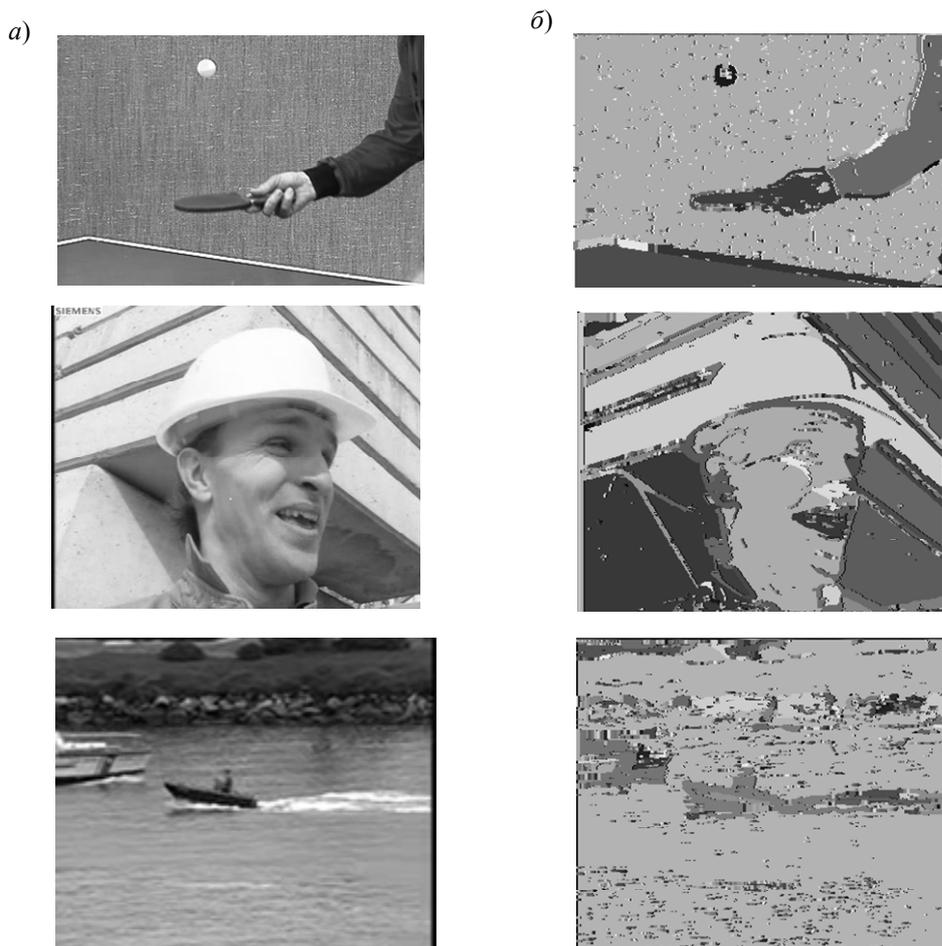


Рис. 1

Полученная в результате выполнения алгоритма маска используется в алгоритме компенсации движения на основе блоков переменного размера (VSBM — Variable Size Block Compensation) с точностью 0,25 пкс. Основные этапы такого алгоритма сводятся к следующим действиям.

1. Изображение делится на блоки равного размера.

2. Для каждого блока выполняется проверка условия: если ошибка соответствия обрабатываемого блока и наиболее подходящего блока опорного кадра выше некоторого порога, то блок делится на четыре блока меньшего размера.

3. При достижении максимально заданного числа блоков или требуемой точности совпадения кадров процесс для данного блока останавливается.

Процесс соответствия блоков зонам интереса выполняется по принципу мажоритарности в зависимости от значения маски пикселей, принадлежащих блоку. В алгоритме один вектор движения присваивается группе сегментов, принадлежащих одной зоне интереса. Результаты выполнения предложенного алгоритма представлены на рис. 2.

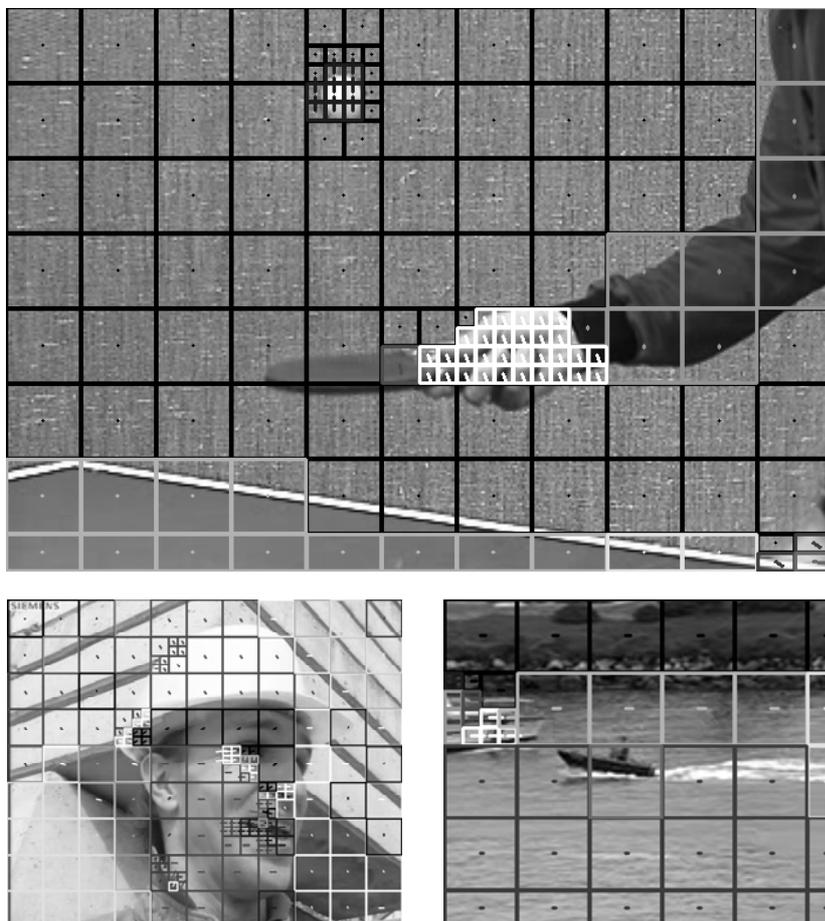


Рис. 2

В связи с трудоемкостью алгоритма полного перебора целесообразно применение метода усредненной пирамиды (MP — Median Pyramid) для отбора соотносимых блоков, который требует меньших вычислительных затрат при схожем качестве восстановленной видеопоследовательности. Алгоритм MP предполагает осуществление компенсации движения на кадре пониженного разрешения с дальнейшим уточнением векторов на кадре более высокого разрешения [5]. В рамках данного исследования предлагается использовать пирамиду Гаусса с тремя ступенями.

Экспериментальные результаты. Для тестирования разработанного алгоритма были выбраны стандартные тестовые последовательности группы MPEG — „Теннис“, „Бригадир“ и „Береговая охрана“.

В ходе экспериментов для алгоритма VSBM и модифицированных алгоритмов VSBM на основе выделения опорных пикселей (VSBMP) и на основе схемы отбора блоков (VSBMPM) были получены следующие зависимости:

— пиковое соотношение сигнал/шум для всего перечня размеров блока, вычисляемое в соответствии с формулой

$$\text{PSNR} = 10 \lg \frac{(2^n - 1)^2}{\text{MSE}},$$

где n — разрядность цветовой схемы, для цветового пространства YUV равная 8; MSE — среднее квадратическое отклонение яркости пикселей исходного изображения от яркости изображения, восстановленного после сжатия, определяемое как

$$\text{MSE} = \frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} \|I(i, j) - K(i, j)\|^2,$$

где M, N — размеры кадра; $I(i, j)$ и $K(i, j)$ — яркость соответствующих пикселов компенсируемого и опорного кадров;

— RD (Ration Distortion) — характеристика, определяющая зависимость искажения сигнала (PSNR) от коэффициента сжатия ($R(D)$);

— вычислительная сложность алгоритма (Q), измеряемая как среднее количество базовых операций (б.о.) (сложения/вычитания и сравнения) на блок для всего перечня его размеров.

Для тестовой последовательности „Теннис“ на рис. 3, а представлена зависимость величины PSNR от площади S блока выделяемого сегмента, которая увеличивается с шагом d по каждой из сторон; на рис. 3, б приведена зависимость вычислительной сложности алгоритма Q от величин S и d , а на рис. 3, в — зависимость $R(D)$.

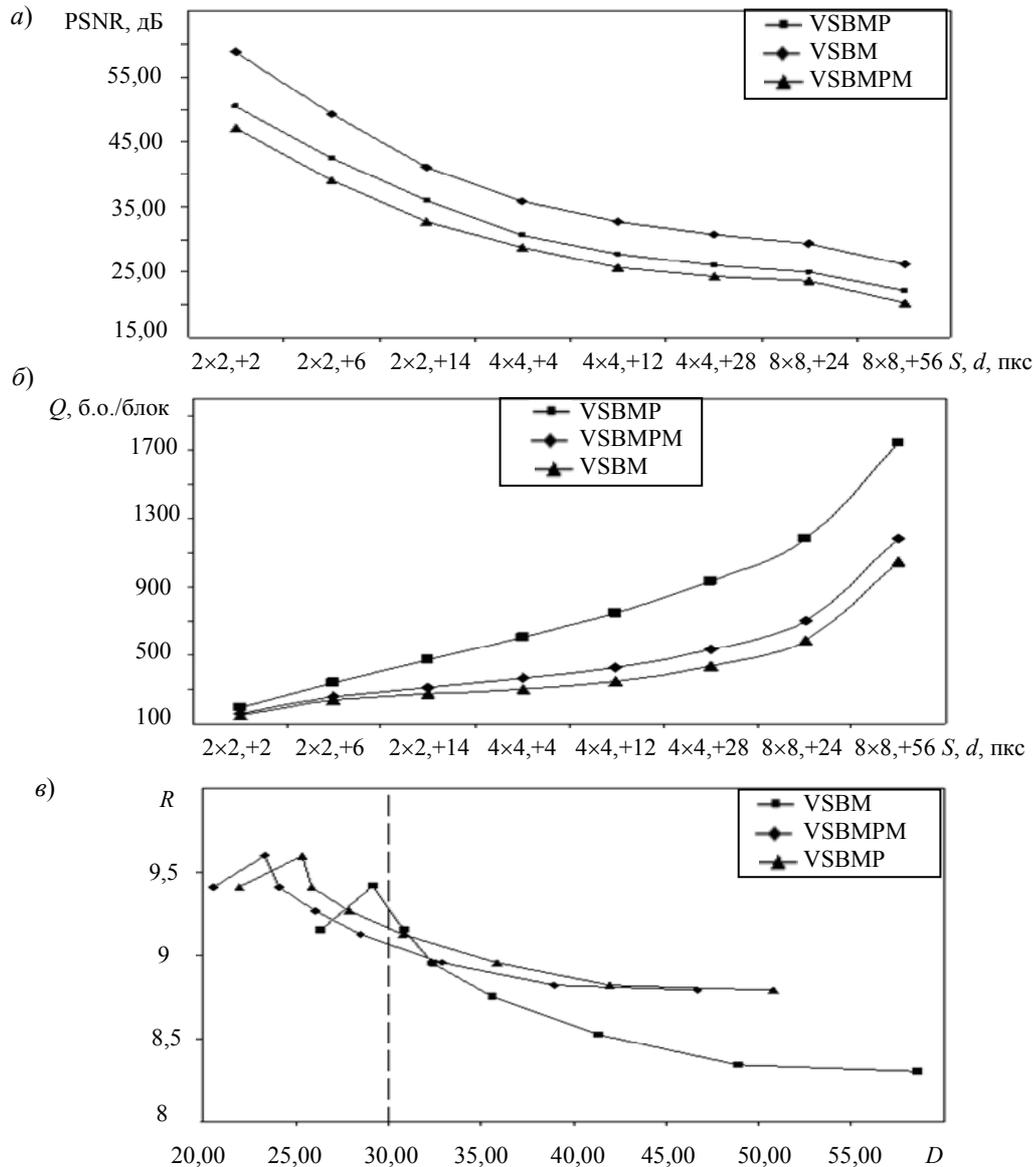


Рис. 3

Анализ результатов, представленных на рис. 3, а также в таблице, показал, что предложенный алгоритм способствует улучшению показателей сжатия при несущественном понижении качества воспроизведенной видеопоследовательности (если PSNR > 30дБ, то качество

считается хорошим). При использовании алгоритма VSBMPM было достигнуто снижение вычислительной трудоемкости при схожих показателях коэффициента сжатия и незначительном ухудшении качества. Необходимо также заметить, что при максимальном значении размера блока, равном 64×64 , проявляется эффект мажоритарности.

Размер блока, пкс		Исследуемый алгоритм								
		VSBM			VSBMP			VSMPPM		
min	max	PSNR, дБ	$R(D)$	Q , б.о.	PSNR, дБ	$R(D)$	Q , б.о.	PSNR, дБ	$R(D)$	Q , б.о.
2×2	4×4	58,3	8,30	153	50,5	8,79	206	46,6	8,79	163
	8×8	48,7	8,34	240	42,1	8,82	342	39,4	8,82	260
	16×16	41,9	8,52	271	35,7	8,96	473	32,9	8,96	311
4×4	8×8	35,8	8,76	307	30,7	9,13	605	28,5	9,13	367
	16×16	32,9	8,95	359	28	9,27	758	26	9,27	439
	32×32	30,7	9,15	440	26	9,41	937	24,3	9,41	540
8×8	32×32	29,9	9,42	585	25,6	9,60	1187	23,2	9,60	705
	64×64	25,8	9,15	1048	22	9,41	1751	20,3	9,41	1188

Заключение. В ходе исследования разработана схема выделения локальных областей кадра (зон интереса), основанная на методе SIFT выбора опорных точек, отличающаяся уменьшением вычислительных затрат и допустимым уровнем точности с возможностью использования в задачах классификации сегментов кадра.

Применение предложенной схемы обеспечивает более высокий коэффициент сжатия видеопоследовательности, чем в схеме VSBM, но при более значимых вычислительных затратах. Этот показатель можно улучшить, как было показано, за счет применения алгоритма усредненной пирамиды отбора блоков для сравнения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Srinivasan R., Rao K. R.* Predictive coding based on efficient motion estimation // Proc. of ICC. 1984. P. 521—526.
2. *Ribas-Corbera J., Neuhoff D. L.* On the optimal block size for block-based, motion compensated video coders // SPIE Proc. of Visual Communications and Image Processing. 1997. Vol. 3024. P. 1132—1143.
3. *Harris C., Stephens M.* Combined corner and edge detector // Proc. of the 4th Alvey Vision Conference. 1988. P. 147—151.
4. *Lowe D. G.* Object recognition from local scale-invariant features // Proc. of the Intern. Conf. on Computer Vision. 1999. Vol. 2. P. 1150—1157.
5. *Рубина И. С.* Анализ методов построения траектории движущихся объектов на основе сегментации видеоданных // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2011. Вып. 72.

Сведения об авторах

Ирина Семеновна Рубина

— аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: rubren@mail.ru

Александр Ювенальевич Тропченко

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра вычислительной техники; E-mail: tau@dl.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
вычислительной техники

Поступила в редакцию
03.03.11 г.

Н. В. ГИРИНА

**ОЦЕНКА ВЕРОЯТНОСТИ ПЕРВОГО ПЕРЕСЕЧЕНИЯ УРОВНЕЙ
ГАУССОВЫМИ МАРКОВСКИМИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМИ**

Оцениваются вероятности времени первого пересечения постоянного и переменного уровней гауссовыми марковскими последовательностями конечного порядка с использованием геометрического и обобщенного геометрического распределений.

Ключевые слова: вероятность времени первого пересечения, постоянный и переменный уровни, гауссова марковская последовательность.

Одно из приложений задачи о пересечении случайным процессом неслучайного уровня — измерение интервалов между импульсными сигналами, оцениваемых разностью моментов пересечения заданных уровней фронтами сигналов. Решение этой задачи базируется на плотности распределения времени t_u первого пересечения уровня $u(t)$ (фронта сигнала) случайным процессом $x(t)$, описывающим шумовую составляющую.

Пересечениям посвящено множество отечественных публикаций (см., например, [1—3]). Общее решение на базе теории рядов Райса [4] трудно реализовать в инженерной практике. При условии дифференцируемости процесса $x(t)$ удается определить математическое ожидание и дисперсию времени t_u [1, 2, 5], дифференцируемость уровня $u(t)$ позволяет рассчитать плотность $f(t_u)$ для $x(t)$ -гауссова марковского процесса первого порядка [6].

Оценить плотность $f(t_u)$ более простыми методами можно в пространстве дискретного времени посредством перехода к последовательностям \mathbf{X}, \mathbf{U} . Некоторые вопросы применения марковских моделей гауссовых последовательностей [7] к пересечению постоянных уровней рассмотрены в работе [8]. Цель настоящей статьи — распространить методику оценки плотности $f(t_u)$ на переменные уровни с использованием марковских моделей и геометрического распределения.

Пусть последовательности \mathbf{X}, \mathbf{U} формируются на временном отрезке $[0, T]$ путем дискретизации процессов $x(t), u(t)$ с интервалом Δ . Если начальные значения $x_0 < U_0$, первое пересечение возможно снизу вверх. Первое пересечение может произойти на k -м интервале дискретизации с вероятностью

$$f(t_k) = p \left\{ (x_k > u_k) \bigcap_{i=0}^{k-1} (x_i < u_i) \right\}, \quad k = 1, 2, \dots \quad (1)$$

Если принять $\Delta = 1$, а время t_u первого пересечения фиксировать как номер k первого выполнения неравенства $x_i > u_i$, $i = 0, 1, \dots, k-1$, то совокупность значений $f(t_k)$ задает плотность распределения дискретного времени первого пересечения.

Если последовательность \mathbf{X} не коррелирована (дискретный белый шум), вероятности (1) рассчитываются как произведения:

$$f(t_k) = p_k \prod_{i=0}^{k-1} (1 - p_i), \quad p_i = p(x_i > u_i). \quad (2)$$

В случае коррелированной последовательности непосредственный расчет вероятностей (1) проблематичен даже для гауссовых последовательностей.

Пересечение постоянного уровня. Время первого пересечения постоянного уровня $U = u$ дискретным белым шумом распределено по геометрическому закону [9]

$$f(t_k) = (1 - p_0)^k p_0, \quad p_0 = p\{x > u\} = 1 - \Phi(u/\sigma), \quad (3)$$

соответствующему произведению (2) при $p_i = p_0$, здесь $\Phi(\lambda)$ — интеграл вероятности.

Выражение для плотности (3) можно обобщить на слабокоррелированные марковские последовательности конечного порядка n [8], задаваемые условием $\tau_0 \ll T$, где τ_0 — интервал корреляции последовательности \mathbf{X} . Замена немарковской последовательности марковской позволяет при расчете вероятностей ограничить число учитываемых составляющих. Вероятности пересечения уровня u первыми n значениями рассчитываются как

$$p_0 = p\{x > u\} = 1 - \Phi(u/\sigma),$$

$$p_k = \int_{-\infty}^u \dots \int_{-\infty}^u f(x_0, \dots, x_k) dx_0 \dots dx_k, \quad k = 1, \dots, n-1. \quad (4)$$

При $k \geq n$ нормированные значения геометрической плотности [8]

$$\hat{f}(t_k) \approx p_k (1 - P) = (1 - P) p_n (1 - p_n)^{k-n}, \quad P = \sum_{i=0}^{n-1} p_i, \quad (5)$$

описывают время первого пересечения уровня u .

Пример 1. Процесс $x(t) \in N(0, R(\tau))$ на временном отрезке $[0, 30]$ дискретизируется с интервалом $\Delta = 0,5$; функция корреляции (рис. 1, а, кривая 1) определяется как

$$R(\tau) = \exp(-\alpha\tau) \left[\cos(\beta\tau) + \frac{\alpha}{\beta} \sin(\beta\tau) \right], \quad \alpha = 1/4, \quad \beta = \pi/2.$$

Аппроксимация процесса $x(t)$ марковской последовательностью n -го порядка базируется на приведении матрицы точности к $2n+1$ -диагональному виду [7]. Функция корреляции аппроксимирующей последовательности \mathbf{X} порядка $n=5$ показана на рис. 1, а, кривая 2 (марковский процесс менее инерционен); на рис. 1, б приведена гистограмма времени первого пересечения уровня $u=1$ исходным процессом ($N=5000$ траекторий) и марковской последовательностью \mathbf{X} (пунктир).

Вероятности (4) получены статистическим моделированием пересечений последовательностью \mathbf{X} ; для уровня $u=1$ в одном из экспериментов они приняли следующие значения: $p_0 = 0,1618$, $p_1 = 0,0702$, $p_2 = 0,0786$, $p_3 = 0,0730$, $p_4 = 0,0700$, $p_5 = 0,0588$, из чего следует, что в результате расчета вероятностей (5) $p_n = 0,0588$, $1 - P = 0,5464$.

На рис. 1, в, г приведены гистограммы времени первого пересечения уровней $u=1$ и $u=2$ исходным процессом и оценки вероятностей (5), показанные пунктирными линиями.

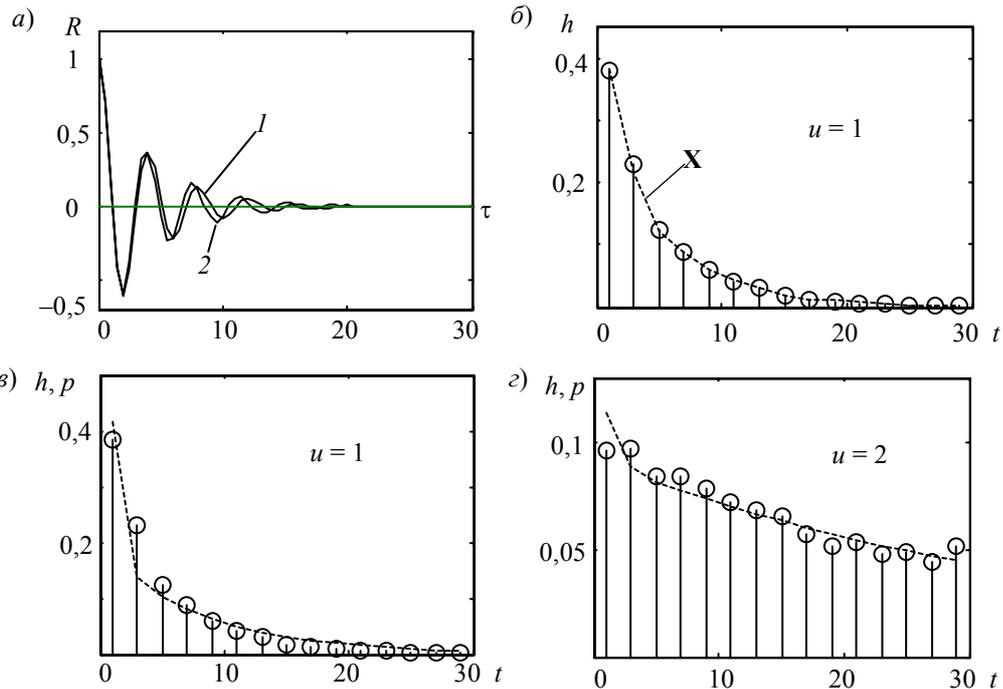


Рис. 1

Пересечение переменного уровня. Формула (1) по сути обобщает геометрическое распределение: если вероятности p_i наступления события в независимых экспериментах различны, вероятность первого его наступления в k -м эксперименте равна

$$P_k = p_k \prod_{i=1}^{k-1} (1 - p_i), \quad k = 1, 2, \dots$$

Вероятность пересечения уровня U сверху вниз гауссовой последовательностью X с нулевым средним на i -м интервале определяется как

$$p_i = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{u_i} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) dx = \Phi\left(\frac{u_i}{\sigma}\right),$$

где σ — среднее квадратическое отклонение.

Если пересекающий процесс аппроксимировать марковской последовательностью n -го порядка, обобщенное геометрическое распределение можно упростить: первые $n+1$ вероятностей P_k описываются интегралом (4), а вероятности первого пересечения в последующих интервалах — выражением

$$P_k \approx p_k \prod_{i=k-n}^{k-1} (1 - p_i), \quad k \geq n + 2. \tag{6}$$

При этом расчет вероятностей по формуле (6) позволяет обеспечить сохранение произведения n сомножителей, что сокращает объем вычислений.

Пример 2. На рис. 2, а показан график (уровень) $u(t) = 8\Phi(t - 1,5) - 4$, имитирующий передний фронт импульсного сигнала, пересекаемый сверху вниз траекториями процесса $x(t) \in N(0, R(\tau))$ при $R(\tau) = \exp(-\alpha|\tau|) [\cos(\beta\tau) + \alpha/\beta \sin(\beta|\tau|)]$, $\alpha = 3/2$, $\beta = \pi$. Процесс $x(t)$ дискретизируется с интервалом $\Delta = 0,2$ и аппроксимируется марковской последовательностью шестого порядка.

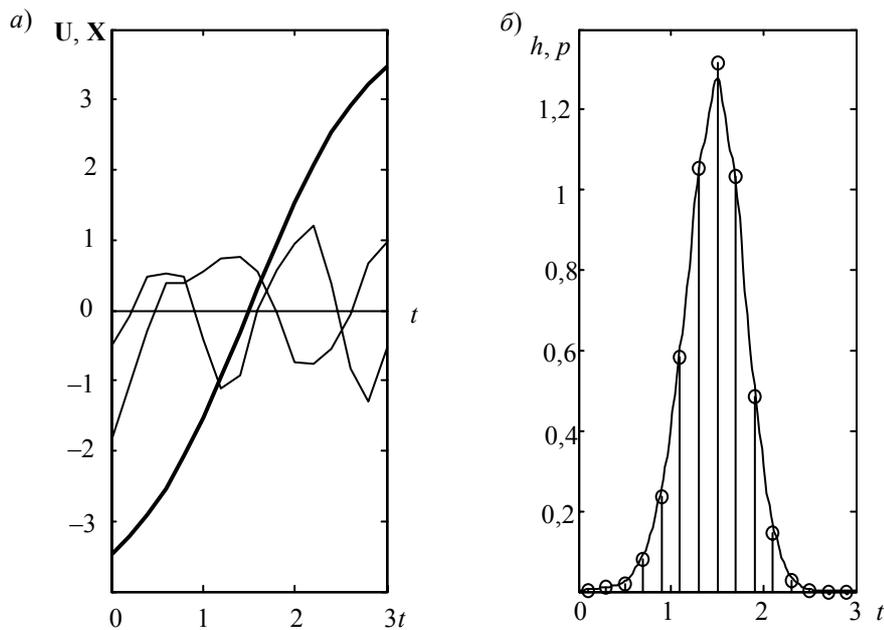


Рис. 2

Первые семь вероятностей P_k пересечения траекторий и заданного уровня получены статистическим моделированием по выборке $N = 10\,000$ траекторий. Следующие вероятности рассчитаны по формуле (6). По этой же выборке рассчитана гистограмма времени первого пересечения, показанная на рис. 2, б.

Метод аппроксимации стационарного гауссова процесса марковской последовательностью конечного порядка, предложенный в настоящей статье, может быть использован в инженерной практике оценивания времени прихода импульсных сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Свешников А. А. Прикладные методы случайных функций. Л.: Судпромгиз, 1961. 252 с.
2. Тихонов В. И., Хименко В. И. Проблема пересечений уровней случайными процессами. Радиофизические приложения // Радиотехника и электроника. 1998. Т. 43, № 5. С. 501—523.
3. Семаков С. Л. Выбросы случайных процессов: приложения в авиации. М.: Наука, 2005. 200 с.
4. Мирошин Р. Н. Пересечения кривых гауссовскими процессами. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981. 212 с.
5. Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов. М.: Радио и связь, 1986. 296 с.
6. Воробьев С. Н. Пересечение гауссовым марковским процессом детерминированного уровня // Информационно-управляющие системы. 2004. № 2. С. 16—20.
7. Воробьев С. Н., Гирина Н. В., Осипов Л. А. Гауссовы марковские последовательности // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 1. С. 23—31.
8. Воробьев С. Н., Гирина Н. В. Пересечение стационарных гауссовых последовательностей с неслучайными уровнями // Информационно-управляющие системы. 2009. № 3. С. 7—12.
9. Королюк В. С. и др. Справочник по теории вероятностей и математической статистике. М.: Наука, 1985. 640 с.

Сведения об авторе

Наталья Владимировна Гирина — аспирант; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: natalia.girina@gmail.com

Рекомендована кафедрой
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию
07.09.11 г.

В. Г. АНДРОНОВ, С. В. ДЕГТЯРЁВ, Е. В. ЛАЗАРЕВА

ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОСМИЧЕСКИХ ПАНОРАМНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

На основе анализа динамики и особенностей формирования космических изображений в режимах панорамной съемки со сканирующим головным зеркалом получены функциональные фотограмметрические зависимости между элементами геометрической структуры изображений подобного типа и гринвичскими координатами соответствующих им точек земной поверхности.

Ключевые слова: космические сканерные изображения, панорамная фото-съемка, фотограмметрическая модель.

Введение. В работе [1] представлены общая постановка и строгое решение прямой фотограмметрической задачи орбитальным методом для всех типов космических сканерных систем. Показано, что орбитальный метод основывается на последовательном использовании двух моделей, а именно, общей геоорбитальной модели космической сканерной съемки и координатно-временной модели формирования сканерного изображения конкретного типа. Аналитические соотношения, описывающие первую модель, представлены в работе [2]. Цель настоящей статьи — разработка второй модели, описывающей в каждый момент времени съемки переход от порядковых номеров пикселей цифрового космического сканерного изображения к топологическим параметрам элементов фоточувствительной структуры сканера.

Математическая постановка задачи. Необходимо установить взаимосвязь геометрической структуры оцифрованного изображения и топологии фотоприемной структуры. Пусть на дату $Date = \langle \text{день, месяц, год} \rangle$ и московское время t_0 заданы начальные условия поступательного и углового движения космического аппарата (КА), с углами тангажа $\alpha(t_0)$, крена $\beta(t_0)$ и рысканья $\chi(t_0)$, осуществляющего панорамную видовую съемку с кеплеровской орбиты с элементами $\{a, e, i, \Omega, \omega_{\text{п}}, v\}$.

В качестве фотоприемной структуры съемочной аппаратуры КА будем рассматривать фотопленку шириной h , которая в процессе съемки протягивается с постоянной скоростью перпендикулярно экспонирующей щели длиной $l_{\text{щ}}$ и шириной $d_{\text{щ}}$, расположенной вдоль направления полета КА. В результате полученное после включения съемочной аппаратуры оцифрованное космическое панорамное изображение обрабатывается путем сканирования фотопленки с разрешением ε и представляется в виде мозаичной структуры пикселей из K строк и N столбцов. Каждый пиксел имеет порядковые номера k, n и оптическую плотность $D_{k,n} \in [0, D_{\text{max}}]$, где D_{max} — максимальное значение. Геометрическая структура панорамного космического изображения описывается множеством $\mathfrak{R} = \{ \langle k, n \rangle \mid k = \overline{1, K}, n = \overline{1, N} \}$.

Будем считать, что описанная фотоприемная структура характеризуется некоторыми топологическими параметрами $\{x, y\}$, которые в каждый момент времени τ_i на интервале $(t_0, t_{\text{п}})$ съемки функционально связаны с порядковыми номерами k, n оцифрованного изображения, и известна функция отображения

$$\Phi : \{k, n\} \rightarrow \{x, y, \tau_i\}. \quad (1)$$

Положим далее, что в координатном пространстве, связанном с общим земным эллипсоидом, заданы функции

$$X = F_X(x, y, Q, H, t); \quad Y = F_Y(x, y, Q, H, t); \quad Z = F_Z(x, y, Q, H, t), \quad (2)$$

устанавливающие в моменты московского времени $t = t_0 + \tau_i$ функциональную связь географических координат $\{X, Y, Z\}$ точек земной поверхности, их геодезических высот $\{H\}$, топологических параметров $\{x, y\}$ фотоприемной структуры, а также орбитальных, угловых и конструктивных параметров съемочной аппаратуры $\{Q\}$.

При заданных исходных параметрах требуется найти функцию отображения

$$\Phi : \{k, n\} \cdot \{H\} \rightarrow \{X, Y, Z\} \quad (3)$$

элементов $\{k, n\}$ геометрической структуры оцифрованного панорамного изображения в географические координаты $\{X, Y, H\}$ соответствующих элементам точек земной поверхности.

Иными словами, задача заключается в получении строгих аналитических соотношений, описывающих функции (1)—(3) для космической панорамной съемки.

Введем систему координат (СК) $oxyz$ экспонирующей щели (рис. 1, а). Центр o СК расположим в геометрическом центре щели, ось oy направим вдоль щели по направлению полета КА, ось ox — перпендикулярно щели; ось oz дополняет систему до правой, а ее отрицательное направление совпадает с линией визирования съемочной аппаратуры. Положим далее, что развертка панорамного изображения по строкам выполняется сканированием головного зеркала (рис. 1, б) в плоскости, перпендикулярной плоскости орбиты, путем вращения линии визирования вокруг оси oy по углу крена КА β , а развертка по кадру — за счет движения КА. При этом будем считать, что ориентация съемочной аппаратуры по углам тангажа и рысканья КА в процессе панорамной сканерной съемки остается неизменной. Эквивалентная схема панорамной съемочной аппаратуры такого типа представлена на рис. 1, б.

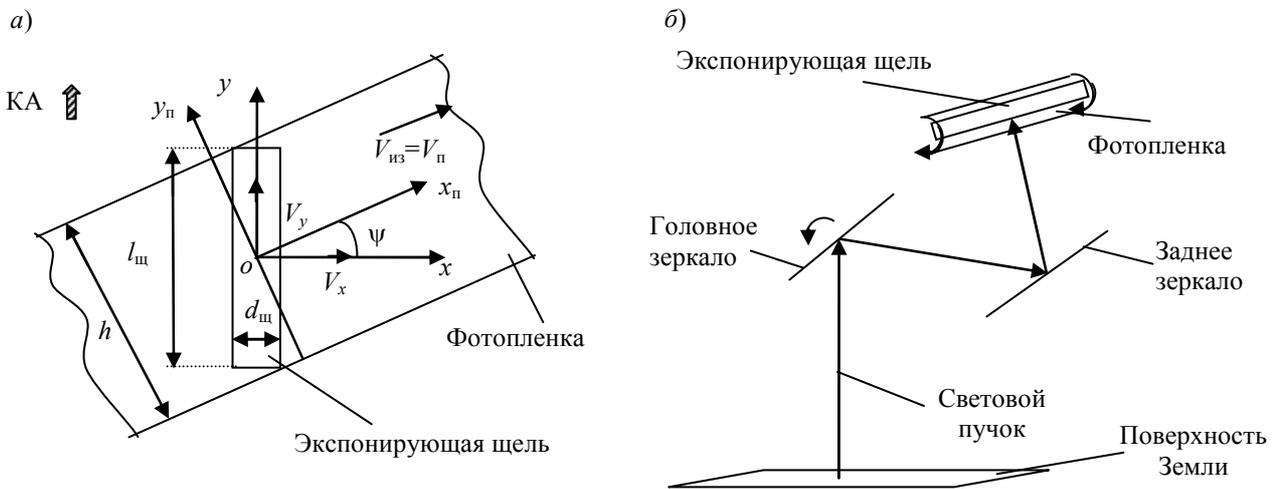


Рис. 1

В процессе съемки световой пучок, пришедший от подстилающей поверхности, отражается сканирующим головным зеркалом, проходит через объектив и отражается задним зеркалом, после чего попадает через световой затвор и блок светофильтров в фокальную плоскость объектива, где расположена экспонирующая щель, под которой с помощью специального механизма протягивается фото пленка.

Головное зеркало сканирует с постоянной угловой скоростью [3]

$$\omega_{ск} = \frac{f |V_{КА}|}{l_{щ} H_{КА}}, \quad (4)$$

где f — фокусное расстояние съёмочной аппаратуры; $|V_{КА}|$, $H_{КА}$ — модуль вектора скорости движения КА и высота КА над поверхностью общего земного эллипсоида.

Фотопленка, движущаяся со скоростью $V_{п}$, равной скорости движения $V_{из}$ изображения в том же направлении, в целях компенсации сдвига изображения развернута относительно щели на угол ψ (рис. 1, а). Разложим вектор $V_{из}$ на две составляющие, первая из которых V_x обусловлена панорамированием, а вторая V_y — поступательным движением КА. Во время экспонирования фотопленки должно выполняться равенство $V_{п} = V_{из}$ [3]. При этом применяется угловая компенсация сдвига изображения, которая заключается в необходимости постоянства вектора V_x и минимизации вектора V_y в геометрическом центре щели на интервале съёмки. Эти условия обеспечиваются соответственно постоянством угловой скорости $\omega_{ск}$ и разворотом вектора $V_{п}$ относительно V_x на угол ψ . Из очевидных соотношений $V_x = V_{из} \cos \psi$ и $V_y = V_{из} \sin \psi$ следует, что

$$\operatorname{tg} \psi = V_y / V_x. \quad (5)$$

Подставив в формулу (5) выражения, полученные в работе [4] для составляющих V_x , V_y , справедливые для геометрического центра щели ($x_{щ} = y_{щ} = x_S = y_S = 0$), с учетом того, что для панорамной съёмки $\omega_X = \omega_Z = 0$ и $\omega_Y = \omega_{ск}$, после несложных преобразований получим:

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{W_2(t)}{W_1(t) + \left\{ \omega_{ск} [Z_{И} - Z_S(t)_{И}] / \sin i \sin u(t) \right\}}, \quad (6)$$

где

$$W_1(t) = b_{11}(t) X_S^*(t)_{И} + b_{21}(t) Y_S^*(t)_{И} + b_{31}(t) Z_S^*(t)_{И};$$

$$W_2(t) = b_{12}(t) X_S^*(t)_{И} + b_{22}(t) Y_S^*(t)_{И} + b_{32}(t) Z_S^*(t)_{И}.$$

В выражении (6) приняты следующие обозначения (относящиеся к моменту включения съёмочной аппаратуры $t = t_0$): $Z_{И}$ — аппликата точки пересечения линии визирования с земной поверхностью в инерциальной системе координат (ИСК); $Z_S(t)_{И}$ — составляющая радиус-вектора КА по оси Z ИСК; $X_S^*(t)_{И}$, $Y_S^*(t)_{И}$, $Z_S^*(t)_{И}$ — составляющие скорости движения КА в ИСК; i, u — наклонение орбиты и аргумент широты КА; $\langle b_{11}(t), b_{21}(t), b_{31}(t) \rangle$; $\langle b_{12}(t), b_{22}(t), b_{32}(t) \rangle$ — элементы соответственно первой и второй строки матрицы направляющих косинусов $B^T(t)$, описывающей переход из инерциальной системы координат к системе координат щели $oxyz$.

Формулы для расчета значений элементов матрицы $B^T(t)$ представлены в работе [4], а составляющие $X_S^*(t)_{И}$, $Y_S^*(t)_{И}$, $Z_S^*(t)_{И}$, величины $Z_S(t)_{И}$ и $Z_{И}$ вычисляются по заданным элементам кеплеровской орбиты в соответствии с известными формулами [5].

Отметим далее, что панорамное изображение формируется в течение цикла вращения головного зеркала от φ_{\min} до φ_{\max} (рис. 2) относительно начального угла крена β_0 . Основной режим панорамной съёмки, обеспечивающий минимальные искажения снимка, связан с начальным значением угла крена $\beta_0 = 0$ (рис. 2, а). Тогда в момент открытия затвора линия

визирования SK будет находиться в положении, соответствующем $\beta(t_0) = \varphi_{\min}$. Понятно, что значение угла визирования по крену будет отрицательным. При попадании зеркала в положение, соответствующее $\beta(t_{\Pi}) = \varphi_{\max}$, пластинки затвора сходятся и доступ световой энергии прекращается. Положение линии визирования SK в момент окончания формирования изображения показано на рис. 2, б.

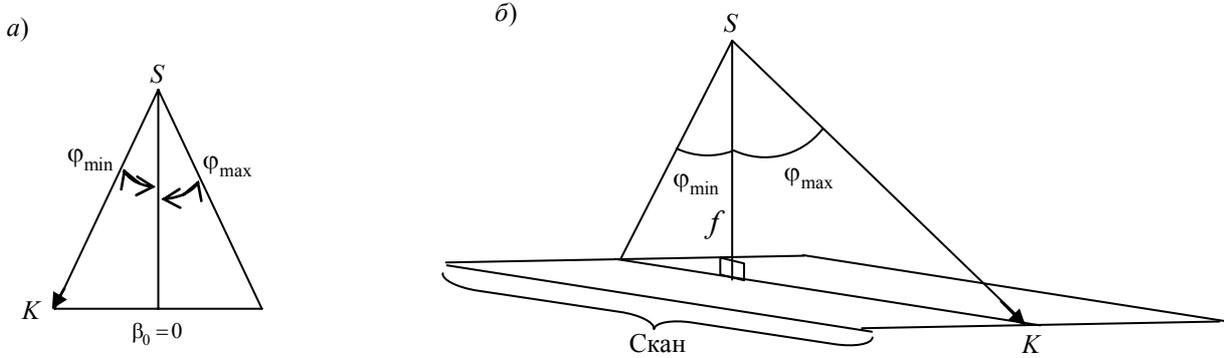


Рис. 2

Текущее значение угла крена можно определить по формуле

$$\beta(\tau) = \beta_0 + \varphi(\tau) = \varphi(\tau), \tag{7}$$

где τ — текущее время на интервале съёмки (t_0, t_{Π}) ; $\varphi_{\min} \leq \varphi(\tau) \leq \varphi_{\max}$.

Для получения выражений, устанавливающих связь между временем формирования точки изображения в системе координат щели и ее положением на панорамном снимке, а также топологическими координатами, обозначим через τ_T тактовое время формирования одной строки изображения, а через τ_k — время формирования k -й строки панорамного изображения на интервале сканирования. Получим

$$\beta(\tau_k) = \varphi(\tau_k) = \varphi_{\min} + \omega_{ск} \tau_k. \tag{8}$$

При этом справедливо выражение

$$\tau_k = k \tau_T = k \frac{d_{щ}}{V_x} = k \frac{d_{щ}}{\omega_{ск} f}, \tag{9}$$

подставив которое в уравнение (8), получим

$$\beta(\tau_k) = \varphi(\tau_k) = \varphi_{\min} + k \frac{d_{щ}}{f}. \tag{10}$$

Формулы (9) и (10) позволяют по заданному (измеренному) порядковому номеру k строки панорамного изображения вычислить текущее τ_k и московское время $t = t_0 + \tau_k$ ее формирования на интервале съёмки и текущее значение угла крена $\beta(\tau_k)$.

Переход от системы координат оцифрованного изображения к фотопленке опишем соотношениями

$$y_{\Pi} = (n - N/2)\varepsilon - \Delta\varepsilon; \quad x_{\Pi} = k\varepsilon, \tag{11}$$

где ε — разрешение сканера; $\Delta\varepsilon = \begin{cases} \varepsilon/2, & \text{если } n \neq N/2; \\ 0, & \text{если } n = N/2. \end{cases}$

Для перехода от координат точки на фотопленке к топологическим параметрам x, y экспонирующей щели воспользуемся следующими (см. рис. 1) формулами:

$$y = \begin{cases} 0, & \text{если } y_{\Pi} = 0; \\ y_{\Pi} = \cos \psi; \end{cases} \quad x = -y_{\Pi} \sin \psi. \tag{12}$$

Полученные аналитические зависимости (6)—(12) описывают искомую функцию отображения (1) и позволяют по заданным порядковым номерам k, n пиксела космического сканерного изображения найти топологические параметры x, y , а также текущее относительное τ_k и московское t время съемки, которые являются исходными данными в модели (2) и функции отображения (3).

Для получения аналитических выражений, описывающих модель (2) и функцию отображения (3), воспользуемся результатами из работы [6].

Геоорбитальная модель космической панорамной съемки. Общая для всех типов сканерной съемочной аппаратуры модель космической сканерной съемки, называемая геоорбитальной, получена в работе [6]. Применительно к рассматриваемым сканерным системам панорамного типа геоорбитальная модель вида (2) с учетом установленных выше соотношений $x = x_S = y_S = 0$, $\omega_X = \omega_Z = 0$, $\omega_Y = \omega_{ск}$ имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} X &= X_S(t) + [Z - Z_S(t)]U(t); \\ Y &= Y_S(t) + [Z - Z_S(t)]W(t); \\ Z &= [N(e^2 - 1) + H] \cos B; \\ L &= \arctg Y/X; \\ X_S^2(t) + Y_S^2(t) + 2M(B)[X_S(t)U(\tau_k) + Y_S(t)W(\tau_k)] + \\ &\quad + M^2(B)[U^2(\tau_k) + W^2(\tau_k)] = (N + H)^2 \cos^2 B, \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где

$$M(B) = (N(1 - e^2) + H) \sin B - Z_S(t); \quad x = x_S = y_S = 0;$$

$$U(t) = \frac{a_{12}(t)y + a_{13}(t)f}{a_{32}(t)y + a_{33}(t)f}; \quad W(t) = \frac{a_{22}(t)y + a_{23}(t)f}{a_{32}(t)y + a_{33}(t)f},$$

e — эксцентриситет орбиты; $a_{ij}(t)$, $i = 1, 2, 3$; $j = 1, 2, 3$, — элементы матрицы направляющих косинусов $A(\tau_k)$, описывающей в момент времени t ориентацию системы координат экспонирующей щели относительно гринвичской системы координат; $X_S(t), Y_S(t), Z_S(t)$ — пространственные геоцентрические координаты КА в гринвичской системе координат.

Полученная фотограмметрическая модель космических панорамных изображений, представленная формулами (6)—(12) и системой уравнений (13), описывает строгую функциональную связь геодезической широты B , долготы L , высоты H точки земной поверхности и ее пространственных гринвичских координат X, Y, Z с топологическими параметрами x, y фотоприемной структуры, а также текущим относительным τ_k и московским t временем съемки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андронов В. Г., Клочков И. А., Лазарева Е. В. Общая постановка и решение прямой фотограмметрической задачи для моноскопических космических изображений // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7, № 4. С. 33—35.
2. Общая геоорбитальная модель космической сканерной съемки / В. Г. Андронов, С. В. Дегтярёв, И. А. Клочков, Е. В. Лазарева // Геоинформатика. 2010. № 1. С. 48—52.
3. Батраков А. С., Летуновский В. В. Телевизионные системы. М.: МО СССР, 1978. 372 с.

4. Общая модель скорости движения космических сканерных изображений в инерциальном пространстве / В. Г. Андронов, И. А. Клочков, Е. В. Лазарева, Т. В. Мордавиченко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2010. № 4. С. 58—61.
5. Основы теории полета космических аппаратов / Под ред. Г. С. Нариманова и М. К. Тихонравова. М.: Машиностроение, 1972. 374 с.
6. Андронов В. Г., Дегтярёв С. В., Лазарева Е. В. Модель формирования космических сканерных изображений в режимах панорамной съемки // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2010. Т. 8, № 11. С. 19—26.

Сведения об авторах

- Владимир Германович Андронов** — канд. техн. наук, доцент; Юго-Западный государственный университет, кафедра телекоммуникаций, Курск; E-mail: vladiA58@yandex.ru
- Сергей Викторович Дегтярёв** — д-р техн. наук, профессор; Юго-Западный государственный университет, кафедра информационных систем и технологий, доцент; E-mail: ist.@kistu.kursk.ru
- Евгения Вадимовна Лазарева** — аспирант; Юго-Западный государственный университет, кафедра телекоммуникаций; E-mail: eugenia-lazareva@yandex.ru

Рекомендована кафедрой
телекоммуникаций

Поступила в редакцию
26.10.10 г.

В. В. НИКИФОРОВ, В. И. ШКИРТИЛЬ

СОСТАВНОЕ БЛОКИРОВАНИЕ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЗАДАЧ В СИСТЕМАХ НА МНОГОЯДЕРНЫХ ПРОЦЕССОРАХ

Проводится сравнение свойств протоколов доступа к разделяемым ресурсам в многозадачных программных приложениях при их исполнении с использованием классических (одноядерных) и многоядерных процессоров. Показано, что некоторые свойства протоколов, полезные при реализации многозадачных приложений средствами одноядерных процессоров, становятся недействительными при реализации средствами многоядерных процессоров.

Ключевые слова: многозадачные системы, системы на многоядерных процессорах, системы реального времени, взаимосвязанные задачи, протоколы доступа к ресурсам.

Введение. Программные приложения, разрабатываемые для использования в различных сферах применения компьютерной техники, строятся преимущественно в виде комплексов задач — замкнутых по управлению последовательных программ, служащих достижению общих стоящих перед системой целей и разделяющих общие системные ресурсы [1]. В системах имитационного моделирования каждый отдельный процесс требует представления в виде отдельной задачи, что предопределяет необходимость построения системы в виде многозадачного комплекса. Во встроенных компьютерных системах в системах реального времени требование построения программного приложения в виде комплекса кооперативных задач диктуется принципом соответствия структуры совокупности внешних процессов, контролируемых системой, структуре программного комплекса [2]. В связи с распространением аппаратных средств на многоядерных процессорах для обеспечения эффективной загрузки процессорных ядер программные приложения информационно-вычислительного характера целесообразно строить также в виде многозадачных программных систем.

Составляющие программное приложение задачи $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ разделяют между собой имеющиеся в системе *исполнительные* ресурсы (процессоры, ядра многоядерного процессора) соответственно принятой дисциплине планирования, выражаемой, например, статическим назначением *приоритетов* задач — целочисленных параметров, определяющих порядок исполнения задач [3, 4].

Наряду с исполнительными ресурсами задачи могут разделять имеющиеся общесистемные *информационные* ресурсы (глобальные массивы, буферы, интерфейсные регистры, экранные формы). Для обеспечения целостности информационных ресурсов, разделяемых взаимосвязанными задачами, на границах участков кода задачи τ_i , в рамках которых исполняются действия с разделяемым информационным ресурсом, предусматриваются операции над *мьютексами* [1]. Такие участки кода называются критическими интервалами по доступу

задачи τ_i к разделяемому ресурсу. Конкретный мьютекс является синхронизирующим элементом, предотвращающим одновременный доступ различных задач к конкретному ресурсу. При запросе высокоприоритетной задачей τ_i доступа в очередной критический интервал она может быть приостановлена до момента, когда некая низкоприоритетная задача τ_j выйдет из своего критического интервала по доступу к этому ресурсу. Такая ситуация называется *блокированием* (низкоприоритетная задача τ_j блокирует высокоприоритетную задачу τ_i). *Составное блокирование* означает, что в рамках цикла исполнения задача неоднократно блокируется низкоприоритетными задачами [5].

Задачи, выполнение которых не может быть приостановлено синхронизирующими механизмами (например, выполнением операций над мьютексами), называются *независимыми*. Независимым задачам противопоставляются *взаимосвязанные* задачи, которые могут попасть в состояния ожидания тех или иных действий, выполняемых другими задачами (например, освобождения занятых общесистемных информационных ресурсов). При построении систем с взаимосвязанными задачами необходимо гарантировать невозможность возникновения *взаимных ожиданий* — ситуаций, в которых между действующими задачами возникают кольца отношений блокирования [6].

Исследования, направленные на поиск эффективных методов построения многозадачных приложений на классических одноядерных процессорах, выполняются с 1970-х гг. В результате этих исследований разработаны, в частности, оптимальные дисциплины планирования, протоколы доступа к разделяемым информационным ресурсам, гарантирующие отсутствие опасности возникновения взаимных ожиданий, методы оценки времени отклика задач [7]. Аналогичные исследования для систем на многоядерных процессорах особенно интенсивно проводятся в последнее десятилетие. Так, установлено, что ряд тезисов, справедливых для систем, состоящих из независимых задач, на классических процессорах, становится недействителен для систем на многоядерных процессорах. Например, дисциплины планирования, оптимальные для классических систем, не являются оптимальными для многоядерных [8—10]. Наихудший (в отношении своевременности выполнения задач) сценарий событий для классических систем не является наихудшим для многоядерных систем [11]. В настоящей статье показано, что протоколы доступа к ресурсам, гарантирующие для одноядерных процессоров отсутствие опасности составного блокирования и взаимных ожиданий задач, при реализации на многоядерных процессорах могут терять эти полезные свойства.

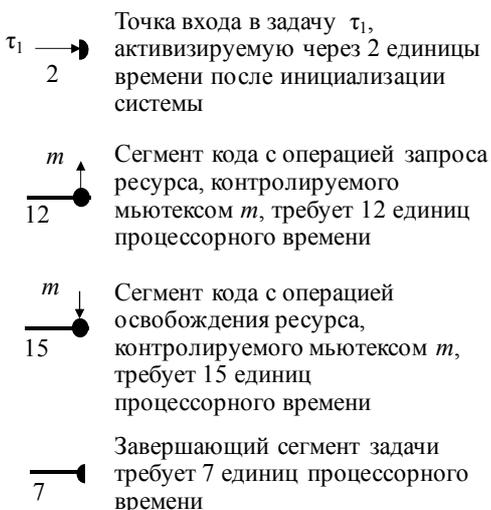


Рис. 1

Протоколы доступа к критическим интервалам. Изучение свойств многозадачных приложений базируется на построении моделей. К таким моделям относятся маршрутные сети [6], в которых составляющие приложение задачи представляются последовательностями сегментов, разделяемых операциями над мьютексами. Типы элементов маршрутных сетей, используемых в рамках настоящей статьи, приведены на рис. 1.

На рис. 2, а представлена конфигурация некоторого программного приложения A_1 из трех задач (задачи индексируются в порядке снижения приоритета) с использованием маршрутных сетей. Порядок следования системных событий и смены состояний составляющих приложение объектов в ходе работы системы

отображается диаграммами, которые иллюстрируют ход исполнения приложения A_1 при использовании простейшего протокола доступа к ресурсам (рис. 2, б) и протокола наследования

приоритетов (рис. 2, в). Протокол устанавливает специфику исполнения операции запроса ресурса, а именно: требуемые условия для выдачи задаче разрешения занять запрашиваемый ресурс и побочные системные эффекты, возникающие при входе в критический интервал.

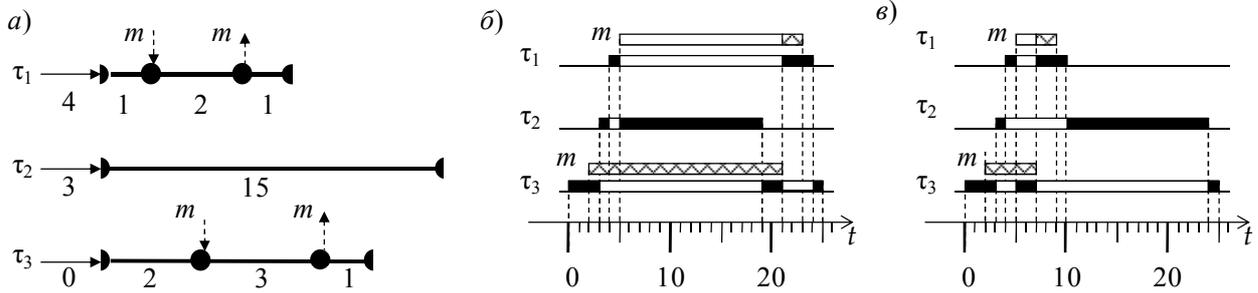


Рис. 2

Простейший протокол доступа к ресурсам и протокол наследования приоритетов. При использовании простейшего протокола (ПП) условия предоставления запрашиваемого ресурса ограничиваются единственным (обязательным для всех протоколов) требованием: ресурс должен быть свободен. Никаких дополнительных побочных эффектов (кроме обязательного — ресурс переводится в состояние „занят“) при входе в критический интервал не возникает. В таблице описаны события, возникающие на начальном участке исполнения приложения A_1 при использовании ПП (см. рис. 2, б); в таблице ресурс обозначен тем же символом m , что и охраняющий его мьютекс.

Момент времени	Событие
$t=0$	Активизация задачи τ_3 , получение ресурса процессора и начало исполнения
$t=2$	Запрос задачей τ_3 ресурса m , захват ресурса и продолжение исполнения
$t=3$	Активизация задачи τ_2 , вытеснение задачи τ_3 и начало исполнения
$t=4$	Активизация задачи τ_1 , вытеснение задачи τ_2 и начало исполнения
$t=5$	Начало ожидания задачей τ_1 освобождения ресурса m , возобновление исполнения задачи τ_2
$t=19$	Завершение исполнения задачи τ_2 , возобновление исполнения задачи τ_3
$t=21$	Освобождение задачей τ_3 ресурса m , захват задачей τ_1 ресурса m и вытеснение задачи τ_3
$t=23$	Завершение исполнения задачи τ_3

На интервале $t \in (5, 21)$ высокоприоритетная задача τ_1 ожидает предоставления занятого ресурса m . Причем большую часть этого интервала процессором владеет менее приоритетная задача τ_2 , не имеющая отношения к ожидаемому высокоприоритетной задачей τ_1 ресурсу m . Это явление называется инверсией приоритетов.

Исключить вероятность возникновения инверсии приоритетов можно путем использования протокола наследования приоритетов (ПНП). Условия предоставления запрашиваемого ресурса в случае ПНП те же, что и в случае ПП (ресурс должен быть свободен), но при запросе задачей τ_i ресурса, занятого задачей τ_j , реализуется побочный системный эффект: приоритет задачи τ_j , владеющей занятым ресурсом, временно, до ее выхода из критического интервала, повышается до приоритета задачи τ_i (τ_j наследует приоритет τ_i). Для конфигурации

приложения A_1 (см. рис. 2, а) использование ПНП существенно сокращает продолжительность ожидания задачей τ_i требуемого ей ресурса (см. рис. 2, в).

Использование ПНП не исключает возможности возникновения составного блокирования высокоприоритетных задач. Рис. 3, б иллюстрирует такую возможность. При исполнении приложения A_2 , конфигурация которого представлена на рис. 3, а, к моменту активизации задачи τ_1 задачами τ_2 и τ_3 уже захвачены соответственно ресурсы m_1 и m_2 . Поэтому задача τ_1 ожидает сначала освобождения ресурса m_1 на интервале $t \in (5, 14)$, затем — освобождения ресурса m_2 на интервале $t \in (18, 27)$. Как будет показано далее, использование ПНП не исключает возможности возникновения взаимного блокирования.

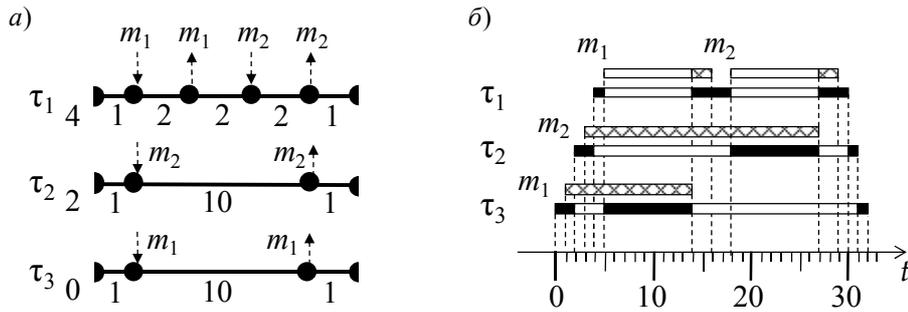


Рис. 3

Протоколы доступа к ресурсам на основе пороговых приоритетов. Исключить вероятность возникновения взаимного и составного блокирования задач можно с помощью протоколов доступа к ресурсам, использующих *пороговые приоритеты* ресурсов — статически определяемые параметры каждого из разделяемых ресурсов: пороговый приоритет ресурса равен высшему уровню статического приоритета задачи, которая может занять ресурс. Известны две разновидности протоколов такого типа — протокол пороговых приоритетов (ППП) и протокол превентивного наследования приоритетов (ППНП) [4].

ППП характеризуется тем, что в дополнение к механизму ПНП ставится условие предоставления запрашиваемого ресурса: запрашиваемый ресурс предоставляется задаче только тогда, когда ее статический приоритет выше, чем максимальный из пороговых приоритетов всех ресурсов, уже занятых в текущий момент времени другими задачами.

ППНП характеризуется усилением (относительно ПНП) побочного системного эффекта, возникающего при входе в критический интервал: при предоставлении задаче τ_i затребованного ресурса ее приоритет немедленно повышается до значения порогового приоритета захватываемого ресурса; такое повышенное значение приоритета задачи τ_i сохраняется до освобождения ею предоставленного ресурса.

Известно, что при исполнении приложений с взаимодействующими задачами на одноядерных процессорах как ППП, так и ППНП гарантируют невозможность возникновения составного блокирования. На рис. 4, а, б соответственно представлены диаграммы, иллюстрирующие предотвращение составного блокирования при использовании ППП и ППНП в ходе исполнения приложения A_2 (см. рис. 3, а).

Пороговые приоритеты разделяемых ресурсов m_1 и m_2 равны приоритету задачи τ_1 . При использовании ППП (см. рис. 4, а) в момент $t=3$ задача τ_2 запрашивает свободный ресурс m_2 . Несмотря на то что ресурс m_2 свободен, его предоставление задаче τ_2 откладывается, поскольку занят ресурс m_1 , обладающий наивысшим пороговым приоритетом. В момент $t=5$ задача τ_1 запрашивает ресурс m_1 и переходит в состояние ожидания момента его освобождения (до $t=13$). При использовании ППНП (см. рис. 4, б) в момент $t=1$ задача τ_3 получает дос-

туп к ресурсу m_1 , имеющему наивысшее значение порогового приоритета; на время владения этим ресурсом приоритет задачи τ_3 становится наивысшим.

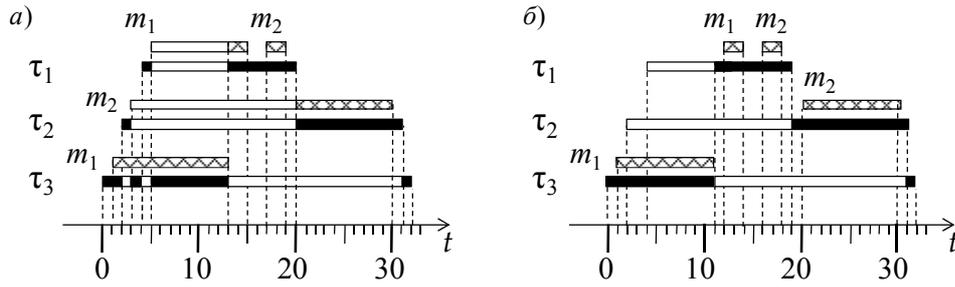


Рис. 4

На рис. 5, а приведена конфигурация приложения A_3 , которое при использовании ПНП (рис. 5, б) попадает в состояние взаимного блокирования задач. Анализ показывает, что при использовании ППП (рис. 5, в) или ППНП (рис. 5, г) возможность возникновения взаимного блокирования исключается. В системах на одноядерных процессорах использование ППП и ППНП гарантирует невозможность взаимного блокирования задач при любых конфигурациях приложений.

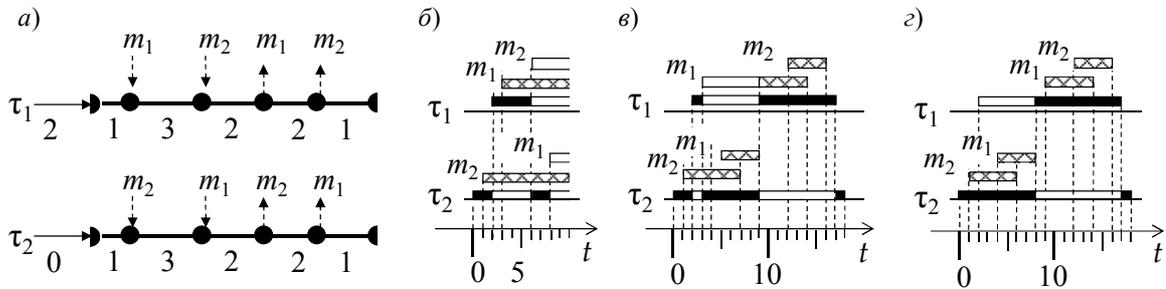


Рис. 5

Составное и взаимное блокирование в системах на многоядерных процессорах. Некоторые из отмеченных выше особенностей исполнения одноядерными процессорами программных приложений различных конфигураций с использованием определенных протоколов доступа к ресурсам не соблюдаются при исполнении на многоядерных процессорах.

Диаграмма, приведенная на рис. 6, а, показывает, что, в отличие от исполнения одноядерным процессором с ПНП приложения A_2 (см. рис. 3, а), при исполнении двухядерным процессором того же приложения с тем же протоколом составное блокирование задачи τ_1 не возникает. Можно привести такой сценарий системных событий, при котором составное блокирование на двухядерном процессоре возникает и при использовании ППНП (что исключено в случае одноядерного процессора). Отметим также, что время отклика задачи τ_1 при использовании ППП (рис. 6, б) превышает время ее отклика при использовании ПНП (см. рис. 6, а). При исполнении на одноядерном процессоре такого превышения нет.

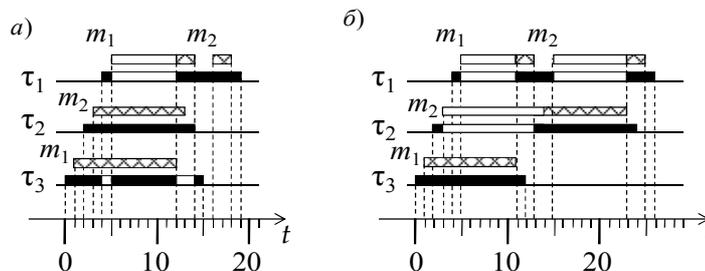


Рис. 6

Конфигурация программного приложения A_3 (см. рис. 5, а) при исполнении на одноядерном процессоре с использованием ПП или ПНП приводит к взаимному блокированию

задач. При этом использование ППП и ППНП избавляет многозадачные системы на одноядерных процессорах от возникновения такого рода некорректных ситуаций.

Диаграмма, приведенная на рис. 7, а, показывает, что в отличие от систем на одноядерных процессорах при использовании ППНП на многоядерном процессоре возможно возникновение взаимного блокирования задач. Исполнение того же приложения на том же двуядерном процессоре с использованием ППП позволяет избежать возникновения ситуации взаимного блокирования (рис. 7, б).

Таким образом, как показывает анализ, использование ППП гарантирует невозможность взаимного блокирования не только для систем на одноядерных процессорах, но и для систем на многоядерных процессорах.

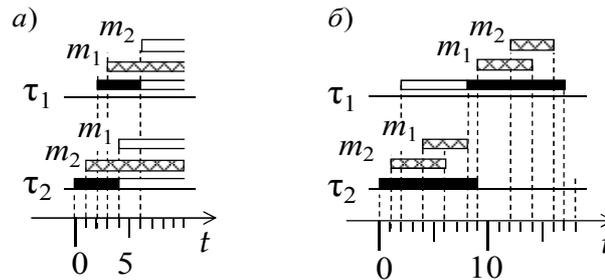


Рис. 7

Закключение. Ряд закономерностей исполнения классическими одноядерными процессорами программных приложений различных конфигураций с использованием определенных протоколов доступа к ресурсам недействителен при исполнении приложений многоядерными процессорами. Так, в системах на классических процессорах применение как ППП, так и ППНП предотвращает взаимное блокирование задач. В системах на многоядерных процессорах ППП сохраняет это полезное свойство, но ППНП его теряет. ППП и ППНП, предотвращающие составное блокирование на одноядерных процессорах, не предотвращают его в случае построения системы на многоядерном процессоре. При использовании ППП на одноядерном процессоре время отклика высокоприоритетной задачи не превосходит времени ее отклика при использовании ПНП. Для многоядерного процессора такая закономерность нарушается. Возможность возникновения составного блокирования задач приводит к увеличению значений фактора блокирования, что необходимо учитывать при оценке гарантий своевременности выполнения задач в системах реального времени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Никифоров В. В. *Операционные системы реального времени*. СПб: Изд-во Рос. гос. пед. ун-та, 2007. 109 с.
2. Давиденко К. Я. *Технология программирования АСУТП. Проектирование систем реального времени, параллельных и распределенных приложений*. М.: Энергоатомиздат, 1985. 183 с.
3. Никифоров В. В., Павлов В. А. *Операционные системы реального времени для встроенных программных комплексов // Программные продукты и системы*. 1999. № 4. С. 24—30.
4. Данилов М. В. *Методы планирования выполнения задач в системах реального времени // Там же*. 2001. № 4. С. 28—35.
5. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. *Управление задачами в системах реального времени // Материалы Первой Междунар. конф. „Автоматизация управления и интеллектуальные системы и среды“*. Нальчик: Изд-во КБНЦ РАН, 2010. Т. II. С. 139—143.
6. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. *Маршрутные сети — графический формализм представления структуры программных приложений реального времени // Тр. СПИИРАН / Под общ. ред. Р. М. Юсупова*. 2010. Вып. 14. С. 7—28.
7. Liu J.W.S. *Real-Time Systems*. NJ: Prentice Hall, 2000.

8. Dhall S. K., Liu C. L. On a real-time scheduling problem // Operating Research. 1978. Vol. 26, N 1. P. 127—140.
9. Baker T. Multiprocessors EDF and deadline monotonic schedulability analysis // Proc. of the 24th IEEE Real-Time Systems Symposium. 2003. P. 120—129.
10. Никифоров В. В. Выполнимость приложений реального времени на многоядерных процессорах // Тр. СПИИРАН / Под общ. ред. Р. М. Юсупова. 2009. Вып. 8. С. 255—284.
11. Никифоров В. В., Шкиртиль В. И. Использование многоядерных процессоров для построения систем реального времени // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 10. С. 28—35.

Сведения об авторах

- Виктор Викентьевич Никифоров** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория технологий и систем программирования; E-mail: nik@iias.spb.su
- Вячеслав Иванович Шкиртиль** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, лаборатория технологий и систем программирования; E-mail: jvatlas@mail.rcom.ru

Рекомендована
СПИИРАН

Поступила в редакцию
22.06.11 г.

УДК 53.072; 681.3

А. В. ДЕМИН, Ю. Ю. ГАТЧИНА, С. И. ЖУКОВ

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЕТОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Предложена численная модель для оценки коэффициента передачи мощности излучения при моделировании процесса прохождения лазерного излучения по трассе „атмосфера — водная поверхность — атмосфера“ методом Монте-Карло. Приведены результаты моделирования.

Ключевые слова: мониторинг, оптико-цифровые системы, светолокационные системы, пеленгация, стратификация среды.

Мониторинг окружающей среды в оптическом диапазоне спектра электромагнитного излучения — одна из актуальных проблем на современном этапе жизнедеятельности. При этом решаемый круг задач определяется как проблемами оперативного экологического контроля за состоянием среды, так и своевременным предупреждением возможных катастроф. Среди известных систем мониторинга окружающей среды в оптическом диапазоне спектра излучения наиболее широкое распространение для решения указанных задач получили оптико-цифровые системы (ОЦС) активного и пассивного типа. ОЦС пассивного типа принимают излучение среды, а системы активного типа принимают эхо-сигнал от излучателя ОЦС.

При проектировании ОЦС активного типа (далее ОЦС_{АТ}) основной является задача расчета световых полей прохождения излучения по трассе „ОЦС_{АТ} ⇒ атмосфера ⇒ граница раздела облучаемый объект — атмосфера ⇒ атмосфера ⇒ ОЦС_{АТ}“ (далее трасса) и, в частности, определение такого параметра, как коэффициент передачи мощности излучения ОЦС_{АТ}. Сложность задачи обусловлена необходимостью учета, во-первых, начальных и граничных условий, характеризующих стратификацию среды, и, во-вторых, оптико-физических параметров, характеризующих ОЦС_{АТ}.

В этой связи для упрощения решения известного уравнения светолокации для расчета мощности эхо-сигнала целесообразно воспользоваться представлением трассы в форме численной модели [1]:

$$\left. \begin{aligned}
 P(z) &= AK(z) \frac{(z')^{-2}}{4\pi} \exp \left\{ -2 \int_0^{z'} \beta_t(z) dz \right\} \left[\int_0^{ct_n/2} \beta_\pi(l) \exp \left\{ -2 \int_0^{z'+m} \beta_t(z) dz \right\} dm \right]; \\
 K(z) &= \exp \left[-\frac{3\Delta^2}{\left(z\Theta_\Sigma + \frac{d_0}{z} \right)^2} \right] \Theta_\Sigma; \quad \Theta_\Sigma = \Theta + \psi,
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $P(z)$ — поток излучения на входном зрачке оптической системы в текущий момент времени t , соответствующий удвоенному расстоянию z от излучателя до „отражателя“; $A \approx P_0 \times S_0$ — аппаратная постоянная ОЦСАТ; S_0 — площадь входной апертуры ОЦСАТ; P_0 — мощность излучения на выходе ОЦСАТ; $\beta_\pi(l)$ — коэффициент обратного рассеяния в среде; t_n — длительность импульса излучателя ОЦСАТ; Θ — телесный угол облучаемой водной поверхности на входном зрачке оптической системы; ψ — телесный угол принимающего эхосигнал блока ОЦСАТ; d_0 — диаметр выходного зрачка излучающего блока ОЦСАТ; Δ — расстояние между оптическими осями излучающего и принимающего эхосигнал блоков ОЦСАТ.

Зависимость коэффициента передачи мощности излучения по трассе от геофизической и климатической привязки ОЦСАТ (см. формулы (1)) приводит к ошибке.

В настоящей статье для расчета коэффициента передачи мощности излучения ($K_{\text{изл}}$) предложена численная модель световых полей, рассчитываемая по методу Монте-Карло.

Для численного моделирования процесса мониторинга поверхности моря построим модель этого процесса в целях выявления загрязнений. Результатом моделирования в данном случае является только математическое ожидание коэффициента передачи мощности излучения ($M_{K_{\text{изл}}}$). При построении численной модели учтем также толщину водного слоя, чтобы учесть геофизическую и климатическую привязку ОЦСАТ. Для этого воспользуемся вероятностно-статистической моделью распространения излучения на трассе [1]. Следует отметить преимущество метода Монте-Карло [2, 3], по сравнению с другими известными методами, при расчете световых полей (зависимости мощности эхосигнала от функции светового поля), которое заключается в том, что составления и решения интегродифференциальных уравнений переноса излучения не требуется.

Для расчета по методу Монте-Карло примем следующие допущения:

- взаимодействием фотонов излучения можно пренебречь;
- учитывается только результат взаимодействия фотонов излучения со средой распространения;
- в ходе мониторинга трасса находится в стационарном состоянии.

Процесс переноса излучения может быть аппроксимирован однородной марковской цепью [4] с распределением фотонов по трассе с плотностью

$$\left. \begin{aligned}
 f_l(l_t) &= \varepsilon(\mathbf{r}(l_t)) \exp \left(-\int_0^{l_t} \varepsilon(\mathbf{r}(l)) dl \right); \\
 \mathbf{r}(l_t) &= \mathbf{r}_0 + l_t \boldsymbol{\omega},
 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где \mathbf{r}_0 — начальная точка вектора пробега фотонов; $r(l_t)$ — оптическая длина отрезка $[\mathbf{r}_0, \mathbf{r}(l_t)]$; $\boldsymbol{\omega}$ — единичный вектор пробега фотонов.

Для нормировки значения плотности $f_l(l_t)$ предположим, что вне среды распространения излучения коэффициенты ослабления потока $\varepsilon = \varepsilon_0 \neq 0$, а косинус угла направления вектора

$\mathbf{r}(l_t)$ распределен с плотностью индикатрисы рассеяния излучения. Если задано несколько типов коэффициентов и индикатрис рассеяния излучения, то вероятность поглощения ($p(\mathbf{r})$) и рассеяния ($q(\mathbf{r})$) фотонов при их столкновении определяется соотношениями [5]

$$\left. \begin{aligned} p(\mathbf{r}) &= \frac{\varepsilon_0(\mathbf{r})}{\varepsilon(\mathbf{r})}, \\ q(\mathbf{r}) &= \frac{\sigma_s(\mathbf{r})}{\varepsilon(\mathbf{r})}, \end{aligned} \right\}$$

где σ_s — коэффициент поглощения среды распространения.

Примем условие, что процесс рассеяния излучения по трассе изотропный. Тогда, проинтегрировав уравнение (2), получим функцию распределения значения длины свободного пробега фотонов по трассе [1, 4]:

$$l(t) = \int_0^{l_t} \varepsilon(\mathbf{r}(l_t, t)) dt.$$

Принимая условие, что процесс изменения азимутального угла рассеяния φ (для вертикальной трассы) изотропный, распределение его по потоку можно выразить формулой $\varphi = 2\pi\alpha$, где $\alpha \in (0 \dots 1)$ — случайное число.

При моделировании процесса прохождения лазерного излучения по трассе методом Монте-Карло зададим функцию длины свободного пробега фотонов как функцию времени [1, 4].

На рис. 1 и 2 приведены фрагмент компьютерного изображения морской поверхности и нормированные спектры волновых чисел (k), полученные при моделировании процесса прохождения лазерного излучения по трассе „атмосфера — морская поверхность — атмосфера“ методом Монте-Карло при следующих условиях: граница раздела нестационарна и неизотропна, а скорость ветра составляет 6, 4 и 2 м/с (кривые 1—3 соответственно на рис. 2).

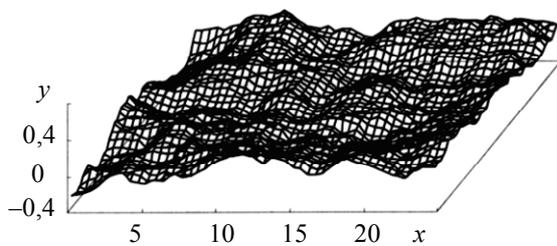


Рис. 1

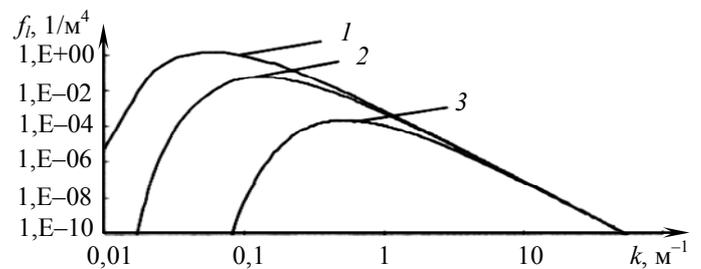


Рис. 2

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы:

— нестационарность коэффициента передачи излучения морской поверхности проявляется при приеме эхо-сигнала на глубинах до 50 м;

— математическое ожидание коэффициента передачи мощности излучения практически не зависит от скорости ветра в диапазоне 2...4 м/с, так же как и от глубины приема эхо-сигнала: $M_{K_{изл}} \approx 1,3 \dots 1,5$.

— для уточнения и верификации статистической модели влияния взволнованной поверхности моря на распространение лазерного излучения желательно получение дополнительных экспериментальных данных.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Демин А. В., Виноградов Ю. Н., Копорский Н. С. и др. Численное моделирование оптического канала связи по трассе „атмосфера — граница раздела океан—атмосфера — толщина океана“ // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 10. С. 23—26.
2. Метод Монте-Карло в атмосферной оптике / Под ред. Г. И. Марчука. Новосибирск: Наука, 1976. 278 с.
3. Ермаков С. М. Метод Монте-Карло и смежные вопросы. М.: Наука, 1975. 471 с.
4. Демин А. В., Журенков А. Г., Яковлев В. А. и др. Моделирование трасс дистанционного оптического зондирования океана // Авиакосмическое приборостроение. 2005. № 10. С. 20—23.
5. Волков О. А., Денисенко С. А., Константинов К. В. Светолокационный измеритель высоты нижней границы облаков ДОЛ-2 // Оптич. журн. 2009. Т. 76, № 10. С. 29—34.

Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Демин** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информатики и прикладной математики;
E-mail: dav_60@mail.ru
- Юлия Юрьевна Гатчина** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра проектирования компьютерных систем; ассистент;
E-mail: Gatchina@mail.ifmo.ru
- Сергей Ильич Жуков** — ОАО „ЛОМО“, Санкт-Петербург; гл. специалист

Рекомендована кафедрой
информатики и прикладной математики

Поступила в редакцию
30.03.10 г.

УДК 004.3

М. А. АЛЛЕС, С. В. СОКОЛОВ, С. М. КОВАЛЕВ

ОПТИЧЕСКИЕ НЕЧЕТКО-ЛОГИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА

Обсуждается проблема аппаратной реализации нечетко-логических устройств и систем, осуществляющих обработку нечеткой информации. Рассмотрены недостатки существующих микропроцессорных средств обработки. Показаны перспективы применения нечетко-логических устройств, использующих пространственно-распределенные оптические вычисления, рассмотрен пример аппаратной реализации — оптический дефазификатор.

Ключевые слова: нечеткая логика, микропроцессор, оптические технологии обработки информации, оптический фазификатор.

Введение. В последние десятилетия резко возрос интерес к различным аспектам проблемы интеллектуального управления. Одно из основных направлений, связанных с решением этой проблемы, — использование аппарата нечетких систем: нечетких множеств, нечеткой логики, нечеткого моделирования и т.п. Применение этого аппарата обуславливает возможность построения систем управления и моделирования в ситуациях, когда традиционные методы неэффективны либо вообще неприменимы из-за отсутствия знаний об объекте управления или сложности его математической формализации [1].

Мировая практика применения аппарата нечетких систем показывает удовлетворительные результаты при построении автоматических и автоматизированных систем в различных отраслях промышленности, транспортной инфраструктуры, проектирования: например, таких, как проектирование промышленных роботов и бытовых электроприборов, управление

доменными печатами и движением поездов метро, автоматическое распознавание речи и изображений [1].

Однако для эффективной реализации нечетких алгоритмов управления и моделирования, требующих обработки большого объема информации при малом времени реакции системы управления, необходимо создание специализированных технических средств, ориентированных на обработку нечеткой информации практически в режиме реального времени.

Синтез оптических нечетко-логических устройств. В настоящее время основную техническую базу нечетких технологий составляют микропроцессорные средства и микроконтроллеры [2]. Но эти устройства не способны в полной мере реализовать все потенциальные возможности нечеткой логики по следующим объективным причинам:

— их быстроедействие в части реализации ряда сложных нечетких операторов ограничено из-за последовательной обработки данных, присущей современным микропроцессорным средствам;

— погрешность вычислений с течением времени постоянно растет вследствие неизбежных методических ошибок, обусловленных использованием цифровых методов вычисления.

Так, например, специализированный вычислительный комплекс обработки нечеткой информации, выполненный на базе микропроцессорных средств [2], позволяет осуществить операцию выборки элемента терма лишь за 5 мкс, а реализацию одной микрокоманды — только за 2 мкс.

Поэтому возникает задача конструирования нового класса устройств обработки нечетко-логической информации, обладающих значительным быстроедействием, простотой конструкции и настройки параметров и обеспечивающих высокую точность вычислений на произвольном интервале времени обработки информации.

Анализ современных информационных технологий показывает, что простота реализации элементарных действий над нечеткими множествами, на которых базируются этапы нечетко-логического вывода [1], а именно:

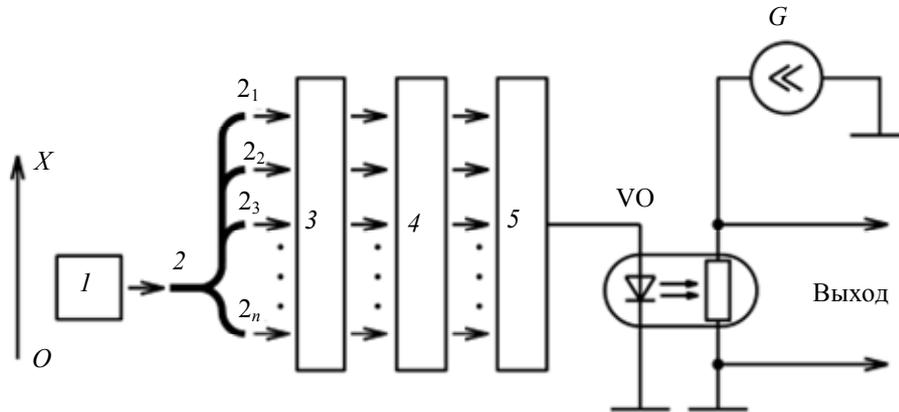
- этап введения нечеткости — фаззификация;
- этап логических операций (операции пересечения, объединения, дополнения нечетких множеств);
- этап приведения к четкости — дефаззификация,

может быть обеспечена путем использования оптоэлектронной технологии обработки информации и основных методов оптической схмотехники [3, 4]. Причем подобная технология позволяет выполнять вышеперечисленные операции в режиме реального времени, т.е. практически мгновенно. При этом отсутствуют необходимость в дискретизации и последовательной обработке всех параметров, характеризующих нечеткие множества, и накопление ошибок вычислений с течением времени (что неизбежно при использовании микропроцессорных схем и регистровых структур [2]).

Так, например, в работе [3, рис. 3, 4] был описан оптоэлектронный фаззификатор, состоящий из источника света, оптического канала передачи, электрооптического дефлектора, маски с отверстиями и блока фотоприемников. Принцип действия такого фаззификатора заключается в том, что значение функции принадлежности конкретного терма лингвистической переменной на базовой шкале определяется как площадь засветки отверстия маски, отнесенная к максимальной площади засветки блока фотоприемников. Однако предложенный в работе [3] оптоэлектронный фаззификатор имеет недостаток — невозможность реализации произвольных функций принадлежности.

В этой связи требуется подобрать такой комплекс методов и средств оптической обработки информации, который позволит наиболее эффективно, гибко и просто реализовывать элементарные действия над нечеткими множествами.

Оптический фаззификатор. Для иллюстрации эффективности применения оптических технологий при синтезе нечетко-логических устройств автоматизации рассмотрим конструкцию и принцип действия оптического фаззификатора, функциональная схема которого показана на рисунке.



Оптический фаззификатор — устройство, предназначенное для вычисления в режиме реального времени значения функции

$$\gamma = \max_i \{ \alpha(x_i) \beta(x_i) \}, \quad \alpha(x_i) \in [0, 1], \quad \beta(x_i) \in [0, 1], \quad (1)$$

где x_i — конкретное числовое („четкое“) значение входной лингвистической переменной, определенное на базовой шкале X (x_1, x_2, \dots, x_n , где n — определенное число значений базовой шкалы X , $x_i \in X$); $\alpha(x_i)$ — функция принадлежности, описывающая терм нечеткой лингвистической переменной x ; $\beta(x_i)$ — функция принадлежности нечеткого множества, в виде которого представлена входная переменная x .

Функционирование оптического фаззификатора осуществляется следующим образом. С выхода источника излучения I оптический поток с интенсивностью n усл. ед. поступает на вход оптического n -выходного разветвителя 2 , с выходов $2_1, 2_2, \dots, 2_n$ которого оптические потоки единичной интенсивности поступают на входы первого линейного оптического транспаранта (ЛОТ) 3 с функцией пропускания по оси OX , пропорциональной $(\sqrt{\alpha(x)})^{-1}$. На выходах ЛОТ 3 формируется плоский оптический поток с интенсивностью по оси OX , пропорциональной функции $1/\alpha(x)$. Этот оптический поток поступает на входы второго ЛОТ 4 с функцией пропускания по оси OX , пропорциональной $(\sqrt{\beta(x)})^{-1}$, на выходах которого формируется оптический поток с интенсивностью по оси OX , пропорциональной функции $1/(\alpha(x)\beta(x))$. Данный оптический поток поступает на соответствующие входы селектора минимального сигнала (СМС) 5 (аналогичного описанному в работе [5]), с выхода которого снимается сигнал напряжения, пропорциональный значению $U = \min_k \{ 1/(\alpha(x_k)\beta(x_k)) \}$, $k = 1, \dots, n$ (при этом очевидно, что минимум значения функции $1/(\alpha(x)\beta(x))$ определен для того же значения аргумента x_i , для которого определен и максимум функции $\alpha(x_i)\beta(x_i)$, $i = 1, \dots, n$).

Выходной сигнал СМС 5 поступает на светоизлучающий диод резисторной оптопары VO . Сопротивление R_{VO} обратно пропорционально входному току резисторной оптопары [6], т.е. выходному сигналу СМС 5 , и, следовательно,

$$R_{VO} \sim \frac{1}{1/(\alpha(x_i)\beta(x_i))} \sim \alpha(x_i)\beta(x_i). \quad (2)$$

Напряжение на выходе резисторной оптопары определяется как

$$U_{\text{Вых}} = R_{VO} \cdot I, \quad (3)$$

где $I = 1$ усл. ед. — ток генератора G стабильного тока (выполненного аналогично генератору, описанному в работе [7, с. 190, рис. 9.4 б]).

Таким образом, с учетом выражений (2) и (3), напряжение $U_{\text{вых}}$ оказывается пропорциональным величине $\alpha(x_i)\beta(x_i)$, т.е. пропорциональным искомому значению γ : $\gamma \sim U_{\text{вых}}$.

Неизбежность многофазной обработки оптических потоков в рассмотренном фаззификаторе обусловлена необходимостью последовательного выполнения принципиально различных математических операций в процессе фаззификации (1), приводящих, в свою очередь, к использованию различных методов оптической обработки информации. В целом быстродействие оптического фаззификатора определяется динамическими характеристиками селектора минимального сигнала и резисторной оптопары и не превышает десятых долей миллисекунды (время срабатывания СМС, выполненного на лавинных фотодиодах, до 80—100 пс, а резисторной оптопары — до 200 мкс).

Заключение. Использование оптических методов обработки информации в нечетко-логических системах позволяет наряду с существенным выигрышем в быстродействии упростить конструкцию и процесс функционирования систем обработки информации. Это достигается благодаря более простой и быстродействующей реализации элементарных операций над нечеткими множествами по сравнению с регистровыми реализациями [2]: в микропроцессорных системах обработки нечеткой информации с увеличением значений базовых шкал нечетких переменных происходит *нелинейное* увеличение времени выполнения этапов фаззификации и дефаззификации [8]. При использовании же оптических устройств обработки нечеткой информации, подобных описанным выше, быстродействие системы практически не зависит от количества элементов нечетких множеств, так как все логические операции над значениями базовых шкал и функций принадлежности нечетких переменных выполняются параллельно и в режиме реального времени. Кроме того, существующие микропроцессорные системы обработки нечеткой информации обладают значительными габаритами, массой и потребляемой мощностью. Так, мультимикропроцессорная система, описанная в работе [8], имеет габаритные размеры 600×2200×1000 мм, массу порядка 170 кг и мощность потребления 4,5 кВт.

В то же время все линейные размеры компонентов рассмотренного оптического фаззификатора имеют микронный порядок, поэтому он достаточно легко может быть реализован в виде оптической интегральной микросхемы с площадью не более 5—10 см². При этом потребляемая мощность активных компонентов оптических интегральных микросхем (полупроводниковых лазеров, оптопар и пр.), как правило, не превышает 1 Вт [9, 10].

В завершение проведенного сравнительного анализа следует отметить, что стоимость нечетко-логических устройств и стабильность их характеристик при оптоинтегральном исполнении в настоящее время не уступает стоимости и стабильности аналогичных устройств, выполненных по традиционной кремниевой технологии [10, 11].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: БИНОМ, 2009. 798 с.
2. Мелихов А. Н., Баронец В. Д. Проектирование микропроцессорных средств обработки нечеткой информации. Ростов-на-Дону: Изд-во Ростов. ун-та, 1990. 128 с.
3. Городецкий А. Е., Ерофеев А. А., Жуikov А. Ю. Нечеткие технологии управления в оптоэлектронных системах // Тез. докл. Междунар. конф. по мягким вычислениям и измерениям. СПб, 2000.
4. Акаев А. А., Майоров С. А. Оптические методы обработки информации. М.: Высш. школа, 1988.
5. А.с. 1223259 СССР. Селектор минимального сигнала / С. В. Соколов и др. 1986.

6. Иванов В. И., Аксенов А. И., Юшин А. М. Полупроводниковые оптоэлектронные приборы: Справочник / Под ред. Н. Н. Горюнова. М.: Энергоатомиздат, 1984. 184 с.
7. Либерман Ф. Я. Электроника на железнодорожном транспорте: Учеб. пособие. М.: Транспорт, 1987. 288 с.
8. Масштабируемые мультипроцессорные вычислительные системы высокой производительности / А. Буравлев, М. Чельдиев, А. Барыбин, и др. // Современные технологии автоматизации. 2009. № 3. С. 72—76.
9. Семенов А. С., Смирнов В. Л., Шмалько А. В. Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации. М.: Радио и связь, 1990. 224 с.
10. Клэр Ж.-Ж. Введение в интегральную оптику / Пер. с франц.; Под ред. В. К. Соколова. М.: Сов. радио, 1980. 104 с.
11. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. М.: Радио и связь, 1989. 360 с.

Сведения об авторах

- Михаил Александрович Аллес** — аспирант; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: alles@nextmail.ru
- Сергей Викторович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: s.v.s.888@yandex.ru
- Сергей Михайлович Ковалев** — д-р техн. наук, профессор; Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра автоматики и телемеханики на железнодорожном транспорте, Ростов-на-Дону; E-mail: ksm@rfniias.ru

Рекомендована кафедрой
автоматики и телемеханики на
железнодорожном транспорте

Поступила в редакцию
22.03.11 г.

С. П. ПИРОГОВ, А. Ю. ЧУБА

РАСЧЕТ ЧАСТОТ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МАНОМЕТРИЧЕСКИХ ТРУБЧАТЫХ ПРУЖИН

Представлен вывод уравнений движения манометрической трубчатой пружины. Пружина рассматривается как изогнутый стержень, совершающий колебания в плоскости кривизны центральной оси. Приведены зависимости частоты собственных колебаний трубчатых пружин от геометрических параметров.

Ключевые слова: собственные колебания, манометрическая трубчатая пружина.

Манометрические приборы часто работают в условиях вибраций, при этом их основные упругие чувствительные элементы — трубчатые пружины — совершают колебательное движение, что негативно сказывается на точности приборов.

Важной характеристикой виброустойчивости приборов является частота собственных колебаний трубчатых пружин, поэтому необходимо определить влияние их геометрических размеров на данный параметр.

Существуют запатентованные конструкции манометрических пружин, обладающих повышенной вибростойкостью. Все эти пружины имеют поперечное сечение, переменное по длине трубки. В настоящей статье предлагается метод расчета частот собственных колебаний, применимый и для пружин, имеющих переменное поперечное сечение.

Будем рассматривать трубку Бурдона как изогнутый стержень, совершающий колебания в плоскости кривизны центральной оси. Уравнения колебаний (в соответствии с принципом Даламбера) получены из равенств нулю сумм проекций на нормаль и касательную всех сил, приложенных к элементу пружины (с учетом силы инерции) [1] (рис. 1):

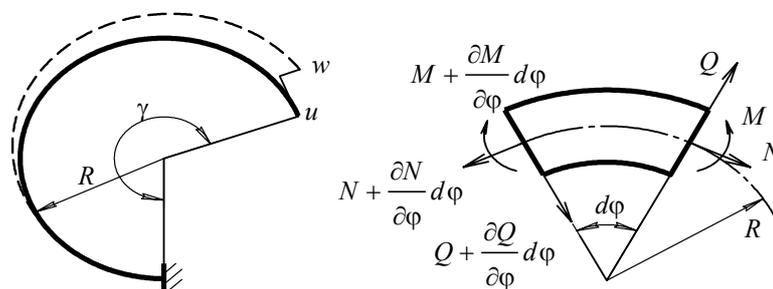


Рис. 1

$$\left. \begin{aligned} -\frac{N}{R} - \frac{1}{R} \frac{\partial Q}{\partial \varphi} &= m_i(\varphi) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \\ \frac{1}{R} \frac{\partial N}{\partial \varphi} - \frac{Q}{R} &= m_i(\varphi) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где N — продольная сила; Q — поперечная сила; $m_i(\varphi)$ — масса единицы длины трубки (масса поперечного сечения с координатой φ); w, u — соответственно радиальная и окружная составляющие перемещений центра тяжести поперечного сечения с координатой φ .

Система уравнений (1) для перемещений u и w имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ D_R \left(\frac{\partial u}{\partial \varphi} + w \right) \right\} + \frac{\partial}{\partial \varphi} \left\{ H_R \left(\frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) \right\} &= m_i(\varphi) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \\ -D_R \left(\frac{\partial u}{\partial \varphi} + w \right) + \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \left\{ H_R \left(\frac{\partial u}{\partial \varphi} - \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) \right\} &= m_i(\varphi) \frac{\partial^2 w}{\partial t^2}; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$D_R = \frac{ES(\varphi)}{(1-\mu^2)R^2}, \quad H_R = \frac{EJ(\varphi)K_K(\varphi)}{R^4(1-\mu^2)}, \quad m_i(\varphi) = \rho S(\varphi),$$

где E — модуль упругости материала трубки; $S(\varphi)$ — площадь поперечного сечения трубки; μ — коэффициент Пуассона; $J(\varphi)$ — момент инерции сечения; $K_K(\varphi)$ — коэффициент Кармана (определяется методом, предложенным в работе [2]); величины $S(\varphi)$, $J(\varphi)$, $K_K(\varphi)$ зависят от угловой координаты φ сечения и его геометрических размеров.

Система уравнений (2) решается при следующих граничных условиях: в сечении жесткого закрепления пружины (при $\varphi=0$) касательное и нормальное перемещения и угол поворота γ поперечного сечения трубки равны нулю, а на противоположном конце (при $\varphi=\gamma$) изгибающий момент (M), перерезывающие и растягивающие усилия обращаются в нуль.

Собственные изгибные колебания подчиняются гармоническому закону с частотой k , поэтому решение системы уравнений (2) можно представить в виде

$$u(\varphi, t) = u(\varphi) \sin(kt + \beta), \quad w(\varphi, t) = w(\varphi) \sin(kt + \beta), \quad (3)$$

где k — круговая частота колебаний.

При решении системы (2) применялся приближенный метод Бубнова — Галеркина. В соответствии с этим методом зададим искомые функции составляющих перемещений:

$$u(\varphi) = a_1 u_1 + a_2 u_2 + \dots + a_n u_n = \sum_{i=1}^n a_i u_i; \quad w(\varphi) = b_1 w_1 + b_2 w_2 + \dots + b_n w_n = \sum_{j=1}^n b_j w_j, \quad (4)$$

где $a_1, a_2, \dots, a_n, b_1, b_2, \dots, b_n$ — неопределенные коэффициенты; $u_1, u_2, u_n, w_1, w_2, w_n$ — базисные функции переменной φ .

Подстановка выражений (4) в преобразованную методом Галеркина систему (2) приводит к системе из $2n$ уравнений, при этом в силу граничных условий часть слагаемых равны нулю:

$$\begin{aligned} & a_1 \int_0^\gamma \left(-D_R \frac{du_1}{d\varphi} - H_R \frac{du_1}{d\varphi} \right) \frac{du_i}{d\varphi} d\varphi + \dots + a_n \int_0^\gamma \left(-D_R \frac{du_n}{d\varphi} - H_R \frac{du_n}{d\varphi} \right) \frac{du_i}{d\varphi} d\varphi + \\ & + b_1 \int_0^\gamma \left(-D_R w_1 + H_R \frac{d^2 w_1}{d\varphi^2} \right) \frac{du_i}{d\varphi} d\varphi + \dots + b_n \int_0^\gamma \left(-D_R w_n + H_R \frac{d^2 w_n}{d\varphi^2} \right) \frac{du_i}{d\varphi} d\varphi = \\ & = -a_1 k^2 \int_0^\gamma m_0 u_1 u_j d\varphi - \dots - a_n k^2 \int_0^\gamma m_0 u_n u_j d\varphi; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & a_1 \int_0^\gamma \left(-D_R \frac{du_1}{d\varphi} w_j + H_R \frac{du_1}{d\varphi} \frac{d^2 w_j}{d\varphi^2} \right) d\varphi + \dots + a_n \int_0^\gamma \left(-D_R \frac{du_n}{d\varphi} w_i + H_R \frac{du_n}{d\varphi} \frac{d^2 w_j}{d\varphi^2} \right) d\varphi + \\
 & + b_1 \int_0^\gamma \left(-D_R w_1 w_j - H_R \frac{d^2 w_1}{d\varphi^2} \frac{d^2 w_j}{d\varphi^2} \right) d\varphi + \dots + b_n \int_0^\gamma \left(-D_R w_n w_j - H_R \frac{d^2 w_n}{d\varphi^2} \frac{d^2 w_j}{d\varphi^2} \right) d\varphi = \\
 & = -b_1 k^2 \int_0^\gamma m_0 w_1 w_j d\varphi - \dots - b_n k^2 \int_0^\gamma m_0 w_n w_i d\varphi .
 \end{aligned}$$

Выберем базисные функции u_i и w_j :

$$u_i(\varphi) = \varphi^i, \quad i = 1, \dots, n; \quad w_j(\varphi) = \varphi^{j+1}, \quad j = 1, \dots, n.$$

Легко проверить, что выбранные функции удовлетворяют главным граничным условиям. Получим однородную систему алгебраических уравнений порядка $2n$ относительно неизвестных $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n$. Данная система уравнений имеет ненулевое решение только в том случае, если определитель матрицы этой системы равен нулю. Запишем его в виде

$$\begin{vmatrix} A_{1,1} & \dots & B_{1,n} \\ \dots & \dots & \dots \\ A_{2n,1} & \dots & B_{2n,n} \end{vmatrix} = 0, \tag{5}$$

где

$$\begin{aligned}
 A_{1,1} &= \int_0^\gamma (-D_R - H_R) d\varphi + k^2 \int_0^\gamma m_0 \varphi^2 d\varphi, \quad B_{1,n} = \int_0^\gamma (-D_R \varphi^{n+1} + H_R n(n+1) \varphi^{n-1}) d\varphi; \\
 A_{2n,1} &= \int_0^\gamma (-D_R \varphi^{n+1} + H_R n(n+1) \varphi^{n-1}) d\varphi, \\
 B_{2n,n} &= \int_0^\gamma (-D_R \varphi^{2n+2} - H_R n^2 (n+1)^2 \varphi^{2n-2}) d\varphi + k^2 \int_0^\gamma m_0 \varphi^{2n+2} d\varphi.
 \end{aligned}$$

Условие равенства нулю определителя (5) можно рассматривать как уравнение для определения частот колебаний k . Поскольку порядок определителя равен $2n$, то уравнение будет иметь $2n$ корней, которые являются частотами собственных колебаний трубчатой пружины. Те значения k , при которых определитель равен нулю, являются круговыми частотами собственных колебаний [3].

Результаты численного эксперимента показали, что с увеличением количества базисных функций u_i и w_j частота колебаний стремится к некоторому предельному значению. Согласно расчетам для получения удовлетворительных результатов по первой собственной частоте колебаний достаточно вычислять по пять базисных функций.

На основе рассмотренного способа определения частот собственных колебаний составлены алгоритм и программа для ЭВМ [4], с помощью которой проведены расчеты частот собственных колебаний. По результатам расчетов построены графики зависимости частот собственных колебаний от геометрических параметров трубчатых пружин (рис. 2): радиуса изгиба

трубки (R), толщины стенки трубки (h), радиуса трубки-заготовки (r), угла поворота (γ) и отношения полуосей эллиптической трубки-заготовки (a/b).

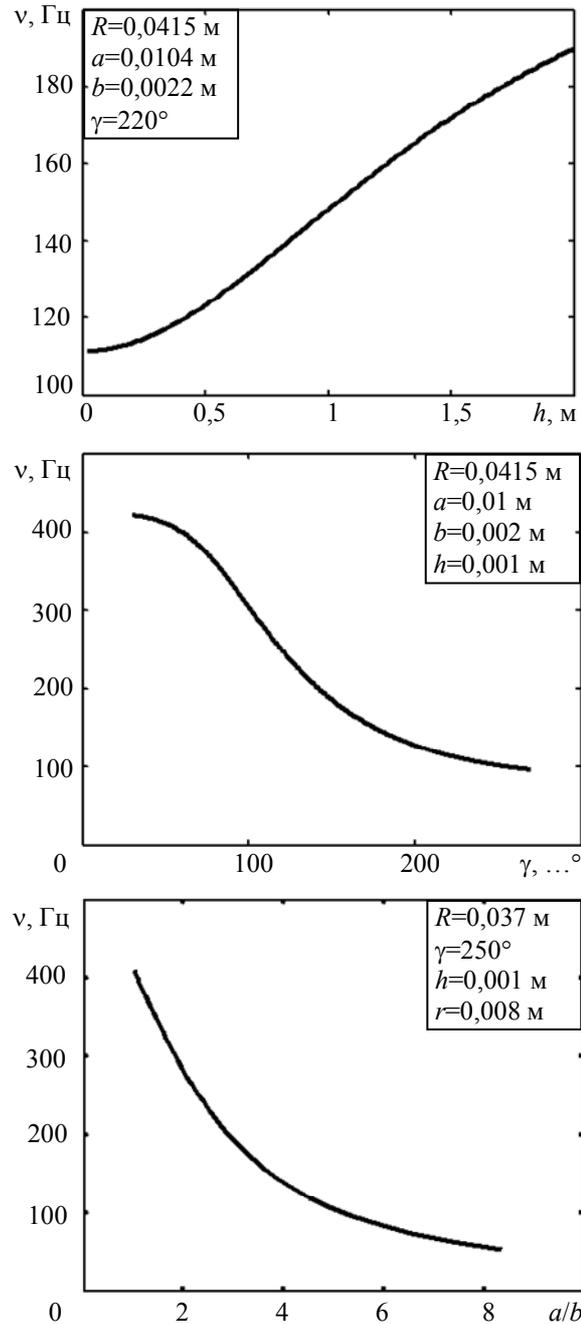


Рис. 2

Для пружин с переменным по длине поперечным сечением установлено, что уменьшение толщины стенки трубки от закрепленного конца к свободному, а также уменьшение радиуса трубки-заготовки от закрепленного конца к свободному приводит к увеличению частоты собственных колебаний. Сравнение манометрических пружин разных конструкций показало, что наибольшей частотой собственных колебаний обладают манометрические пружины, сечения которых изменяются от восьмеркообразного (в закреплении) до плоскоовального (на свободном конце). Частоты собственных колебаний трубчатых пружин переменного по длине поперечного сечения на 20 — 40 % превышают частоты собственных колебаний пружин обычных конструкций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бидерман В. Л. Теория механических колебаний. М.: Высш. школа, 1980. 408 с.
2. Дорофеев С. М., Пирогов С. П., Самакалев С. С. Приближенное решение задачи об изгибе манометрической пружины переменного сечения // Мегапаскаль: Сб. науч. тр. Тюмень: ТюмГНГУ, 2006. № 2. С. 46—48.
3. Чуба А. Ю., Пирогов С. П., Дорофеев С. М. Определение собственных частот колебаний манометрических трубчатых пружин // Изв. вузов. Нефть и газ. 2007. № 2. С. 70—74.
4. Свид. об официальной регистрации программы ЭВМ, 2007612005 РФ. Программный комплекс „ПКРМТП“ для расчета манометрических трубчатых пружин / А. Ю. Чуба, С. С. Самакалев, С. П. Пирогов. 2007611194; Заявл. 2.04.2007; Опубл. 17.05.2007.

Сведения об авторах

- Сергей Петрович Пирогов** — канд. техн. наук, доцент; Тюменский государственный нефтегазовый университет, кафедра теоретической и прикладной механики;
E-mail: piro-gow@yandex.ru
- Александр Юрьевич Чуба** — канд. техн. наук, доцент; Тюменская государственная сельскохозяйственная академия, кафедра общетехнических дисциплин;
E-mail: aleksandr-chuba@mail.ru

Рекомендована кафедрой
теоретической и прикладной
механики ТюмГНГУ

Поступила в редакцию
24.12.10 г.

УДК 62-233.21, 62-722.2

В. С. МАЙОРОВ

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ПОДШИПНИКОВ СКОЛЬЖЕНИЯ

Рассмотрены причины износа гидродинамических подшипников скольжения и способы повышения надежности их работы. Предложена новая конструкция подшипника, составлена математическая модель и приведены данные компьютерного расчета, а также результаты физического моделирования.

Ключевые слова: гидродинамический подшипник скольжения, несущая способность, эксцентриситет, коэффициент запаса надежности.

Подшипники скольжения получили широкое применение в качестве опор валов и осей благодаря особенностям своей конструкции. Данные подшипники могут применяться при вибрационных нагрузках, особо высоких частотах вращения, для точных опор с постоянной жесткостью, для опор с малыми радиальными размерами, для разъемных опор, при работе в экстремальных условиях.

Принцип работы подшипников скольжения основан на способности воспринимать нагрузку, обеспечивая разделение трущихся поверхностей слоем смазочного материала до полного исключения их непосредственного контакта. Однако несмотря на то, что подшипник, работающий в режиме жидкостного трения, теоретически не должен быть подвержен износу, существует проблема износа опорных поверхностей таких подшипников. В частности, недостаточная надежность подшипников скольжения, применяемых в локомотивных двигателях внутреннего сгорания, приводит к серьезным неисправностям и длительному простоем подвижного состава. Повышенный износ подшипников в данных системах связан с воздействием переменных по величине и направлению нагрузок, обусловленных спецификой работы цилиндров и влиянием неуравновешенных масс. Вследствие воздействия этих факторов даже

в установившемся режиме работы цапфа совершает колебания внутри подшипника, причем амплитуда этих колебаний достаточна, чтобы нарушить условие обеспечения жидкостного трения и привести к повышенному износу.

Один из наиболее эффективных методов повышения надежности подшипников скольжения — увеличение толщины смазочного слоя. Существуют различные способы достижения данного эффекта, например, создание многоклиновой конструкции подшипника, применение электрических и магнитных центрирующих устройств. Однако в ряде случаев такие способы неприменимы из-за сложности получаемой конструкции. В настоящей статье рассматривается новая конструкция гидродинамического подшипника скольжения, предназначенного для использования на железнодорожном транспорте и обладающего повышенной надежностью благодаря особой форме рабочей поверхности, предложенной проф. К. Н. Войновым и исследованной автором статьи.

Работа гидродинамического подшипника скольжения в режиме жидкостного трения возможна, если смазка образует прочную достаточно толстую пленку. Контактное трение, являющееся главным фактором износа подшипников, возникает в случае, когда минимальная толщина смазочной пленки (h_{\min}) меньше ее критической толщины ($h_{\min \text{кр}}$).

Надежность работы гидродинамического подшипника скольжения характеризуется коэффициентом запаса надежности, значения которого для подшипников различных двигателей рассчитываются по формуле [1, 2]

$$x = \frac{h_{\min}}{h_{\min \text{кр}}}.$$

Устойчивое положение цапфы в смазочной жидкости характеризуется равновесием внешней нагрузки, передаваемой цапфой на опору, и равновесием гидродинамических сил слоя смазки. При изменении скорости вращения вала центр цапфы перемещается по траектории, близкой к полуокружности диаметром $\delta_1 = 0,5s$, где s — зазор между цапфой и подшипником. При положении центра цапфы на этой кривой, называемой кривой подвижного равновесия [3], внешняя нагрузка и возникающие в смазочном слое гидродинамические силы находятся в равновесии.

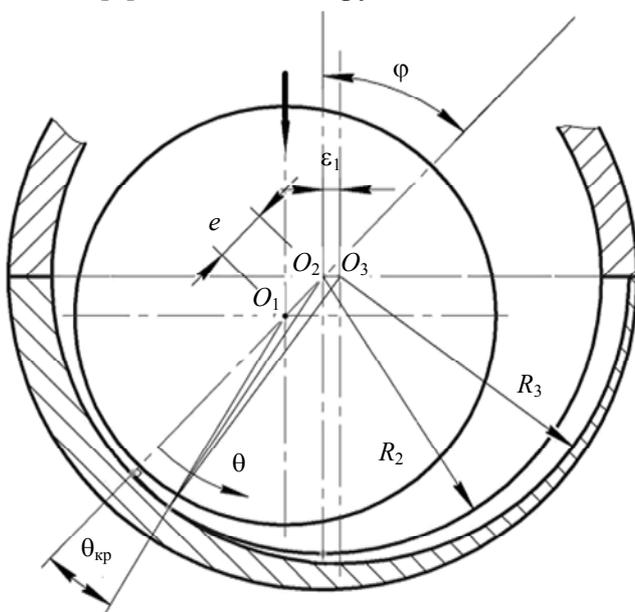


Рис. 1

Для простоты построим решение на основе уравнения Зоммерфельда. С учетом всех допущений [4, 5] получим следующее уравнение для расчета гидродинамических давлений:

Таким образом, центровку цапфы можно улучшить, изменив положение дуги подвижного равновесия за счет изменения конфигурации рабочей поверхности подшипника.

Положение цапфы относительно вкладыша подшипника определяется углом φ между линией действия нагрузки P и линией центров, а также величиной эксцентриситета e .

Для подшипника с гладкой рабочей поверхностью, где цапфа при увеличении скорости движется по полуокружности с радиусом $\delta_1/2$, эксцентриситет можно вычислить как

$$e = \delta_1 \cos \varphi.$$

Для исследования свойств подшипника новой конструкции, расчетная схема которого показана на рис. 1, составим его математическую модель.

$$\Delta p(\theta) = \frac{6\mu VR_1}{\delta_1^2} \frac{\alpha^2}{2\alpha^2 + 1} \frac{\sin \theta}{\alpha - \cos \theta} \left(1 + \frac{\alpha}{\alpha - \cos \theta} \right), \quad (1)$$

где $\alpha = \delta_1/e$ — отношение радиального зазора к эксцентриситету; R_1 — радиус цапфы; V — окружная скорость цапфы; μ — динамическая вязкость; θ — угловая координата.

Формула (1) подходит для подшипника с гладкой рабочей поверхностью, однако для расчета подшипника предлагаемой конструкции в нее необходимо внести изменения.

В новом варианте подшипника благодаря наличию канавок с радиусом кривизны, отличным от радиуса кривизны опорной поверхности, конечная точка траектории движения цапфы при увеличении скорости вращения не будет совпадать с центром O_2 опорной поверхности. Положение этой точки относительно центра кривизны опорной поверхности определяется как расстояние от нее до центра кривизны опорной поверхности:

$$\varepsilon_2 = \frac{\arccos\left(\frac{R_2^2 + \varepsilon_1^2 - R_3^2}{2R_2\varepsilon_1}\right) \varepsilon_1 l_k}{\pi l_{\Pi}}, \quad (2)$$

где l_k — суммарная ширина канавок, мм; l_{Π} — длина подшипника, мм; R_2 — радиус подшипника, мм; R_3 — радиус канавок, мм; ε_1 — смещение центра кривизны канавок, мм.

Радиус дуги траектории в данном случае вычисляется как

$$\delta_2/2 = \sqrt{\left(\frac{\delta_1}{2}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_2}{2}\right)^2}.$$

Таким образом, эксцентриситет для данного подшипника может быть вычислен по формуле

$$e = \sqrt{\frac{\delta_2^2}{2} \left(1 + \cos \left(2\varphi + 2 \cos \left(\frac{(\delta_2/2)^2 + (\delta_1/2)^2 - (\varepsilon_2/2)^2}{\delta_1 \delta_2 / 2} \right) \right) \right)}.$$

Угловые координаты θ_1, θ_2 границ несущего слоя определяются по формулам

$$\theta_1 = \pi - \arcsin \left(\frac{R_2 \cos \varphi}{\sqrt{R_2^2 + e^2 + 2R_2 e \sin \varphi}} \right),$$

$$\theta_2 = -\arcsin \left(\frac{R_2 \cos \varphi}{\sqrt{R_2^2 + e^2 - 2R_2 e \sin \varphi}} \right).$$

Введем в расчет дополнительный параметр $\theta_{кр}$, определяющий угловую координату точки выхода канавки на рабочую поверхность; значение параметра $\theta_{кр}$ зависит от угла γ охвата канавки.

Если $\varphi = \gamma - \pi/2$, то $\theta_{кр} = 0$.

Если $\varphi < \gamma - \pi/2$, то

$$\theta_{кр} = \pi - \arcsin \left(\frac{-R_2 \cos(\varphi - \gamma)}{\sqrt{R_2^2 + e^2 - 2R_2 e \sin(\varphi - \gamma)}} \right).$$

Если $\varphi > \gamma - \pi/2$, то

$$\theta_{кр} = \arcsin \left(\frac{R_2 \cos(\varphi - \gamma)}{\sqrt{R_2^2 + e^2 - 2R_2 e \sin(\varphi - \gamma)}} \right) - \pi.$$

Таким образом, при $\theta = \theta_2 \dots \theta_{кр}$ избыточное гидродинамическое давление $\Delta p(\theta)$ определяется по формуле (1), а при $\theta = \theta_{кр} \dots \theta_1$ — по формуле

$$\Delta p(\theta) = \frac{6\mu VR_1}{(\delta')^2} \frac{(\alpha')^2}{2(\alpha')^2 + 1} \frac{\sin(\theta + \lambda)}{\alpha' - \cos(\theta + \lambda)} \left(1 + \frac{\alpha'}{\alpha' - \cos(\theta + \lambda)} \right),$$

где $\delta' = R_3 - R_1$, $\alpha' = \delta' / \sqrt{e^2 + \varepsilon_1^2 + 2e\varepsilon_1 \sin \varphi}$, $\lambda = \arcsin \frac{\varepsilon_1 \cos \varphi}{\sqrt{e^2 + \varepsilon_1^2 + 2e\varepsilon_1 \sin \varphi}}$.

В результате получим зависимость поля распределения гидродинамического давления Δp , несущей способности смазочного слоя P и положения цапфы вала в подшипнике от геометрии рабочей поверхности подшипника и скорости вращения вала. Наибольший практический интерес представляет функция $e = f(P)$.

Исследования проводились на образцах подшипников с радиусом рабочей поверхности $R_2 = 30$ мм. Угол охвата канавок подшипника предлагаемой конструкции $\gamma = 90^\circ$, максимальная глубина канавок 0,4 мм. График $e = f(P)$ для этих образцов при частоте вращения вала $n = 2750$ об/мин показан на рис. 2.

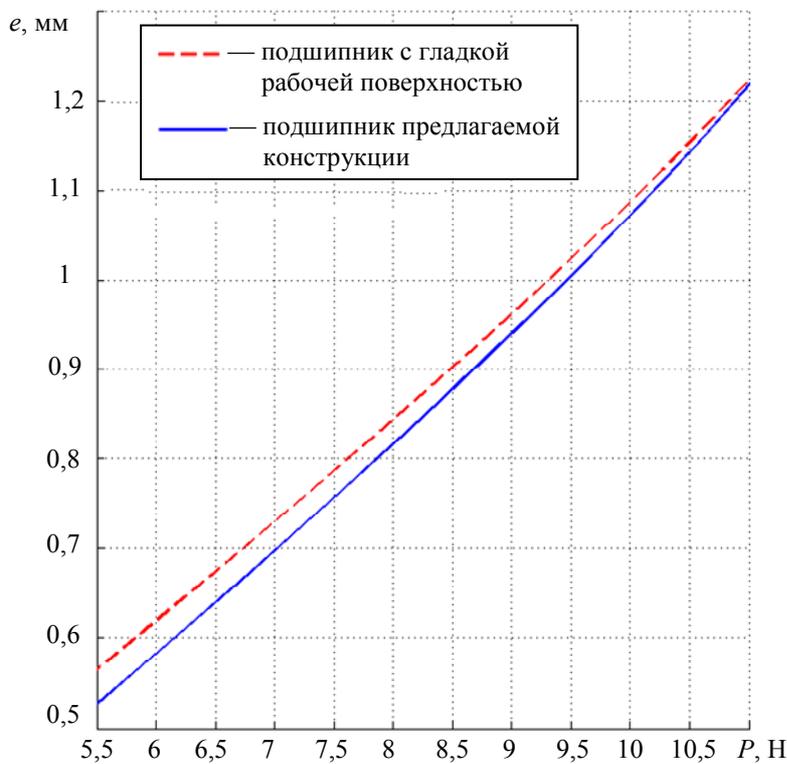


Рис. 2

Анализ графика показывает, что при одинаковой нагрузке значение эксцентриситета для подшипника предлагаемой конструкции меньше, чем для подшипника с гладкой рабочей поверхностью, что свидетельствует о его более высокой надежности:

$$x_{расч} = \frac{\delta_1 - e}{h_{мин кр}}.$$

Для подтверждения точности описанной математической модели автором был создан лабораторный стенд для испытаний гидродинамических подшипников скольжения. Стенд оснащен бесконтактной измерительной системой, состоящей из датчиков Холла и цифровой преобразовательной платы, и позволяет отслеживать отклонение осей вала и подшипника. Использование привода на основе инвертора с цифровым управлением обеспечивает регули-

ровку частоты вращения двигателя. Таким образом, стенд позволяет исследовать характеристики смазочного слоя в зависимости от скорости вращения вала. Общий вид стенда показан на рис. 3.



Рис. 3

Расчетные данные для исследованных образцов хорошо согласуются с опытными. Отклонение измеренной разности эксцентриситетов от расчетной для подшипника с гладкой рабочей поверхностью и предлагаемого подшипника не превышает 10 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симсон А. Э. и др. Двигатели внутреннего сгорания. Тепловозные дизели и газотурбинные установки. М.: Транспорт, 1980. 385 с.
2. Володин А. И. Локомотивные двигатели внутреннего сгорания. М.: Транспорт, 1990. 256 с.
3. Чернавский С. А. Подшипники скольжения. М.: Машгиз, 1963. 244 с.
4. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика. М.: Машиностроение, 1978. 464 с.
5. Попов Д. Н., Панаиотти С. С., Рябинин М. В. Гидромеханика. М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 2002. 384 с.

Сведения об авторе

Владимир Сергеевич Майоров

— аспирант; Петербургский государственный университет путей сообщения, кафедра теории механизмов и робототехнических систем;
E-mail: mayorov.pgups@gmail.com

Рекомендована кафедрой
теории механизмов
и робототехнических систем

Поступила в редакцию
20.04.11 г.

А. В. КРАСИЛЬНИКОВ

**ПРОЕКТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ
КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
УСТРОЙСТВА ТОРМОЖЕНИЯ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПОДВОДНОГО АППАРАТА**

Рассматривается один из важных вопросов технологического обеспечения испытаний пусковых устройств малогабаритных необитаемых подводных аппаратов в условиях производственных помещений. Предлагается иллюстрированная примером методика проектного расчетного обоснования технических характеристик тормозного устройства специализированного гидродинамического стенда.

Ключевые слова: автономные необитаемые подводные аппараты, тормозное устройство, схемотехническое решение, технические характеристики, проектное обоснование.

В последнее время ведущими морскими державами активно развиваются [1, 2] автономные необитаемые малогабаритные подводные аппараты (ПА), называемые в литературе также подводными роботами. Спектр их применения достаточно широк. Прежде всего, речь идет об исследованиях шельфа Мирового океана: картографировании дна, взятии проб грунта, оценке гидрофизических свойств воды в зависимости от глубины и т.д. Также предполагается широкое использование подводных роботов в военных целях: при гидроакустическом наблюдении за подводными целями, для обнаружения и уничтожения мин, для охраны подводных нефте- и газотрубопроводов, для предупреждения террористических актов и т.д. В настоящее время за рубежом активно эксплуатируются более 600 подводных роботов различного целевого назначения.

Для отработки пусковых устройств роботизированных ПА и проверки их работоспособности при различных эксплуатационных условиях создаются специальные гидродинамические стенды [3], в которых аппараты движутся с большой скоростью.

В настоящей статье предлагается методика проектного обоснования гидродинамических характеристик тормозного устройства оригинальной, защищенной патентом РФ [4], конструкции, обеспечивающего торможение и остановку движущегося с большой скоростью подводного аппарата, корпус которого имеет калиброванную часть.

Рассматриваемое тормозное устройство, конструктивная и расчетная схема которого приведена на рис. 1, использует движущийся ПА как плунжер и содержит тормозную трубу l с передним 2 и задним 3 упорными элементами. Упорный элемент 2 (шириной b_1) имеет входное для плунжера отверстие диаметром d_1 , а упорный элемент 3 фиксирует герметичную крышку 4 , между которой и упорным элементом 2 установлены с помощью распорных втулок 5 сменные обтюрирующие кольца 6 и 7 (шириной b_2 и b_3 соответственно).

В первом обтюрирующем кольце 6 выполнены отверстие диаметром d_2 с заходной фаской и сквозные дросселирующие отверстия диаметром d_T (количеством n_1) на торцевой поверхности. Второе кольцо обтюрации 7 имеет проходное для ПА отверстие диаметром d_3 .

Принято, что в тормозной трубе (ТТ) установлены только два кольца обтюрации, а длина калиброванной части ПА-плунжера δ (диаметром $d_{ПА}$ и площадью поперечного сечения $f_{ПА}$) превышает длину ТТ. При этом ПА имеет сферический оголовок радиусом r .

При вхождении в тормозную трубу подводного аппарата, движущегося по инерции с начальной скоростью $v_{ПА0}$, в жидкости возникает обуславливающее торможение ПА давление P_T , избыточное по отношению к внешнему гидростатическому давлению $P_{вн}$.

Вследствие этого вытесняемая плунжером жидкость будет вытекать через сечения в кольцах обтюрации, дросселирующие отверстия и кольцевой зазор между упорным элементом 2 и ПА-плунжером 8.

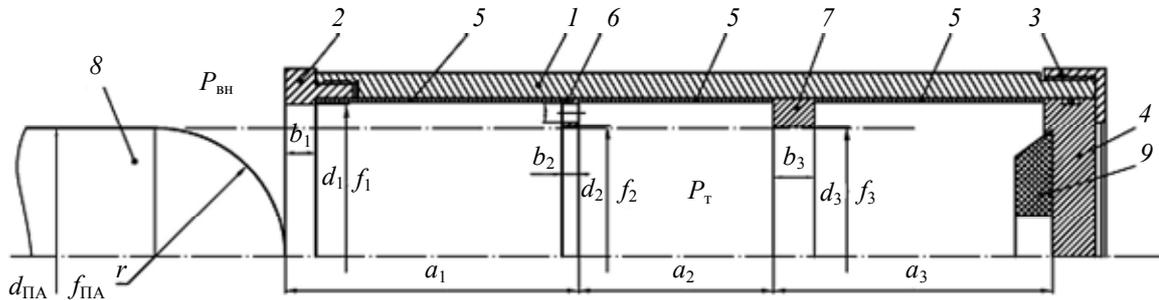


Рис. 1

Приведем аналитические зависимости, позволяющие произвести оценку конструктивно-технологических характеристик тормозного устройства.

Уравнение движения ПА в тормозном устройстве может быть записано в следующем виде:

$$\frac{dv_{ПА}}{dt} = \frac{1}{m_{ПА} + m_{ж}} (P_{ВН} f_{ПА} - F_T - N_H - R_{ГД}), \quad (1)$$

где $\frac{dv_{ПА}}{dt}$ — ускорение аппарата; $m_{ПА}$ — масса аппарата; $m_{ж}$ — приведенная масса вовлекаемой в движение жидкости (воды); F_T — усилие торможения; N_H — сила трения изделия о направляющие, не показанные на рис. 1; $R_{ГД}$ — гидродинамическое сопротивление движению изделия.

При проектном расчете примем следующие допущения:

- жидкость (вода плотностью $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) несжимаема;
- масса жидкости изменяется по формуле

$$m_{ж} = \rho(a_1 + a_2 + a_3 - l_{ПА})f_{ПА},$$

где $l_{ПА}$ — расстояние, пройденное аппаратом;

- $P_{ВН} = \text{const}$;
- длиной зазора в обтюрирующем кольце b можно пренебречь;
- усилие противоударного амортизатора 9 несущественно.

Тормозное усилие F_T определяется соотношениями

$$F_T = \begin{cases} \pi l_{ПА} (d_{ПА} - l_{ПА}) P_T + [f_{ПА} - \pi l_{ПА} (d_{ПА} - l_{ПА})] P_{ВН}; \\ P_T f_{ПА}; \\ \pi (l_{ПА} - a_1) (d_{ПА} + a_1 - l_{ПА}) P_T + [f_{ПА} - \pi (l_{ПА} - a_1) (d_{ПА} + a_1 - l_{ПА})] P_{6-7}; \\ P_T f_{ПА} + N_{Т6}; \\ \pi (l_{ПА} - a_1 - a_2) (d_{ПА} + a_1 + a_2 - l_{ПА}) P_T + [f_{ПА} - \pi (l_{ПА} - a_1 - a_2) (d_{ПА} + a_1 + a_2 - l_{ПА})] P_{7-4} + N_{Т7}; \\ P_T f_{ПА} + N_{Т6} + N_{Т7}, \end{cases}$$

где P_{6-7} , P_{7-4} — давление между соответственно обтюрирующими кольцами 6, 7 и кольцом 7 и крышкой 4; $N_{Т6}$, $N_{Т7}$ — сила трения об обтюрирующие кольца 6 и 7, при соответствующих следующих граничных условиях:

$$\left. \begin{aligned} 0 \leq l_{\text{ПА}} < r; \\ r \leq l_{\text{ПА}} < a_1; \\ a_1 \leq l_{\text{ПА}} < a_1 + r; \\ a_1 + r \leq l_{\text{ПА}} < a_1 + a_2; \\ a_1 + a_2 \leq l_{\text{ПА}} < a_1 + a_2 + r, \\ a_1 + a_2 + r \leq l_{\text{ПА}} < a_1 + a_2 + a_3. \end{aligned} \right\}$$

Используемые здесь и в последующих формулах обозначения соответствуют приведенным на рис. 1.

Уравнение неразрывности потока жидкости в кольцевых сечениях тормозной трубы может быть представлено в виде

$$v_i f_i = v_{\text{ПА}} f_{\text{ПА}},$$

где v_i — скорость жидкости в i -м сечении; f_i — площадь i -го сечения.

Тогда скорость воды в любом сечении ТТ выразится как

$$v_i = \frac{f_{\text{ПА}}}{f_i} v_{\text{ПА}}. \quad (2)$$

Продифференцировав выражение (2), получим

$$\frac{dv_i}{dt} = \frac{f_{\text{ПА}}}{f_i} \frac{dv_{\text{ПА}}}{dt}. \quad (3)$$

Запишем уравнение Бернулли для неустановившегося потока жидкости между сечениями передней части плунжера и входным отверстием тормозной трубы:

$$P_{\text{T}} + \frac{\rho}{2} v_{\text{ПА}}^2 = P_{\text{вн}} + \frac{\rho}{2} v_{\text{ПА}}^2 \left(\frac{f_{\text{ПА}}}{f_1 - f_r} \right)^2 + \xi_{\Sigma} \frac{\rho}{2} v_{\text{ПА}}^2 + \rho L_{\Sigma} \frac{dv_{\text{ПА}}}{dt}, \quad (4)$$

где ξ_{Σ} и L_{Σ} — соответственно приведенные к сечению $f_{\text{ПА}}$ суммарный коэффициент гидравлического сопротивления тормозной трубы и ее суммарная длина; f_1 — площадь кольцевого зазора в упорном элементе 2; f_r — площадь j -го сечения сферического оголовка.

Подставив в уравнение (4) выражения (1) и (3), после алгебраических преобразований получим:

$$P_{\text{T}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho L_{\Sigma}}{m_{\text{ПА}} + m_{\text{ж}}}} \left[P_{\text{вн}} \left[1 + (f_{\text{ПА}} - f_{\text{н}}) \frac{\rho L_{\Sigma}}{m_{\text{ПА}} + m_{\text{ж}}} \right] + \frac{\rho}{2} \left[\left(\frac{f_{\text{ПА}}}{f_1 - f_r} \right)^2 + \xi_{\Sigma} - 1 \right] v_{\text{ПА}}^2 - \left(\frac{\rho L_{\Sigma}}{m_{\text{ПА}} + m_{\text{ж}}} \right) (j_1 N_{\text{T6}} + j_2 N_{\text{T7}} + f_2 P_{6-7} + f_3 P_{7-4} + N_{\text{н}} + R_{\text{Tд}}) \right],$$

где j_1, j_2 — константы; $f_{\text{н}}$ — площадь сечения непоказанных направляющих.

С использованием приведенных соотношений в среде программирования MatLab была составлена программа, позволяющая моделировать процесс торможения ПА, движущегося в жидкости.

Для расчетного примера в качестве базового был принят гипотетический ПА массой 20 кг, имеющий калиброванный корпус диаметром 127 мм. На рис. 2, а, б показаны полученные по результатам математического моделирования процесса торможения такого ПА зави-

симости его скорости от времени при начальных значениях $v_{ПА0}$, равных 10 и 40 м/с соответственно.

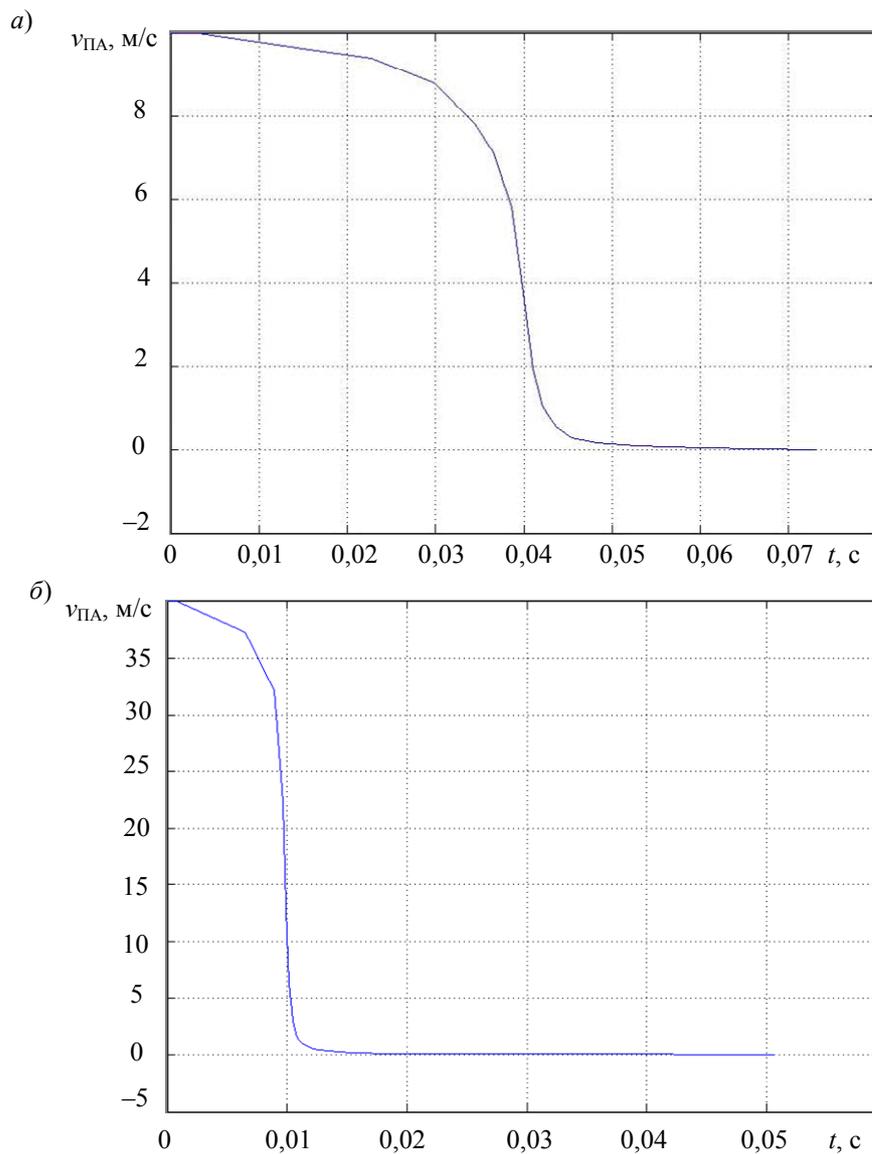


Рис. 2

Расчетные значения времени торможения (T) и пройденного аппаратом расстояния до полной его остановки $L_{ПА, к}$, в зависимости от его начальной скорости, приведены в таблице.

$v_{ПА0}$, м/с	T , с	$L_{ПА, к}$, м
40	0,034	0,371
30	0,035	0,370
20	0,044	0,370
10	0,071	0,369

Как следует из таблицы, для торможения ПА, имеющего указанные выше характеристики, длина тормозной трубы предложенной конструкции может быть принята равной примерно 0,4 м. В этом случае ее использование будет эффективно при начальных скоростях ПА до 40 м/с, что практически вполне приемлемо.

Таким образом, использование предложенного тормозного устройства позволяет проводить на стенде все необходимые исследования пусковых систем малогабаритных подводных аппаратов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Илларионов Г. Ю., Сиденко К. С., Сидоренков В. В.* Подводные роботы в минной войне: Монография. Калининград: ОАО „Янтарный сказ“, 2008. 116 с.
2. *Котов А. С., Соколов И. И.* Сверхмалое высокоинтеллектуальное подводное оружие // Подводное морское оружие: Науч.-техн. сб. СПб: ФГУП ЦНИИ „Гидроприбор“, 2003. Вып. 2.
3. Пат. 2398199 РФ. Гидродинамический стенд / *О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников.* 2010.
4. Пат. 87510 РФ. Устройство торможения движущегося в воде тела. Полезная модель / *О. И. Ефимов, А. В. Красильников, Р. В. Красильников.* 2009.

Антон Валентинович Красильников —

Сведения об авторе

канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра технологии приборостроения;
E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
21.06.10 г.

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 621.396:681.323

С. И. ЗИАТДИНОВ

ТЕОРЕМА ОТСЧЕТОВ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО И ДЕЙСТВИТЕЛЬНОГО СИГНАЛОВ

Показано, что для однозначного восстановления непрерывного комплексного сигнала по его отсчетам необходимо, чтобы частота дискретизации была не меньше удвоенной наивысшей частоты в спектре сигнала. Для однозначного восстановления непрерывного действительного сигнала необходимо, чтобы частота дискретизации была больше удвоенной наивысшей частоты в спектре сигнала.

Ключевые слова: комплексный и действительный сигналы, дискретизация, восстановление, ошибки.

Фундаментальная теорема отсчетов [1, 2] (теорема В. А. Котельникова) находит самое широкое применение в задачах дискретной и цифровой обработки непрерывных сигналов. Согласно этой теореме отсчеты низкочастотного сигнала $u(t)$ с ограниченным спектром для его точного восстановления следует брать с частотой дискретизации F_d , не меньшей, чем двусторонняя (полная) ширина полосы частот, занимаемая этим сигналом: $F_d \geq 2F_{\max}$, здесь F_{\max} — наивысшая частота в спектре сигнала.

Рассмотрим справедливость теоремы отсчетов для комплексного и действительного сигналов.

Комплексный сигнал. Выражение для комплексного сигнала в общем виде можно представить следующим образом:

$$\dot{u}(t) = U(t)e^{j[\Omega t + \psi(t)]}, \quad (1)$$

где $U(t)$, Ω , $\psi(t)$ — огибающая, несущая частота и начальная фаза сигнала.

Флюктуирующий сигнал (1) при разложении в ряд Фурье представляется суммой бесконечного числа элементарных гармонических составляющих, каждая из которых имеет свою амплитуду, частоту и начальную фазу.

В дальнейшем будем рассматривать только наивысшую составляющую спектра сигнала (1), который в дискретном виде записывается следующим образом:

$$\dot{u}(t_i) = Ue^{j\Omega t_i}; \quad t_i = iT_d + \Delta T, \quad (2)$$

где $T_d = 1/F_d$ — период дискретизации; ΔT — смещение по времени при взятии текущего отсчета; $i=0, 1, 2 \dots$ — номер текущего отсчета; для простоты рассуждений начальная фаза сигнала (2) принята равной нулю.

Пусть интерполирующий сигнал является непрерывным комплексным гармоническим колебанием с частотой Ω , равной частоте сигнала:

$$\dot{i}_n(t) = U_n(t)e^{j[\Omega t + \varphi(t)]}, \quad (3)$$

где U_n , Ω , φ — огибающая, несущая частота и начальная фаза интерполирующего сигнала.

Определим, при каких значениях U_n , φ и ΔT интерполирующий сигнал (3) совпадает с исходным сигналом (2).

Пусть в точках отсчета $\dot{i}(t_i) = \dot{i}_n(t_i)$ или

$$Ue^{j\Omega t_i} = U_n e^{j[\Omega t_i + \varphi]}. \quad (4)$$

Комплексные сигналы (4) представим в тригонометрической форме:

$$U \cos \Omega t_i + jU \sin \Omega t_i = U_n \cos(\Omega t_i + \varphi) + jU_n \sin(\Omega t_i + \varphi). \quad (5)$$

Равенство (5) будет справедливо, если его вещественные части и коэффициенты мнимых частей будут равны:

$$\left. \begin{aligned} U \cos \Omega t_i &= U_n \cos(\Omega t_i + \varphi), \\ U \sin \Omega t_i &= U_n \sin(\Omega t_i + \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

После подстановки в уравнения (6) значения дискретного времени $t_i = iT_d + \Delta T$ получим

$$\left. \begin{aligned} U \cos[\Omega(iT_d + \Delta T)] &= U_n \cos[\Omega(iT_d + \Delta T) + \varphi], \\ U \sin[\Omega(iT_d + \Delta T)] &= U_n \sin[\Omega(iT_d + \Delta T) + \varphi]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Возведем в квадрат левые и правые части соотношений (7):

$$\left. \begin{aligned} U^2 \cos^2[\Omega(iT_d + \Delta T)] &= U_n^2 \cos^2[\Omega(iT_d + \Delta T) + \varphi], \\ U^2 \sin^2[\Omega(iT_d + \Delta T)] &= U_n^2 \sin^2[\Omega(iT_d + \Delta T) + \varphi]. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Складывая левые и правые части выражений (8), получаем $U^2 = U_n^2$.

Отсюда следует, что отсчеты комплексного сигнала $U \cos \Omega t_i$ и $U \sin \Omega t_i$ однозначно определяют амплитуду непрерывного интерполирующего сигнала, равную амплитуде непрерывного входного сигнала, т.е. $U_n = U$.

Согласно теореме отсчетов на нижней границе частота дискретизации F_d равна удвоенной частоте сигнала $F_c = \Omega / 2\pi$. Далее будем рассматривать именно этот случай, когда $F_d = 2F_c$. Тогда соотношения (7) принимают вид

$$\left. \begin{aligned} \cos(i\pi + \Omega\Delta T) &= \cos(i\pi + \Omega\Delta T + \varphi), \\ \sin(i\pi + \Omega\Delta T) &= \sin(i\pi + \Omega\Delta T + \varphi). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Данные равенства будут выполняться только при условии $\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$ для любого значения ΔT .

Таким образом, однозначное восстановление непрерывного комплексного сигнала по его отсчетам возможно, если частота дискретизации больше удвоенной наивысшей частоты в спектре сигнала или равна ей. Этот результат полностью совпадает с теоремой отсчетов Котельникова.

Действительный сигнал. В данном случае можно воспользоваться одним из уравнений системы (7):

$$U \sin[\Omega(iT_d + \Delta T)] = U_n \sin[\Omega(iT_d + \Delta T) + \varphi]. \quad (10)$$

Определим, при каких значениях U_n , ΔT и φ будет выполняться данное равенство. Рассмотрим крайнюю точку отсчета, когда частота дискретизации равняется удвоенной частоте сигнала. Тогда соотношение (10) принимает вид

$$U \sin(i\pi + \Omega\Delta T) = U_{\text{и}} \sin(i\pi + \Omega\Delta T + \varphi). \quad (11)$$

Пусть $\Delta T = 0$. При этом отсчеты сигнала $u(t)$ берутся в точках, в которых его значения равны нулю. В результате выражение (11) преобразуется к виду

$$U_{\text{и}} \sin(i\pi + \varphi) = 0.$$

Данное соотношение справедливо для любых значений $U_{\text{и}}$ при $\varphi = 0, \pi, 2\pi, \dots$

Таким образом, при $\Delta T = 0$; $\varphi = 0, \pi, 2\pi, \dots$ и $F_{\text{д}} = 2F_{\text{с}}$ сигналу $u(t_i)$ можно поставить в соответствие бесчисленное количество интерполирующих сигналов $u_{\text{и}}(t_i)$, имеющих любую амплитуду (рис. 1).

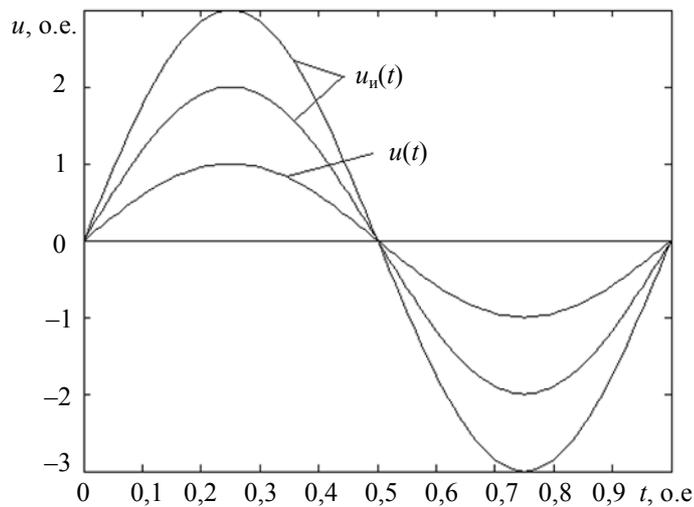


Рис. 1

При $\varphi \neq 0, \pi, 2\pi, \dots$ формула (11) записывается следующим образом:

$$U_{\text{и}} = U \frac{0}{\sin(i\pi + \varphi)}.$$

В данном случае отсутствует интерполирующий сигнал с отличной от нуля амплитудой. Следовательно, при взятии отсчетов синусоидального сигнала в точках, в которых его значения равны нулю, интерполирующий синусоидальный сигнал также проходит через эти точки и может иметь любую амплитуду. При этом восстановление исходного сигнала по его отсчетам невозможно.

Далее положим $\Delta T \neq 0$. При этом точки отсчета сигнала $u(t)$ не совпадают с моментами времени, в которых его значения равны нулю.

В качестве примера рассмотрим случай, когда $F_{\text{д}} = 2F_{\text{с}}$, $\Delta T = 0,25T_{\text{с}}$ ($T_{\text{с}} = 1/F_{\text{с}}$). При этом из выражения (10) находим

$$U_{\text{и}} = U \frac{\sin[\Omega(iT_{\text{д}} + 0,25T_{\text{с}})]}{\sin[\Omega(iT_{\text{д}} + 0,25T_{\text{с}}) + \varphi]} = \frac{U}{\cos \varphi}.$$

Полученное соотношение позволяет найти амплитуду интерполирующего сигнала для различных значений φ (рис. 2); см. ниже.

φ, \dots°	0	45	60	90
$U_{\text{и}}$	U	$2U/\sqrt{2}$	$2U$	∞

Следовательно, существует бесконечное множество интерполирующих сигналов. Равенство $u_{\text{и}}(t) = u(t)$ будет выполняться при любом t только при $F_{\text{д}} > 2F_{\text{с}}$ и $\varphi = 0$. Данные

рассуждения можно распространить на более сложные сигналы с ограниченным наивысшей частотой спектром.

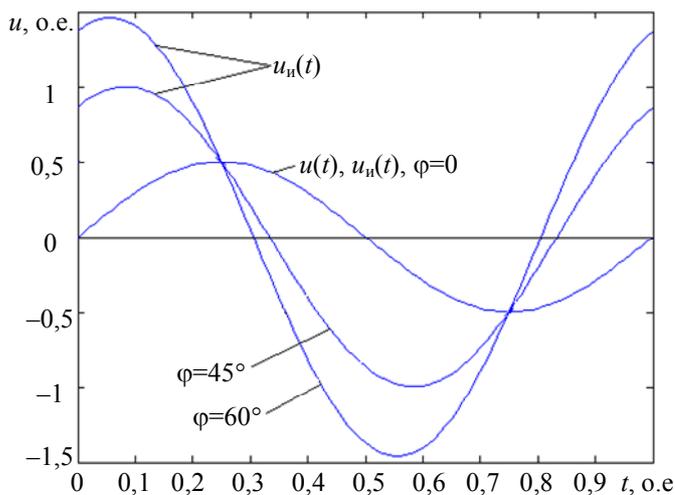


Рис. 2

Вывод. Однозначное восстановление непрерывного комплексного сигнала с ограниченным спектром по его отсчетам возможно в случае, когда частота дискретизации больше удвоенной наивысшей частоты в спектре сигнала или равна ей. В то же время для однозначного восстановления действительного сигнала частота дискретизации должна быть больше удвоенной наивысшей частоты в спектре сигнала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Котельников В. А. О пропускной способности „эфира“ и проволоки в электросвязи // Материалы к Первому Всесоюзному съезду по вопросам реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности. М.: Изд-во Управления связи РККА, 1933.
2. Худяков Г. И. Теорема отсчетов теории сигналов и ее создатели // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53, № 9. С. 1157—1168.

Сведения об авторе

Сергей Ильич Зиатдинов

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра информационно-сетевых технологий; E-mail: Kaf53@GUAP.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию
17.11.10 г.

К. В. ЮРКОВ, С. Е. ПЕТРОВ

О ДВУХ ПОДХОДАХ К ПАРАМЕТРИЧЕСКОМУ КОДИРОВАНИЮ СТЕРЕОСИГНАЛА

Рассматриваются два подхода к кодированию стереофонического сигнала. Предлагаемые подходы позволяют обеспечить высокое качество синтезированного стереофонического аудиосигнала при небольших затратах на кодирование.

Ключевые слова: параметрический стереосигнал, кодирование аудиосигнала.

Введение. Одна из важных задач обработки цифровых сигналов — кодирование аудиосигналов. В настоящее время существует множество стандартов сжатия монофонических аудиосигналов, доминирующим является алгоритм AAC+ (Advanced Audio Coding) [1].

При постановке задачи кодирования стереосигнала предполагается, что монофонический кодер уже реализован. Известны три основных алгоритма обработки стереофонического сигнала. Кратко остановимся на каждом из них.

Mid-Side Stereo [1]. Данный алгоритм подразумевает отдельную передачу суммы и разности правого и левого каналов. Понятно, что если полученные таким образом сигналы переданы идеально точно, то этот метод позволяет идеально точно восстановить исходный стереофонический сигнал. Существенным недостатком данного подхода, является необходимость в большинстве случаев передавать два моносигнала, обладающие практически одинаковой энергией.

Intensity Stereo [2]. Данный алгоритм предполагает передачу одного моноканала, полученного как полусумма правого и левого каналов, и набора параметров, определяющих соотношения энергий правого и левого каналов.

Parametric Stereo [3]. Данный алгоритм предполагает передачу одного моноканала, полученного как полусумма правого и левого каналов, и набора параметров. Параметры в этом случае определяют как соотношения энергий правого и левого каналов, так и углы поворота на комплексной плоскости.

Последние два подхода требуют меньших затрат на кодирование (объем информации, в битах, на выходе кодера) по сравнению с алгоритмом “mid-side stereo”, однако существенным их недостатком является невозможность в некоторых случаях восстановить исходную стереопару с достаточным качеством.

Перечисленные алгоритмы имеют как достоинства, так и существенные недостатки. Таким образом, разработка методов кодирования стереофонического аудиосигнала, позволяющих достичь высокого качества его восстановления при малых затратах на кодирование, является актуальной задачей.

На рис. 1 представлена общая схема кодирования стереосигнала на основе спектрального преобразования.

Входной стереосигнал поступает в модуль комплексного спектрального преобразования. В качестве такого преобразования могут быть, в частности, использованы преобразование Фурье, квадратурное зеркальное преобразование [4], модифицированное косинусное преобразование [5] или любой другой банк ортогональных фильтров. Полученные спектры правого (R) и левого (L) каналов поступают в модуль совмещения каналов и извлечения параметров. На выходе данного модуля наблюдается моноспектр, который обрабатывается любым монокодером, и определяются параметры стереосигнала (далее — стереопараметры), которые

также подвергаются кодированию. Кроме того, возможно дополнительное кодирование разностного сигнала.

В настоящей статье рассматриваются два подхода к кодированию стереосигнала. Использование первого подхода не предусматривает кодирования разностного сигнала, а следовательно, не позволяет в общем случае восстановить оригинальный стереосигнал. Второй подход использует кодирование разностного сигнала, но при этом требует дополнительного объема информации для его передачи.

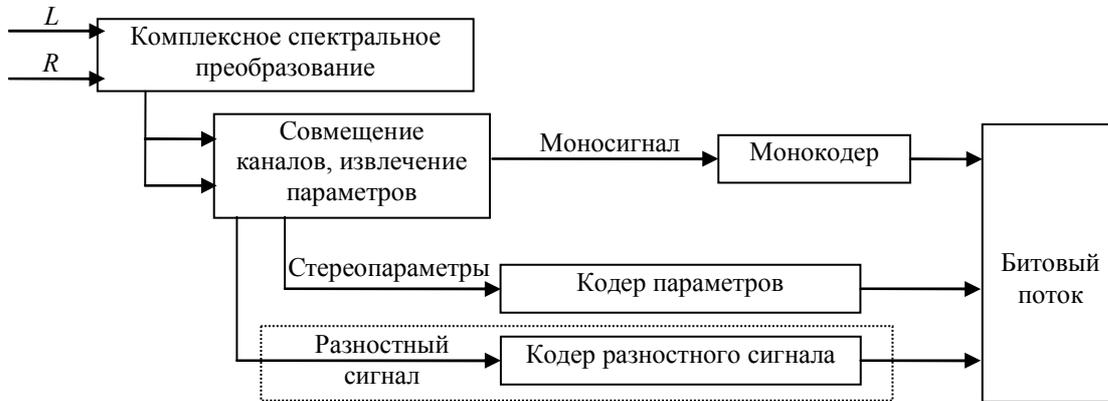


Рис. 1

Совмещение стереоканалов. В случае когда разностный сигнал не передается, возникает проблема получения одного моноканала из двух стереоканалов. Рассмотрим следующую схему.

Введем необходимые обозначения. Обозначим через $\mathbf{l} = (l_1, \dots, l_m) \in \mathbb{R}^m$ и $\mathbf{r} = (r_1, \dots, r_m) \in \mathbb{R}^m$ временные кадры длиной m в левом и правом каналах. Через $\mathbf{L} = (L_1, \dots, L_N) \in \mathbb{C}^N$ и $\mathbf{R} = (R_1, \dots, R_N) \in \mathbb{C}^N$ обозначим спектры длиной N соответствующих временных сигналов.

Комплексные значения коэффициентов спектра представим в экспоненциальной форме:

$$L_k = a_k^L \exp(j\varphi_k^L), R_k = a_k^R \exp(j\varphi_k^R), k = 1, \dots, N,$$

где a_k^L и a_k^R — значения амплитуд сигналов в левом и правом каналах, φ_k^L и φ_k^R — соответствующие значения фаз этих сигналов.

Обозначим через $M_k = a_k^M \exp(j\varphi_k^M)$ соответствующее значение совмещенного сигнала. Естественным решением задачи совмещения стереоканалов может служить сигнал

$$Z_k = a_k^Z \exp(j\varphi_k^Z) = \frac{L_k + R_k}{2}.$$

Данное решение является удовлетворительным за исключением варианта, когда сигналы L_k и R_k близки к противоположным, т.е. $L_k \approx -R_k$. При этом амплитуда сигнала Z_k мала, а угол φ_k^Z фактически принимает случайные значения. Для того чтобы избежать ослабления совмещенного сигнала M_k , выберем значение a_k^M как

$$a_k^M = \frac{a_k^L + a_k^R}{2}.$$

Для решения проблемы случайных значений угла φ_k^Z при возникновении противоположных сигналов L_k и R_k вычислим значение φ_k^M согласно формуле

$$\varphi_k^M = \begin{cases} \angle(L_k e^{j\psi} + R_k e^{-j\psi}), a_k^Z / a_k^M < 10^{-3}; \\ \varphi_k^Z, a_k^Z / a_k^M \geq 10^{-3}, \end{cases}$$

где величина поворачивающего угла ψ определена эмпирически и равна $\psi = \pi/100$.

Полученный сигнал M_k используем для оценки параметров исходного стереосигнала.

Оценка параметров стереосигнала. Полагаем, что спектр стереосигнала и спектр совмещенного моно сигнала разделены на подполосы. Параметры амплитуд и фаз сигналов вычисляются для каждой из подполос и передаются в закодированный поток. Через индексы n, k обозначим принадлежность сигнала к компоненту спектра, имеющему номер k в подполосе с номером n .

На рис. 2 приведено графическое представление на комплексной плоскости левого канала ($L_{n,k}$), правого канала ($R_{n,k}$), их оценок ($\hat{L}_{n,k}$, $\hat{R}_{n,k}$) и моноканала ($M_{n,k}$). Как следует из анализа представленного рисунка, значения $\hat{L}_{n,k}$, $\hat{R}_{n,k}$ могут быть получены путем преобразования моно сигнала $M_{n,k}$ при помощи поворота и масштабирования.

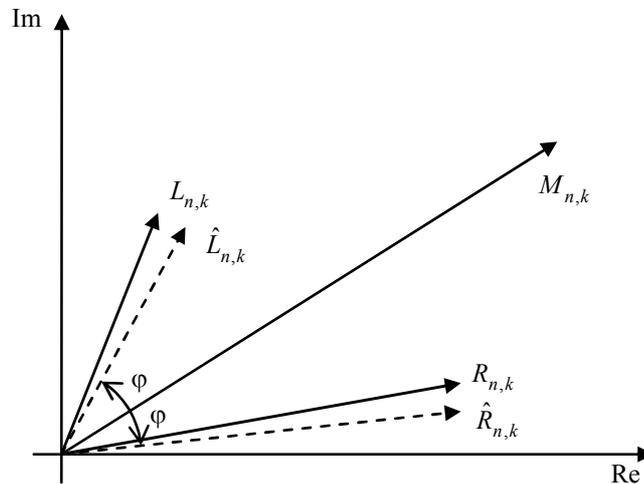


Рис. 2

Согласно стандартной модели образования стереофонического сигнала один и тот же сигнал поступает на два записывающих устройства. Следовательно, левый и правый каналы отличаются лишь задержкой (сдвигом фаз в спектральной области) и коэффициентами усиления.

Так как в качестве амплитуды совмещенного сигнала было выбрано среднее значение амплитуд сигналов правого и левого каналов, естественной формой их восстановления являются оценки

$$\hat{L}_{n,k} = g e^{j\varphi} M_{n,k}, \quad \hat{R}_{n,k} = (2 - g) e^{-j\varphi} M_{n,k}.$$

Таким образом, параметрами, описывающими стереосигнал в подполосе, является пара (g, φ) , при этом $\varphi \in [-\pi, \pi]$, $g \in [0, 2]$.

Иногда, в зависимости от типа спектрального преобразования, для уменьшения затрат на кодирование необходимо вычислять значения стереопараметров одновременно для подполос в группе спектров. Обозначим количество спектров группы через v .

Ошибка восстановления стереосигнала в полосе длиной q может быть вычислена как

$$E(g, \varphi) = \sum_{n=1}^v \sum_{k=1}^q \left(|L_{n,k} - \hat{L}_{n,k}|^2 + |R_{n,k} - \hat{R}_{n,k}|^2 \right).$$

Для выбора параметров стереосигнала необходимо решить следующую экстремальную задачу:

$$E(g, \varphi) \rightarrow \min_{g, \varphi}.$$

Вычислим частные производные функции $E(g, \varphi)$ и приравняем их к нулю. Уравнение

$$\frac{\partial E(g, \varphi)}{\partial g} = 0$$

имеет решение

$$g = 1 + \frac{\sum_{n=1}^v \sum_{k=1}^q a_{n,k}^M a_{n,k}^L - \sum_{n=1}^v \sum_{k=1}^q a_{n,k}^M a_{n,k}^R}{2 \sum_{n=1}^v \sum_{k=1}^q (a_{n,k}^M)^2}.$$

Из уравнения

$$\frac{\partial E(g, \varphi)}{\partial \varphi} = 0$$

находим значение тангенса фазы:

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{\sum_{n=1}^v \sum_{k=1}^q (a_{n,k}^R)^2 \sin(\varphi_{n,k}^M - \varphi_{n,k}^R) + \sum_{n=1}^v \sum_{k=1}^q (a_{n,k}^L)^2 \sin(\varphi_{n,k}^L - \varphi_{n,k}^M)}{\sum_{n=1}^v \sum_{k=1}^q (a_{n,k}^R)^2 \cos(\varphi_{n,k}^M - \varphi_{n,k}^R) + \sum_{n=1}^v \sum_{k=1}^q (a_{n,k}^L)^2 \cos(\varphi_{n,k}^L - \varphi_{n,k}^M)}.$$

Полученные параметры (g, φ) квантуются и передаются в закодированный поток.

Отметим, что аналогичная методика оценки параметров стереосигнала используется в работе [2], однако разница заключается в том, что предлагаемый в настоящей статье подход подразумевает решение задачи минимизации ошибки восстановления.

Оценка параметров стереосигнала при передаче разностного сигнала. Рассмотрим ситуацию, когда необходимо получить идеальное качество восстановления стереосигнала. В этом случае передачи только стереопараметров бывает недостаточно. Однако в рассмотренной выше схеме исправления ошибок, полученных при восстановлении стереосигналов, необходимо передавать два разностных сигнала — для левого и правого каналов. В данной статье предлагается подход, при котором требуется дополнительно передать лишь один разностный сигнал.

Особенность предлагаемого подхода заключается в том, что оценка параметров стереосигнала производится в той же спектральной области, в которой будет осуществляться кодирование моносигнала. В рассматриваемом случае банком фильтров, используемым для кодирования сигнала, является модифицированное дискретное косинусное преобразование. Для анализа потребуется также мнимая составляющая данного преобразования, которая вычисляется путем применения модифицированного дискретного синусного преобразования к сигналу. Обе части данного преобразования образуют комплексный спектр, однако для того чтобы восстановить временной сигнал, достаточно лишь его вещественной части.

Выберем один сигнал из стереопары, например левый, в качестве опорного и найдем параметры для формирования (предсказания) другого канала, правого. В качестве параметров используем пару (g, φ) , при этом будем оценивать только ошибку предсказания вещественной части сигнала. Имеем задачу

$$E(g, \varphi) = \sum_{k=1}^q \left[a_k^R \cos \varphi_k^R - g a_k^L \cos(\varphi_k^L + \varphi) \right]^2 \rightarrow \min_{g, \varphi}.$$

Вычислим частные производные

$$\frac{\partial E(g, \varphi)}{\partial g} = \sum_{k=1}^q \left[a_k^R \cos \varphi_k^R - g a_k^L \cos(\varphi_k^L + \varphi) \right] a_k^L \cos(\varphi_k^L + \varphi),$$

$$\frac{\partial E(g, \varphi)}{\partial \varphi} = \sum_{k=1}^q \left[a_k^R \cos \varphi_k^R - g a_k^L \cos(\varphi_k^L + \varphi) \right] a_k^L \sin(\varphi_k^L + \varphi).$$

Приравняв частные производные к нулю, получим систему уравнений

$$\left. \begin{aligned} g &= \frac{\sum_{k=1}^q a_k^R a_k^L \cos(\varphi_k^L + \varphi) \cos \varphi_k^R}{\sum_{k=1}^q (a_k^L)^2 \cos^2(\varphi_k^L + \varphi)}, \\ g &= \frac{\sum_{k=1}^q a_k^R a_k^L \sin(\varphi_k^L + \varphi) \cos \varphi_k^R}{\sum_{k=1}^q (a_k^L)^2 \cos(\varphi_k^L + \varphi) \sin(\varphi_k^L + \varphi)}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Данная система уравнений не может быть решена аналитически. Однако так как система имеет вид

$$\left. \begin{aligned} g &= f_1(\varphi); \\ g &= f_2(\varphi), \end{aligned} \right\}$$

то значение угла φ , являющееся решением экстремальной задачи

$$|f_1(\varphi) - f_2(\varphi)| \rightarrow \min_{\varphi}, \quad (2)$$

одновременно является решением системы (1).

Задачу (2) предлагается решать методом перебора. Для этого выберем параметр $\nu \in \mathbb{N}$, определяющий точность решения системы уравнений (1), и множество $\Omega_{\nu} = [0 : 2\pi/\nu : 2\pi]$. Путем перебора всех $\varphi \in \Omega_{\nu}$ решим задачу (2). Значение коэффициента g вычисляется из первого уравнения системы (1).

Полученные стереопараметры (g, φ) квантуются и передаются в поток. Обозначим деквантованную пару через $(\hat{g}, \hat{\varphi})$. Разностный сигнал вычисляется как

$$D_k = a_k^R \cos \varphi_k^R - g a_k^L \cos(\varphi_k^L + \varphi),$$

его вещественная часть обрабатывается монокодером. Как правило, разностный сигнал имеет небольшую энергию, следовательно, не требует значительных затрат на кодирование.

Заключение. Представлены два новых метода кодирования стереофонического аудиосигнала. Каждый из методов имеет свою область применения. Первый может быть применен, когда требуется передать стереофоническую картину при наименьших затратах на кодирование, второй — когда необходимо получить идеальное качество восстановленного стереосигнала.

Описание методов квантования и эффективного кодирования параметров стереосигнала выходит за рамки данной статьи. Однако заметим, что при использовании в стандартном аудиокодере представленных методов наблюдается улучшение перцептуального качества восстановленного аудиосигнала по сравнению с известными аналогами для большинства тестовых последовательностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ISO/IEC 13818-7. Information Technology — Generic Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information — Part 7: Advanced Audio Coding (AAC). 1997.
2. Herre J., Brandenburg K., Lederer D. Intensity stereo coding // Proc. of the 96th AES Convention, Amsterdam, 1994. (Preprint N 3799).
3. Faller C. Parametric coding of spatial audio // Proc. of the 7th Intern. Conf. on Digital Audio Effects (DAFx-04), Naples, Italy, Oct. 2004.
4. Johnston J. D. A filter family designed for use in quadrature mirror filter banks // Proc. IEEE Intern. Conf. on Acoustics, Speech, and Signal Processing. 1980. April. P. 291—294.
5. Temerinac M., Edler B. Overlapping block transform: window design, fast algorithm, and an image coding experiment // IEEE Trans. on Communications. 1995. Vol. 43, N 9. P. 2417—2425.

Сведения об авторах

- Кирилл Валерьевич Юрков** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра информационных систем; E-mail: yourkovkirill@mail.ru
- Сергей Евгеньевич Петров** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, НИИ наукоемких компьютерных технологий; мл. науч. сотрудник; E-mail: petrovse@mail.ru

Рекомендована кафедрой
информационных систем

Поступила в редакцию
08.07.10 г.

УДК 621.396.9

В. Н. КУЗНЕЦОВ, А. С. ГРАНКИН

РАЗРАБОТКА ТЕПЛОВОГО СКАНЕРА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВОЛНОВОДНОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Приведено описание устройства, позволяющего проводить исследования электромагнитного поля вдоль волноводной линии передачи прямоугольного сечения посредством оценки распределения температуры на участке широкой стенки волновода.

Ключевые слова: радиоизмерения, прямоугольный волновод, измерение длины волны, измерительная линия.

Современные темпы развития техники сверхвысоких частот (СВЧ) и ее прикладных областей, таких как радиолокация, радиовещание, телевидение, телеметрическая связь, радиоастрономия, радиоспектроскопия, ядерная физика и др., предъявляют высокие требования к метрологическому обеспечению. В настоящее время совершенствование методов измерений и соответственно радиоизмерительных приборов направлено на повышение точности и надежности, миниатюризацию, расширение частотных и динамических диапазонов. Несмотря на достигнутые успехи в области метрологического обеспечения СВЧ-устройств, поиск новых методов измерения по-прежнему остается актуальным.

Для исследования картины распределения электромагнитного поля вдоль волноводной линии передачи используются измерительные линии [1]. Такая линия (рис. 1) представляет собой отрезок прямоугольного волновода 1, вдоль которого прорезана узкая щель 2. Вдоль щели перемещается каретка 3, несущая головку с емкостным зондом 4, введенным на не-

большую глубину в волновод. Измерительная линия устанавливается в исследуемый СВЧ-тракт. Наведенное в зонде напряжение возбуждает связанные резонаторы 5 и 6 зондовой головки. Благодаря настройке резонаторов с помощью поршней 7 и 8 достигается оптимальный резонанс, и входная проводимость зондовой головки оказывается чисто активной. Сигнал резонатора 5 детектируется, при этом обеспечивается согласование резонаторной системы с входным сопротивлением детектора, использующего кристаллический диод 9. Постоянная составляющая с выхода детектора подается на индикаторное устройство, представляющее собой, при достаточной мощности генератора, магнитоэлектрический микроамперметр. Показания индикаторного устройства пропорциональны напряженности электрического поля в линии передачи либо связаны с ней известной зависимостью.

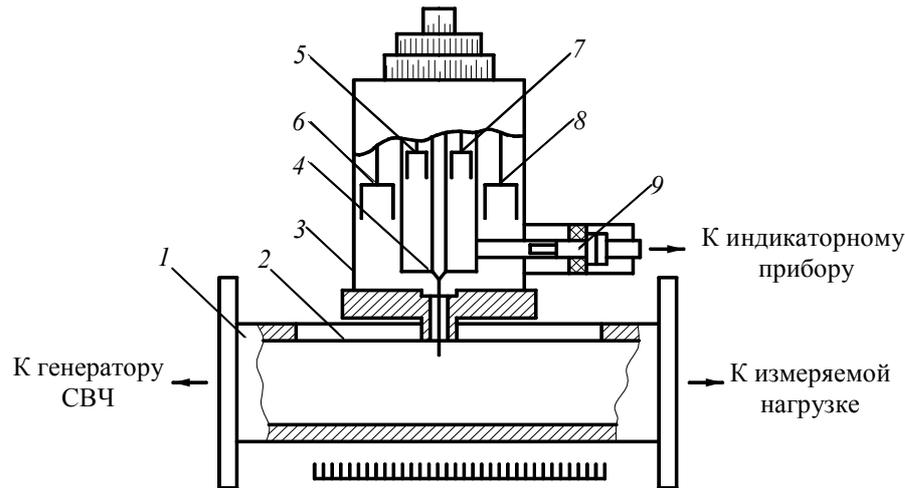


Рис. 1

Рассматриваемое устройство, несмотря на такие достоинства, как простота конструкции и высокая надежность (за счет минимума применяемой электроники), имеет очевидные недостатки. Во-первых, существует погрешность, обусловленная влиянием собственного электромагнитного поля детекторной головки на электромагнитное поле внутри волновода; во-вторых, отсутствует возможность контроля уровня распространяемой СВЧ-мощности; кроме того, процесс измерения осуществляется при низком уровне автоматизации и полностью отсутствует его визуализация.

В качестве альтернативы измерительным линиям предлагается разработанное авторами статьи более совершенное устройство, построенное на базе бесконтактного метода исследования электромагнитного поля вдоль линии передачи [2]. Метод заключается в исследовании температурного поля на поверхности широкой стенки волноводной линии передачи прямоугольного сечения. Работы по исследованию нагрева стенок волнопроводов проходящим СВЧ-сигналом [3] и результаты моделирования [4] позволяют судить о соответствии картин электромагнитного и температурного полей на поверхностях стенок волновода.

Для создания ярко выраженной температурной зависимости производится замена участка широкой стенки волновода на стенку, выполненную из материала с высоким удельным сопротивлением, — поглощающую стенку (ПС). Для ПС установлены зависимости температуры нагрева от мощности СВЧ-сигнала, распространяемого через волновод.

Распределение температуры по поверхности ПС может быть оценено аналитически путем совместного решения уравнений Максвелла для электромагнитного поля, уравнения теплопроводности и уравнений Навье — Стокса, описывающих кондуктивно-конвективный и лучистый теплообмен с внешней средой. Такая задача довольно сложна и в настоящее время еще не решена. Ее можно значительно упростить, причем почти без потери точности для практически важных случаев, если принять некоторые ограничения, например: ПС не создает электромагнитного поля в линии передачи; температура в точках соединения ПС со стенками

основного тракта постоянна. При таких условиях задача сводится к решению уравнения теплопроводности для участка стенки линии передачи, нагреваемого внутренними источниками тепла, распределение температуры в которых определяется структурой электромагнитного поля. Это уравнение имеет следующий вид:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{2\alpha^2}{K\delta} T = -\frac{I_{\text{ш}}(x, z)}{K\delta}, \quad (1)$$

где α — коэффициент теплообмена; K — коэффициент теплопроводности; δ — толщина поглощающей стенки; $I_{\text{ш}}(x, z)$ — поверхностная плотность мощности на участке широкой стенки волновода.

Существует ряд методов для решения данного уравнения, наиболее универсальными из которых являются численные методы. На рис. 2, а, б представлены соответственно картины распределения температуры и плотности мощности на поверхности ПС, полученные в результате решения уравнения теплопроводности численным методом для прямоугольного волновода 120×57 мм, при длине волны 16,5 см, мощности 1 кВт и толщине поглощающей стенки (из константана), равной 20 мкм. На рисунках видны стационарные зоны, в которых температура на поверхности ПС волновода характеризует распределение электромагнитного поля внутри него.

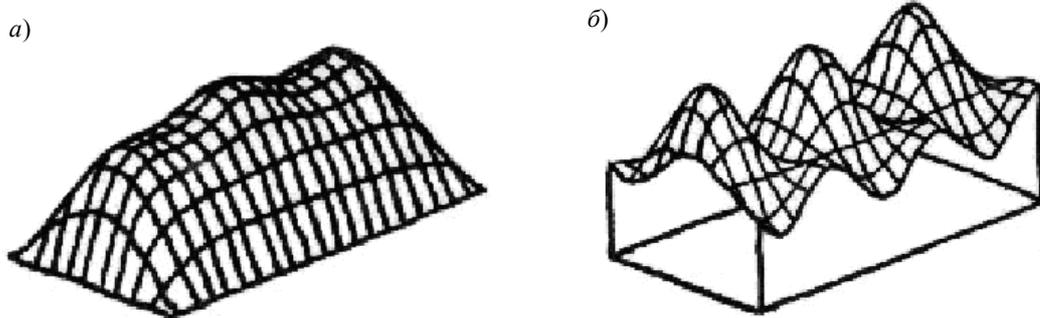


Рис. 2

Соответствие картин температурного поля на поверхности ПС и электромагнитного поля внутри волновода позволяет судить о возможности измерения не только мощности, но и длины волны в волноводе, а следовательно, и коэффициента стоячей волны. Очевидно, что

для измерения длины волны достаточно знать расстояние между двумя соседними температурными максимумами на поверхности ПС. Данное наблюдение, по мнению авторов, меняет представление о классическом методе с использованием поглощающей стенки как о методе, применяемом исключительно для измерения проходящей СВЧ-мощности [1].

В качестве практической реализации бесконтактного метода измерения предлагается многофункциональное устройство — тепловой сканер для исследования электромагнитного поля вдоль волноводной линии передачи. Механическая часть теплового сканера (рис. 3) пред-

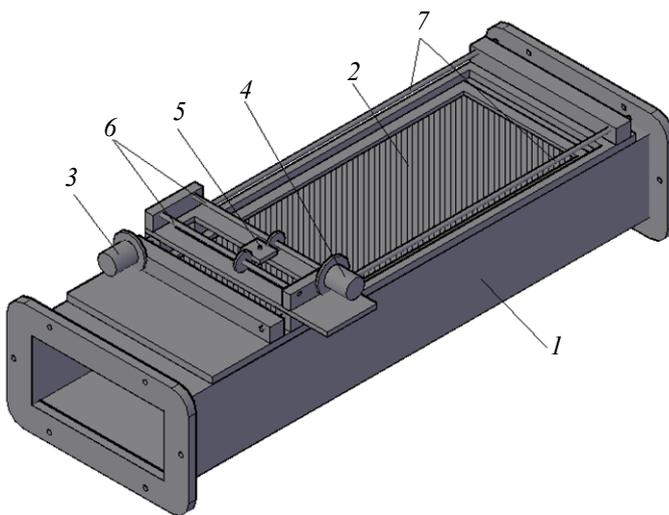


Рис. 3

ставляет собой отрезок прямоугольного волновода l с фланцами для включения ее в реальную линию передачи. Участок широкой стенки отрезка волновода заменен на ПС прямоугольной формы 2, выполненную, например, из константана.

Непосредственно на отрезке волновода расположена сканирующая система регистрации температурных значений. Ее основным элементом является инфракрасный (ИК) датчик 5 (см. рис. 3), позволяющий бесконтактным методом измерять температуру в конкретной точке ПС. От правильного выбора ИК-датчика зависят результаты эксперимента.

В рассматриваемом устройстве предлагается применить датчик MLX90614 фирмы “Melexis” (Бельгия), уникальный на сегодняшний день датчик в плане точности измерений, массогабаритных характеристик и удобства сбора информации. Датчик MLX90614 имеет 17-разрядный встроенный АЦП, память с произвольным доступом (RAM) для хранения измеряемых значений, интерфейс SMBus для передачи значений температуры, обеспечивая точность измерений до $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Кроме того, MLX90614 имеет встроенный датчик измерения температуры окружающей среды, который необходим для организации температурной компенсации. При этом сам датчик имеет размеры 10 мм в диаметре и толщину 4 мм.

Организации перемещения датчика над поверхностью ПС также следует уделить внимание. Применяемые двигатели и механическая часть перемещающей системы должны обеспечивать быстрое действие и точность позиционирования датчика. Максимальное быстрое действие определяется временем, необходимым для считывания датчиком сигнала на определенном участке ПС, а точность — размерами этого участка. В разного рода сканирующих системах широко распространены шаговые двигатели, преимуществами которых являются высокая точность позиционирования, отсутствие необходимости в организации обратной связи по положению, относительно легкая программная реализация перемещения с использованием современной микропроцессорной техники. В рассматриваемом устройстве предлагается использовать два шаговых двигателя 3 и 4 (см. рис. 3): один перемещает датчик по направляющим 6 и 7 вдоль оси волновода, другой — перпендикулярно оси. В качестве двигателей могут быть применены униполярные шаговые двигатели M42SP-4NP фирмы “Mitsumi” (Япония), используемые в сканерах изображения, или биполярные шаговые PL15S-020 фирмы “Minebea — Matsushita” (Япония) со встроенной червячной передачей, часто применяемые для позиционирования лазера в оптических приводах.

Немаловажным элементом сканирующей системы, наряду с датчиком и системой позиционирования, является микроконтроллер (МК). В данном случае выбран высокопроизводительный 8-разрядный МК ATmega128 фирмы “Atmel” (США). Наличие большого количества портов ввода/вывода позволяет подключить к МК в рамках разрабатываемого сканера такие периферийные устройства, как клавиатура и жидкокристаллический дисплей. Встроенный универсальный синхронно-асинхронный последовательный приемопередатчик обеспечивает организацию связи с датчиком и компьютером при помощи двухпроводного интерфейса. Таким образом, данные, считанные и обработанные МК, через последовательный порт передаются в компьютер для последующей обработки. Скорость передачи последовательного порта вполне достаточна для рассматриваемой системы, тем не менее существует возможность средствами того же микроконтроллера организовать связь через современный высокоскоростной протокол USB.

Рассмотрим алгоритм работы теплового сканера на примере его структурной схемы (рис. 4). При подаче питания ИК-датчик перемещается в начальное положение, что контролируется концевыми выключателями X и Y. Затем оператор при помощи устройства ввода (УВ) задает размеры площадки сканирования. Визуальное взаимодействие оператора с измерительным устройством осуществляется через устройство отображения (УО). После ввода координат осуществляется процесс сканирования. При перемещении датчика на шаг измеряется температура в конкретной точке поглощающей стенки с передачей данных в МК. Драйверы представляют собой набор ключей, которыми определенным образом коммутируются обмотки двигателей. Открытие и закрытие ключей осуществляется посредством выдачи соответствующих двоичных последовательностей через порты МК. Значению температуры, передаваемому в МК, ставятся в соответствие две

координаты положения, которые генерируются программным счетчиком. Таким образом, определяются три координаты, необходимые для построения трехмерной картины распределения температуры на поверхности поглощающей стенки. Одновременно со сканированием производятся вычисления необходимых параметров, запись данных в оперативное запоминающее устройство (ОЗУ) МК и их передача через последовательный СОМ-порт в компьютер (ПК). Переданные в ПК данные позволяют строить картину распределения температурного, а соответственно и электромагнитного поля вдоль линии передачи.

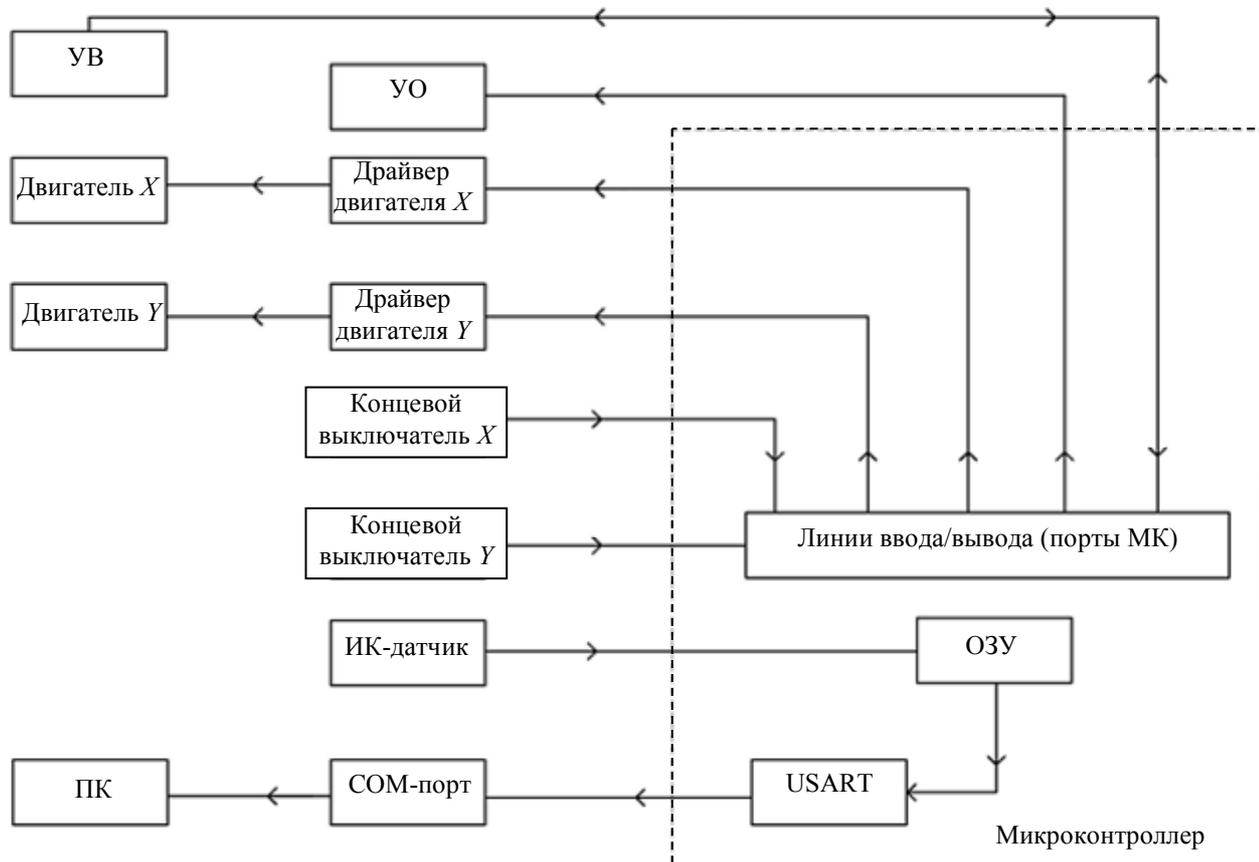


Рис. 4

Предложенное измерительное устройство позволяет реализовать все функциональные возможности бесконтактного метода измерения параметров СВЧ-сигнала в линии передачи прямоугольного сечения [2]. Описанный принцип исследования картины электромагнитного поля может быть использован для измерения длины волны, коэффициента стоячей волны по напряжению, модуля коэффициента отражения и поступающей в нагрузку мощности. Применение высокопроизводительных программируемых МК обеспечивает высокий уровень автоматизации процесса измерения. Созданные с использованием современных микропроцессорных средств, интеллектуальных датчиков и высокоскоростных протоколов такие радиоизмерительные устройства обладают высокой точностью, надежностью, гибкостью (за счет программной реализации), широкими функциональными возможностями, низким энергопотреблением и хорошими массогабаритными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворяшин Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1993. 320 с.
2. Гранкин А. С., Лисютченков С. Н., Кузнецов В. Н. Бесконтактный метод измерения параметров СВЧ-сигналов в прямоугольном волноводе // Тр. 5-й Регион. конф. Старый Оскол: СТИ МИСиС, 2009. Т. 2.
3. Волков В. М. Проектирование средств измерения проходящей мощности: Учеб. пособие. Харьков, 2000. 160 с.

4. Волков В. М., Кузнецов В. Н., Гранкин А. С. Применение методов математической физики при исследовании теплового действия волны Н10 на широкую стенку прямоугольного волновода // Тр. Междунар. конф. „Современные проблемы информатизации в системах моделирования, программирования и телекоммуникациях“. М.: Изд-во Рос. акад. естествознания, 2009.

Сведения об авторах

- Владлен Николаевич Кузнецов** — канд. техн. наук, профессор; Старооскольский технологический институт (филиал) Национального исследовательского технологического университета „Московский институт стали и сплавов“, кафедра автоматки и промышленной электроники; E-mail: vnk@sti-misis.ru
- Анатолий Сергеевич Гранкин** — аспирант; Старооскольский технологический институт (филиал) Национального исследовательского технологического университета „Московский институт стали и сплавов“, кафедра автоматки и промышленной электроники; E-mail: a_grankin@mail.ru

Рекомендована кафедрой
автоматки и промышленной электроники

Поступила в редакцию
14.12.10 г.

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.54

А. И. ИЛЛАРИОНОВ, М. С. ИВАНОВ

НЕЛИНЕЙНО-ОПТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ СФЕРИЧЕСКОЙ АБЕРРАЦИИ ГЕРМАНИЕВЫХ ЛИНЗ В ИНФРАКРАСНОЙ ОБЛАСТИ СПЕКТРА

Представлен метод расчета величины сферической aberrации различных германиевых линз в ИК-области спектра. Величины сферической aberrации линз определяются на основе анализа пространственно-угловой структуры второй оптической гармоники.

Ключевые слова: вторая гармоника, сферическая aberrация, пространственно-угловая структура, инфракрасное излучение.

Введение. Среди многочисленных материалов, используемых в инфракрасной области спектра, широкое применение находят германиевые линзы (Ge-линзы), пропускающие ИК-излучение в диапазоне от 2 до 15 мкм. Ge-линзы являются важным компонентом в ИК-системах построения изображения, работающих в двух окнах прозрачности атмосферы 2—5 и 8—12 мкм.

Существующие инфракрасные детекторы теплового излучения, как правило, содержат болометры полупроводникового типа, в конструкции которых совмещены приемник инфракрасного излучения и оптическая система [1]. Для реальной оптической системы характерны aberrации различного рода, но отцентрированная система содержит только сферическую aberrацию. В болометрах полупроводникового типа используется сферическая Ge-линза со своей сферической aberrацией. Исследование aberrации Ge-линзы представляет собой актуальную задачу для анализа возможности уменьшения искажения ИК-сигнала при построении изображения.

Оценить величину сферической aberrации оптических линз, применяемых в видимой области спектра, можно, используя современные методы (метод теневой картины, метод Гартмана, интерферометрический метод и др.). Расчет величины продольной сферической aberrации проводится по приближенной формуле (без учета знака) для плосковыпуклой линзы, на плоскую поверхность которой падает широкий параллельный пучок света:

$$\Delta S^* \approx \frac{1}{2} \left(\frac{n}{n-1} \right)^2 \left(\frac{\rho_{\max}^2}{f'} \right), \quad (1)$$

где ρ_{\max} — максимальное значение радиуса кольцевой зоны, f' — фокусное расстояние линзы, n — показатель преломления материала линзы.

Экспериментальный расчет величины сферической aberrации линз традиционными методами в ИК-области спектра невозможен. Причиной этого является отсутствие визуально

наблюдаемой aberrационной картины сфокусированного линзой излучения, так как она находится в ИК-области спектра, невидимой человеческому глазу. Кроме того, эти методы требуют изготовления высокоточных эталонных деталей и долговременной прецизионной настройки.

Описание метода. В настоящей статье для исследования aberrаций ИК-оптики предлагается нелинейно-оптический метод, основанный на анализе пространственно-угловых структур преобразованного ИК-излучения.

Предлагаемый метод базируется на АП-конверсии инфракрасного излучения в нелинейном одноосном кристалле. Схема экспериментальной установки, используемой для реализации метода, показана на рис. 1. Излучение неодимового лазера 1 с длиной волны $\lambda = 1,064$ мкм проходит через телескопическую систему 2 для формирования широкого пучка с плоским волновым фронтом. Далее, устанавливается исследуемая положительная линза 3, фокусирующая пучок ИК-излучения в нелинейный одноосный кристалл иодата лития 4. Нелинейный кристалл, ориентированный в направлении коллинеарного синхронизма, с известными геометрическими параметрами и оптическими свойствами (плоскопараллельная пластинка площадью ~ 200 мм² и толщиной ~ 8 мм) устанавливается от исследуемой линзы на расстояние теоретически предполагаемого главного фокуса линзы F с помощью точного электронного дальномера 6. На выходе из кристалла на экране ПЗС-приемника 5 фиксируется aberrационная структура преобразованного излучения.

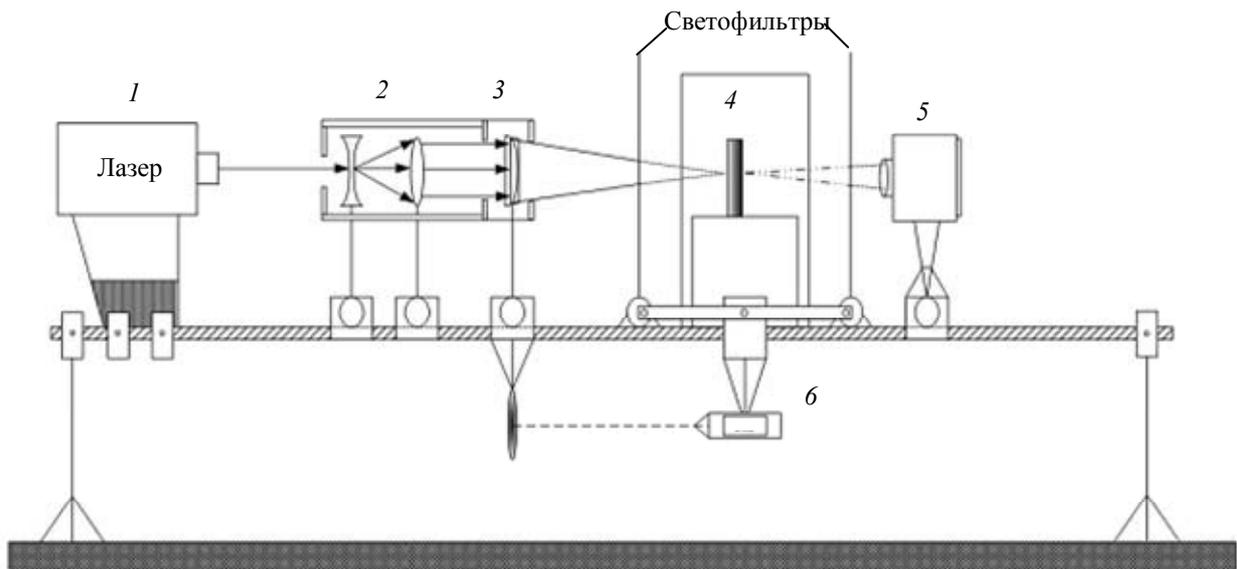


Рис. 1

Пространственно-угловая структура сфокусированного исследуемой aberrационной линзой излучения второй оптической гармоники неодимового лазера на выходе из нелинейного кристалла представляет собой на плоскости три кривые, соответствующие коллинеарным взаимодействиям, векторным взаимодействиям в фокусе линзы на оптической оси системы и векторным взаимодействиям в кольцевом фокусе системы [2].

Анализ кривых векторных взаимодействий световых волн с учетом известных геометрических параметров линзы и теоретический расчет положения ее фокуса на оптической оси системы для краевых лучей (S_{\min}) позволяет вычислить величину сферической aberrации исследуемой линзы.

Теоретические основы метода. В оптических системах широкое применение находят плосковыпуклые линзы, располагаемые плоской стороной к источнику излучения. В этой связи целесообразно провести исследование, направленное на определение величины сферической aberrации такой линзы в ИК-области спектра.

Расположим исследуемую линзу так, чтобы ИК-излучение лазера проходило параллельно главной оптической оси, тогда лучи, падающие с краев линзы (краевые лучи), фокусируются в точке A , тогда как параксиальные лучи, падающие под малым углом α_{\min} к оптической оси, фокусируются в точке B [3, 4] (рис. 2).

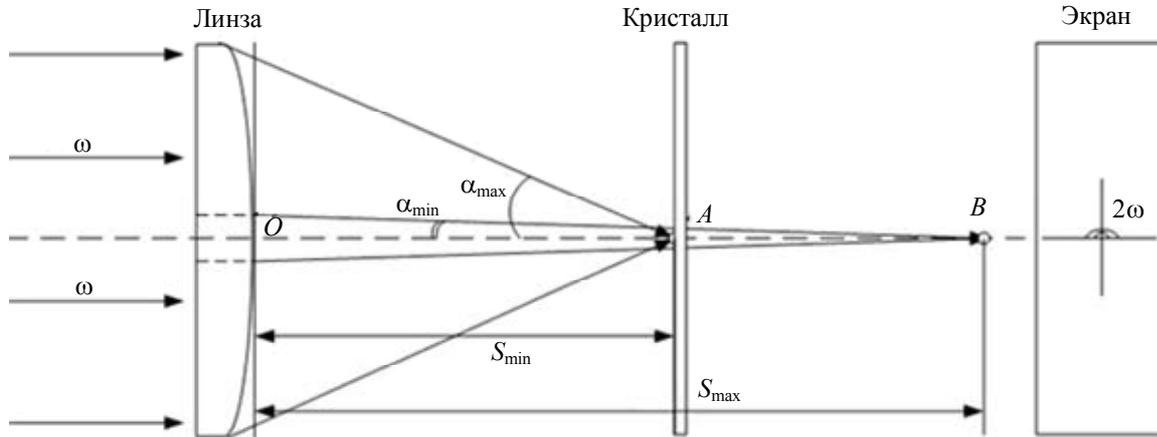


Рис. 2

Изменяя положение нелинейного кристалла вдоль оптической оси системы относительно исследуемой линзы, отмечаем, что форма преобразованного излучения, искаженного сферической aberrацией, не изменяется, изменяются лишь пространственно-угловые параметры второй оптической гармоники [5]. Получив четкий снимок пространственно-угловой структуры второй оптической гармоники на экране ПЗС-приемника, произведем анализ ее угловых параметров для нахождения величины сферической aberrации ΔS плосковыпуклой линзы.

Учитывая геометрию оптической системы и углы падения лучей на нелинейный кристалл, можно определить ΔS по формуле

$$\Delta S = S_{\max} - S_{\min}, \quad (2)$$

где S_{\max} — расстояние от края линзы до фокуса на оси, образованного параксиальными лучами, — отрезок OB ; S_{\min} — то же, для краевых лучей, — отрезок OA (см. рис. 2).

Величина S_{\min} определяется по формуле

$$S_{\min} = \frac{\rho_{\max}}{\operatorname{tg}\left(\arcsin\left(\frac{\rho_{\max}}{R}n\right) - \arcsin\left(\frac{\rho_{\max}}{R}\right)\right)} - R\left(1 - \cos\arcsin\left(\frac{\rho_{\max}}{R}\right)\right), \quad (3)$$

где $\rho_{\max} = D/2$, D — диаметр линзы; R — радиус кривизны линзы.

Величину S_{\max} находим из выражения [5]

$$S_{\max} = \frac{R}{P}\left[\sqrt{n^2 - \cos\alpha_{\min}(2n - \cos\alpha_{\min}) + \cos\alpha_{\min}} - \sqrt{R^2 - (D/2)^2} - l\right], \quad (4)$$

$$P = \sqrt{n^2 + 1 - 2n\cos\alpha_{\min}},$$

где l — толщина линзы на оптической оси, α_{\min} — угол между лучом кольцевой зоны и оптической осью системы, определяемый из выражения

$$\alpha_{\min} = \arcsin(n_{\omega} \sin\alpha_{\text{пр}}).$$

Здесь n_{ω} — показатель преломления кристалла на частоте ω ; $\alpha_{\text{пр}}$ — предельный минимальный угол, при котором еще возможны векторные взаимодействия световых волн внутри кристалла.*

* Необходимо отметить, что значение S_{\max} в выражении (4) определяется на основе экспериментальных данных, а параметр S_{\min} — теоретически из выражения (3).

При выполнении условий фазового синхронизма в кристалле иодата лития (волновая расстройка Δk между взаимодействующими волнами равна нулю) $\alpha_{\text{пр}}$ определяется из формулы

$$\alpha_{\text{пр}} = \arccos \left(\frac{n_{\omega}^e}{\sqrt{\left((1-f)(n_{\omega}^o)^2 + f(n_{\omega}^e)^2 \right) (1 - \text{tg}^2 \alpha_{2\omega})}} \right);$$

$$f = (\cos \gamma_{2\omega} \sin \theta_c \sin \alpha_{2\omega} + \cos \theta_c \cos \alpha_{2\omega}),$$

где θ_c — угол синхронизма (для иодата лития $\theta_c = 29,9^\circ$); n_{ω}^o — показатель преломления нелинейного кристалла для преобразованной во вторую гармонику волны обыкновенной поляризации; n_{ω}^e — показатель преломления кристалла для преобразованной волны необыкновенной поляризации.

Показатели преломления иодата лития определяются по формулам Селмейера:

$$(n_{\omega}^o)^2 = 2,083648 + \frac{1,332068\lambda^2}{\lambda^2 - 0,035306} - 0,008525\lambda^2,$$

$$(n_{\omega}^e)^2 = 1,673463 + \frac{1,245229\lambda^2}{\lambda^2 - 0,028224} - 0,003641\lambda^2.$$

Параметры $\alpha_{2\omega}$ и $\gamma_{2\omega}$ вычисляются в соответствии с пространственно-угловой структурой второй гармоники в любой точке A (рис. 3) по формулам

$$\alpha_{2\omega} = \frac{Y}{\sin \left(\arctg \frac{Y}{X} \right)}, \quad \gamma_{2\omega} = \arctg \left(\frac{Y}{X} \right).$$

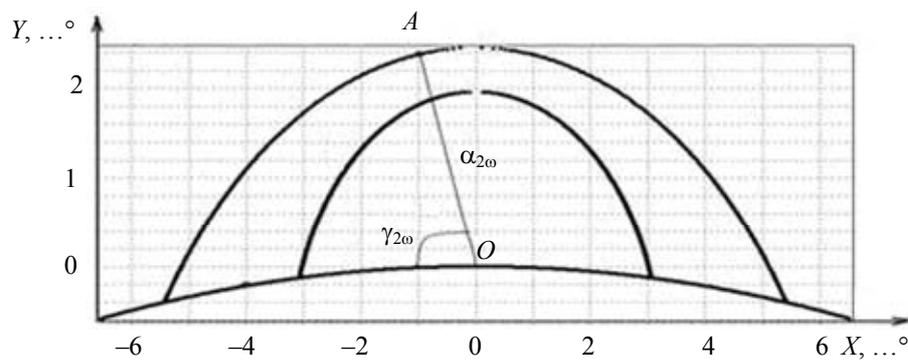


Рис. 3

Численный пример. Для определения точности предлагаемого метода считаем, что дисперсионная зависимость показателя преломления линзы от длины волны падающего на нее излучения не имеет существенного влияния при расчете величины сферической аберрации по формулам (2)—(4). Данное условие позволяет сравнить вычисления величины сферической аберрации ΔS^* германиевых линз по известной формуле (1) со значениями ΔS , полученными разработанным методом. При этом актуальным является моделирование процесса генерации второй оптической гармоники при фокусировке ИК-излучения германиевой линзой со сферической аберрацией в нелинейный кристалл, так как проведение эксперимента с применением большого числа Ge-линз требует значительных финансовых затрат. Моделирование

производилось в среде Delphi 7. В качестве примера были исследованы линзы различного диаметра и толщины с постоянными параметрами $n = 4,05$, $R = 150$ мм. Результаты вычисления представлены в таблице.

l , мм	D , мм	ΔS , мм ($\lambda = 10$ мкм)	ΔS^* , мм	Точность метода, %
0,3	19,05	1,65173	1,59970	3,15
0,5	25,4	3,00344	2,84392	5,31
1,9	38,1	6,22531	6,39882	2,79
2,4	50,8	11,34916	11,37569	0,23
6	60,5	17,04797	16,13471	5,36

Как видно из таблицы, расхождение результатов, полученных двумя разными методами, не превысило 5,4 %, поэтому оценка величины сферической аберрации согласно предложенному методу имеет средний класс точности.

Экспериментальная проверка возможности реализации разработанного метода. Проверка реализации метода (см. рис. 1) осуществлялась с использованием линзы из плавленного кварца, имеющей следующие геометрические параметры: $R = 360$ мм, $D = 76,2$ мм, $l = 2$ мм, $n = 1,45$ на длине волны $\lambda = 1,064$ мкм, генерируемой неодимовым лазером.

Экспериментально полученное значение величины сферической аберрации составило $\Delta S = 9,486$ мм, что несущественно расходится с экспериментальным значением $\Delta S^* = 9,419$ мм, полученным интерферометрическим методом.

На рис. 4 приведена пространственно-угловая структура распределения преобразованного излучения, анализ которой проведен численным методом, изложенным в настоящей статье.

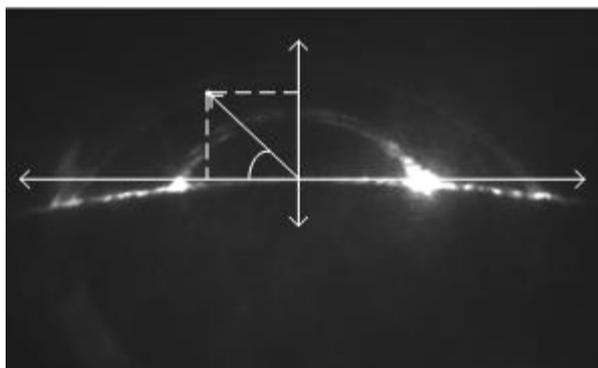


Рис. 4

Заключение. Вычисление величины сферической аберрации Ge-линз с помощью компьютерного моделирования показало, что для применяемых в болометрах плосковыпуклых линз с параметрами $R = 10$ мм, $D = 14$ мм, $l = 2,87$ мм (сферической части линзы), $n = 4,06$ на длине волны $\lambda = 6$ мкм данный оптический дефект достигает значения порядка $\Delta S = 0,924$ мм. С учетом того, что толщина чувствительного элемента в таких приемниках теплового излучения не превышает 0,12 мм, величина сферической аберрации линзы существенно влияет на передаваемый тепловой сигнал. Предложенный метод, по мнению авторов, может быть применен для оценки величины сферических аберраций, так как в настоящее время отсутствуют методы, позволяющие экспериментально определять значения погрешностей линз в ИК-области спектра. Очевидно, что метод может быть достаточно просто автоматизирован. Возможность замены линзы $З$ в конструкции установки (см. рис. 1) позволит исследовать на наличие аберраций линзы различной формы и геометрических размеров. С учетом необходимой для наблюдения спектральной полосы пропускания линз может быть также легко подобран нелинейный кристалл с требуемыми областью пропускания и коэффициентом преобразования во вторую гармонику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трестман Е. Е., Лозинский С. Н., Образцов В. Л. Автоматизация контроля буксовых узлов в поездах. М.: Транспорт, 1983.
2. Stroganov V. I., Illarionov A. I. Optical system aberration effect on the second harmonic generation // Opt. Com. 1980. Vol. 35, N 3. P. 454—461.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973.
4. Илларионов А. И., Янчук О. В. Влияние сферической абберации волнового фронта основного излучения на процессы генерации второй гармоники в одноосных кристаллах // Сб. трудов IX Междунар. школы-семинара по люминесценции и лазерной физике. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та. 2005. С. 212—218.
5. Строганов В. И., Илларионов А. И. Абберационная структура второй оптической гармоники // ЖПС. 1981. Т. 34, вып. 2. С. 232—237.

Сведения об авторах**Анатолий Ильич Илларионов**

— д-р физ.-мат. наук, профессор; Иркутский государственный университет путей сообщения, кафедра физики; E-mail: illarionov_a@irgups.ru

Максим Сергеевич Иванов

— аспирант; Забайкальский институт железнодорожного транспорта, Чита, — филиал Иркутского государственного университета путей сообщения, кафедра безопасности жизнедеятельности и инженерной защиты окружающей среды; E-mail: vanov.maks@mail.ru

Рекомендована кафедрой физики Университета

Поступила в редакцию 01.02.11 г.

УДК 535.51

П. С. БЕЛОМУТСКАЯ, Т. М. ДАНИЛОВА, И. А. ХРАМЦОВСКИЙ

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕМЕНТОВ ЛАЗЕРНОЙ ТЕХНИКИ
МЕТОДОМ ВНУТРИРЕЗОНАТОРНЫХ ПОТЕРЬ ИЗЛУЧЕНИЯ**

Предложена трехзеркальная схема измерения оптических потерь излучения на внутрирезонаторных элементах ионных лазеров. Рассмотрены особенности измерения потерь излучения на оптических элементах с использованием зеркала с регулируемой отражательной способностью и по методу калиброванных потерь. Сопоставлены результаты эллипсометрических исследований изменения поляризационно-оптических характеристик поверхностного слоя деталей и внутрирезонаторных потерь оптического излучения на элементах лазерной техники при их полировании.

Ключевые слова: оптические потери, эллипсометрические измерения, оптические характеристики поверхностного слоя.

Критерием качества оптических внутрирезонаторных элементов, используемых для получения одночастотного режима генерации излучения ионных лазеров в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, является величина потерь излучения на этих элементах. Для объективной оценки качества изготовления внутрирезонаторных элементов необходимо различать потери оптического излучения, вызванные образованием неоднородного поверхностного слоя (ПС), и потери, связанные с ослаблением излучения в объеме материала, из которого выполнена деталь. Опыт практического использования кварцевого стекла в качестве основного материала для изготовления внутрирезонаторных элементов ионных лазеров показал, что изделия одной партии, к которым предъявляются одинаковые требования по классу

чистоты и точности формы поверхности, могут значительно отличаться по своим физико-техническим характеристикам, определяемым, при прочих равных условиях технологической обработки, оптическими свойствами образующегося поверхностного слоя [1, 2].

Традиционные методы контроля качества технологической обработки поверхности детали, в том числе и интерферометрические, не позволяют непосредственно судить о потерях лазерного излучения, вносимых элементом в оптический резонатор лазера.

Однако в последнее время появились методы измерения, основанные на сравнении „френелевских“ потерь, вносимых в оптический резонатор поворотной плоскопараллельной пластинкой, с потерями излучения на контролируемой детали [3, 4]. Наряду с этим были созданы установки, позволяющие, благодаря применению в них газоразрядных трубок He—Ne-лазеров с высокой стабильностью параметров излучения, с высокой точностью [3, 4] проводить измерения потерь излучения на оптических элементах различного функционального назначения. Однако область измерения потерь излучения при этом ограничивается коэффициентом усиления активной среды, используемой в газоразрядной трубке He—Ne-лазеров [5].

В настоящей статье представлен анализ особенностей измерения внутрирезонаторных потерь излучения на элементах лазерной техники (окнах Брюстера, призмах, зеркалах оптического резонатора, модуляторах азимутальной и фазовой анизотропии поляризационного излучения и т.п.) с использованием двух методов: метода калиброванных потерь оптического излучения и метода с регулируемой отражательной способностью зеркал трехзеркального оптического резонатора.

Как известно, максимальная величина потерь α_{\max} , вносимых в двухзеркальный резонатор лазера, определяется условием порога генерации оптического излучения [4]:

$$R_1 R_2 G(1 - \alpha_{\max}) = 1, \quad G = \exp 2K'_v L, \quad K'_v = K_v - \chi \frac{L_1}{L}, \quad (1)$$

где R_1, R_2 — коэффициенты отражения зеркал резонатора; K_v, K'_v — коэффициенты усиления активной среды; L — длина газоразрядного канала трубки лазера; L_1 — длина оптического резонатора; χ — коэффициент дифракционных потерь.

При малых значениях коэффициентов K_v, K'_v величина максимальных потерь α'_{\max} , которые можно измерить на установке с двухзеркальным резонатором, определяется по формуле

$$\alpha'_{\max} = K_v L - \chi L_1 - \alpha_d; \quad (2)$$

величина α_d характеризует следующие дополнительные потери в резонаторе лазера: потери излучения на эталонных плоскопараллельных пластинках оптического компенсатора; потери излучения на зеркалах резонатора; дифракционные потери, связанные с увеличением длины резонатора при установке оптического компенсатора и исследуемого элемента.

Предварительные исследования по влиянию оптических свойств ПС плоскопараллельной пластинки оптического компенсатора на погрешность измерения потерь лазерного излучения показали, что среднее значение углового отклонения φ пластин от угла Брюстера φ_B (при котором погрешность измерения потерь излучения, рассчитанная по формулам Френеля [1, 4], не превышает 0,02 %) составляет не менее $8 \dots 9^\circ$. При этом $\alpha'_{\max} = 3,8 \dots 4,5 \%$, а точности измерений порядка $S_\alpha \sim 0,02 \%$ невозможно достичь даже в установках, в которых используются газоразрядные трубки большой длины (например, для лазеров ЛГ-38, где $\alpha'_{\max} = 3,1 \%$, значение $L \sim 1,6$ м).

Поскольку диапазон измерения оптических потерь ограничивается коэффициентом усиления активной среды газоразрядной трубки (см. формулу (2)), для расширения области из-

мерения потерь и уменьшения относительной погрешности измерения целесообразно использовать вместо классического двухзеркального резонатора трехзеркальный.

Принцип построения схемы установки с трехзеркальным оптическим резонатором (рис. 1) заключается в следующем. В одно из плеч оптического резонатора между зеркалами 1 и 2, с радиусами кривизны (r) 2 и 10 м соответственно, устанавливается газоразрядная трубка 4 лазера ЛГ-52-3, в другое плечо помещаются пластинки оптического компенсатора 5 и исследуемый элемент 6. Коэффициенты отражения зеркал 1, 2 выбираются так, чтобы уровень накачки был ниже порогового. Зеркало 3 ($r \rightarrow \infty$) и зеркала 1, 2 обеспечивает генерацию индуцированного излучения.

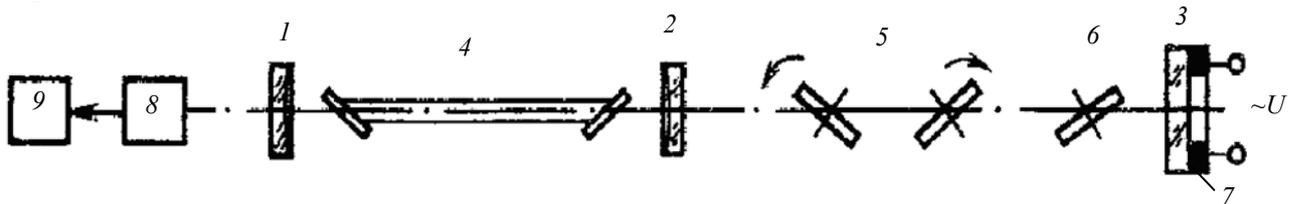


Рис. 1

При внесении потерь излучения в резонатор лазера, которое осуществляется путем поворота плоскопараллельных пластинок компенсатора, изменяется величина выходного сигнала. Однако влияние потерь, вносимых оптическим компенсатором 5 (между зеркалами 2, 3), на изменение выходного сигнала снижено зеркалом 2. Этим достигается расширение области измерения оптических потерь, но чувствительность схемы уменьшается. Однако благодаря тому, что зеркала 2, 3 образуют интерферометр Фабри — Перо и эффективный коэффициент отражения R^* зеркал 2, 3 становится частотно зависимым:

$$|R^*| = \frac{(R_2 - R'_3)^2 + 4R_2R'_3 \sin^2(2\pi\Delta/\lambda)}{(1 - R_2R'_3)^2 + 4R_2R'_3 \sin^2(2\pi\Delta/\lambda)}, \quad (3)$$

где $\lambda^{-1} = \nu$; $R'_3 = R_3(1 - \alpha)$; Δ — оптическая разность хода лучей между зеркалами 2, 3, в данной оптической схеме возможно получение модуляции выходного излучения. Для этой цели зеркало 3 устанавливается на пьезокерамический модулятор 7, на который подается переменное напряжение U от генератора.

Наличие модулятора такого рода позволяет также избавиться от периодических срывов генерации, вызванных изменением величины Δ при повороте пластинок 5. Кроме того, применение усилителя переменного тока У2-6 с частотной фильтрацией сигнала позволяет частично компенсировать потерю чувствительности в оптической схеме. Модуляционный сигнал после фотодетектора 8 поступает в электронный блок обработки сигналов 9, а затем, в зависимости от метода измерения оптических потерь излучения, — на осциллограф или микровольтметр.

Измерение потерь излучения в данной схеме осуществляется по методу сравнения оптических потерь на калиброванных (эталонных средствах измерения) пластинках оптического компенсатора и исследуемом объекте 6 оптотехники. Поэтому точность определения абсолютных значений потерь в большей степени зависит от инструментальных погрешностей оптического компенсатора и вычислений по формулам Френеля, чем от потенциальной точности измерения внутрирезонаторных потерь излучения, которая характеризуется чувствительностью оптической схемы.

Для определения максимальных потерь излучения в трехзеркальном резонаторе лазера запишем следующие соотношения:

$$\alpha_{\max} = 1 - \sqrt{\frac{1 - R_1R_2G}{R_3(R_1G - R_2)}};$$

$$\alpha'_{\max} = A(K_v L - \chi L_1) - \alpha'_d, \quad A = \frac{1 + R_2}{1 - R_2}.$$

Здесь параметр A характеризует степень расширения области измеряемых значений потерь в установке с трехзеркальным резонатором по сравнению с двухзеркальным резонатором; величина дополнительных потерь α'_d аналогична величине α_d (формула (2)) в установке с двухзеркальным резонатором.

На рис. 2 приведена зависимость максимальных потерь излучения, при коэффициентах отражения зеркал 1, 3 соответственно 98,8 и 99,8 %, от параметра X :

$$X = R^* - R_2, \quad R^* = 1/R_1 G.$$

Параметр X определяет отклонение относительного коэффициента отражения зеркала 2 от значения R^* , при котором выполняется условие порога генерации индуцированного излучения (формула (1)). Коэффициенты отражения зеркал 1—3 контролировались при $\lambda=632,8$ нм на спектрофотометре СФ-26 с использованием дополнительной приставки, разработанной в Государственном оптическом институте им. С. В. Вавилова (Санкт-Петербург). Экспериментальные значения α_{\max} (кривая 2 на рис. 2) меньше рассчитанных (кривая 1), которые определялись путем возведения в квадрат левой и правой частей выражения (3). Это можно объяснить наличием дополнительных потерь α'_d , которые теоретически не оценивались.

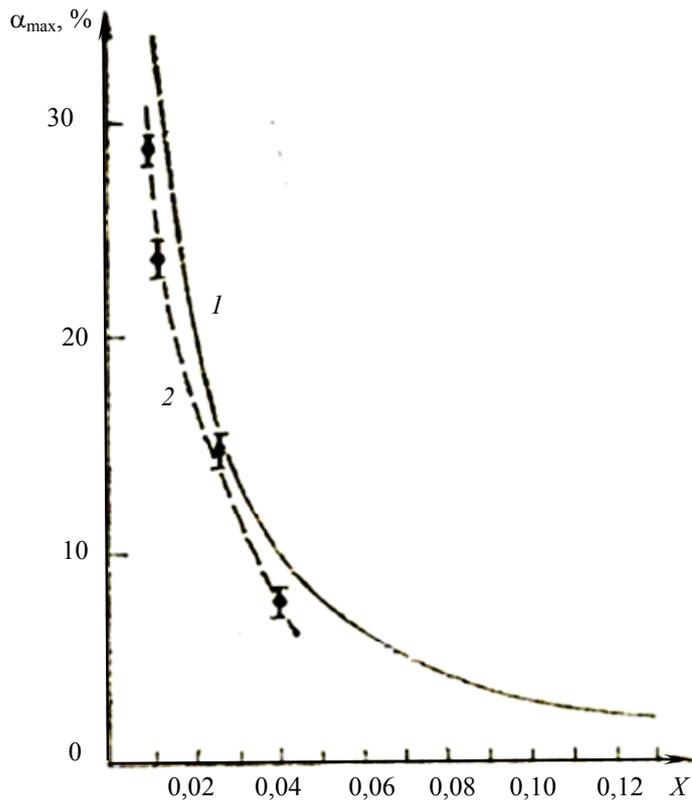


Рис. 2

Установка, созданная на базе газоразрядной трубки ЛГ-52-3 при использовании зеркал 1—3 с коэффициентами отражения $R_1=98,6$ %, $R_2=90$ % и $R_3=98,9$ %, обеспечивает измерение потерь излучения на внутррезонаторных элементах до значений $\alpha \sim 8$ % с погрешностью не более $S_\alpha \leq 0,02$ % при $L_1 \sim 0,6$ м. На данной установке были проведены исследования по влиянию оптических свойств поверхностного слоя элементов, изготовленных из кварцевого стекла КУ1, на потери лазерного излучения, вносимые в оптический резонатор этими элементами.

Измерение величины потерь оптического излучения можно проводить двумя способами, отличающимися выбором начального отсчета: от величины максимальной мощности излучения [3] и от порога генерации индуцированного излучения [4].

На рис. 3 показана зависимость максимальных потерь излучения на плоскопараллельных пластинках оптического компенсатора (кривая 1) и погрешности (S_α) измерения потерь излучения (кривая 2) от угла φ падения светового пучка. Как следует из анализа рис. 3, при измерении $\alpha = 0 \dots 2 \%$, т.е. по первой методике, погрешность измерений выше, чем в области значений $\alpha = 2 \dots 4 \%$, т.е. по второй методике (кривая 2). Кроме того, измерения по второй методике проводятся на линейном участке зависимости потерь излучения α от угла падения светового пучка (кривая 1), что особенно важно при метрологической аттестации потерь, вносимых в оптический резонатор плоскопараллельными пластинками оптического компенсатора.

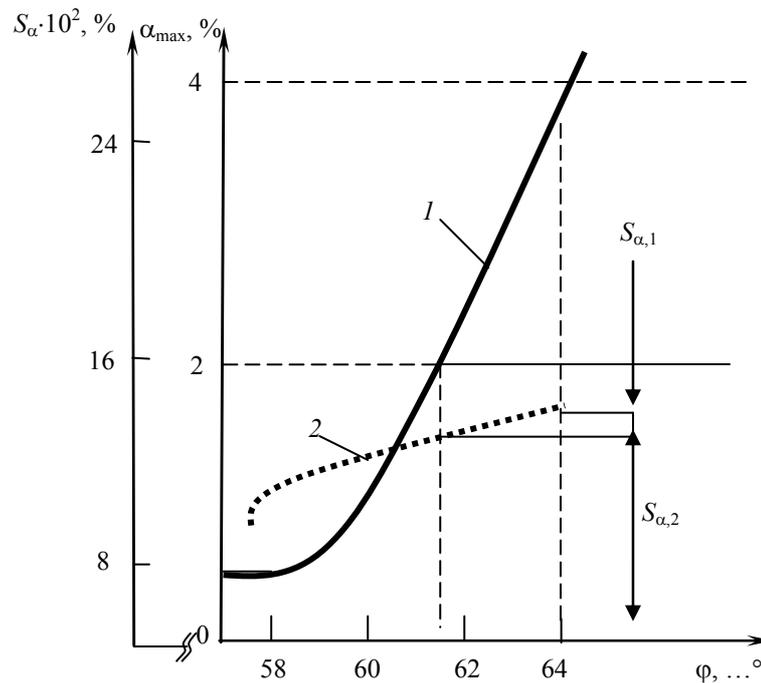


Рис. 3

Для выяснения правомерности использования модели однородного поверхностного слоя, рассмотренной в работе [5], при определении параметров ПС полированного кварцевого стекла КУ1 было проведено сопоставление (в зависимости от времени t полирования) экспериментальных результатов измерений величины потерь излучения на длине волны $\lambda=0,6328$ мкм (рис. 4, кривая 3) с данными эллипсометрических исследований оптических характеристик ПС — эффективных значений показателя преломления ПС n^* (кривые 1) и толщины слоя d^* (кривые 2), рассчитанных для следующих распределений показателя преломления ПС:

$$n(z) = n_0 + (n(0) - n_0)F(qz);$$

$$F_1(qz) = \exp(-qz), \quad F_2(qz) = (qz) \exp(-qz),$$

здесь n_0 — показатель преломления стекла; $n(0)$ — показатель преломления ПС при $z=0$, где z — координата оптической оси, направленной вглубь ПС; $q = 1/d$, где d — характеристическая толщина ПС.

На рис. 4 использованы также следующие обозначения: „+“ — модель однородного слоя ПС; „*“ — модель оптического профиля ПС $F_2(z)$; „o“ — модель экспоненциального

профиля ПС $F_1(z)$; „ \oplus “ — характеристическая толщина d ПС, определяемая для экспоненциального профиля ПС элементов кварцевого стекла методом нарушенного полного внутреннего отражения.

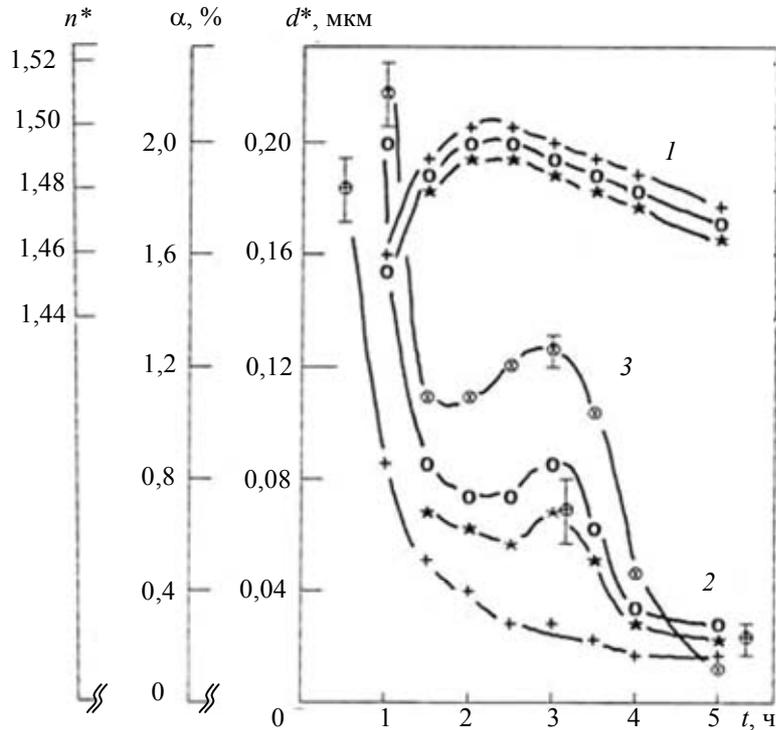


Рис. 4

Эффективные параметры n^* и d^* для неоднородных ПС рассчитываются по формулам приведенным в работах [1, 2].

При сопоставлении полученных данных учитывались результаты теоретических исследований, которые показали, что потери оптического излучения, определяемые как разность между истинным коэффициентом пропускания оптического элемента (T) и рассчитанным по формулам Френеля (T_0), при толщине слоя $d^* < \lambda$ пропорциональны не только величине отклонения показателя преломления ПС n^* от объемного значения n_0 , но и квадрату относительной толщины слоя, т.е. $\alpha = T - T_0 \sim (d^*/\lambda)^2$.

Из анализа рис. 4 следует, что изменение толщины ПС, рассчитанной в предположении его оптической неоднородности, лучше соответствует изменению величины потерь излучения, чем при расчете характеристик по модели однородного слоя. Эти данные подтверждают полученный в работах [3, 4] вывод о том, что при полировании кварцевого стекла образуются неоднородные поверхностные слои. Однако для объективной интерпретации физико-химических процессов, приводящих к появлению на поверхности оптической детали модифицированного ПС, необходимо учитывать возможность изменения вида оптического профиля слоя в процессе полирования детали. При этом подробное изучение физико-химических процессов, способствующих формированию неоднородных ПС, указывает на необходимость применения широкого класса ранее не использованных моделей отражающих систем и ужесточения требований к решениям о соответствии той или иной модели ПС объекту исследования. Подробное рассмотрение аспектов экспериментально-теоретического анализа неоднородных ПС является предметом изложения в отдельных публикациях.

Таким образом, по результатам проведенных исследований внутрирезонаторных потерь излучения на элементах лазерной техники доказано, что применение трехзеркального резонатора в лазерной установке позволяет расширить область измеряемых потерь излучения на оптических элементах по сравнению с двухзеркальным резонатором. Методика измерения

внутрирезонаторных потерь на оптических элементах по срыву генерации индуцированного излучения имеет существенные преимущества по сравнению с методикой, в которой измерение потерь излучения осуществляется от величины максимальной выходной мощности лазерного излучения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Землянский В. С., Степанчук А. А., Сычев М. М., Храмовский И. А. Влияние структуры поверхностного слоя кварцевого стекла на потери излучения в ультрафиолетовой области спектра // Физика и химия стекла. 2008. Т. 34, № 3. С. 326—335.
2. Новиков А. А., Прокопенко В. Т., Храмовский И. А. Определение потерь излучения на оптических элементах методами эллипсометрии и спектрофотометрии // Изв. вузов. Приборостроение. 2007. Т. 50, № 3. С. 62—68.
3. Хирд Т. Измерение лазерных параметров / Пер. с англ.; Под ред Ф. С. Файзуллова. М.: Мир, 1970.
4. Троицкий Ю. В. Одночастотная генерация в газовых лазерах. Новосибирск: Наука, 1975. С. 22.
5. Пшеницын В. И., Храмовский И. А. Исследование потерь излучения на оптических элементах в зависимости от физических параметров поверхностного слоя // ОМП. 1983. № 12. С. 5—7.

Сведения об авторах

- Полина Сергеевна Беломутская** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники
- Татьяна Михайловна Данилова** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники
- Игорь Анатольевич Храмовский** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники

Рекомендована кафедрой
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию
22.06.10 г.

УДК 681.2-2; 67.05

Р. Г. Зонов, В. М. Стяпшин, Г. М. Михеев

ГОНИОМЕТРИЧЕСКОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ УГЛОВЫХ ЗАВИСИМОСТЕЙ ОПТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА В ПРОВОДЯЩИХ ПЛЕНКАХ

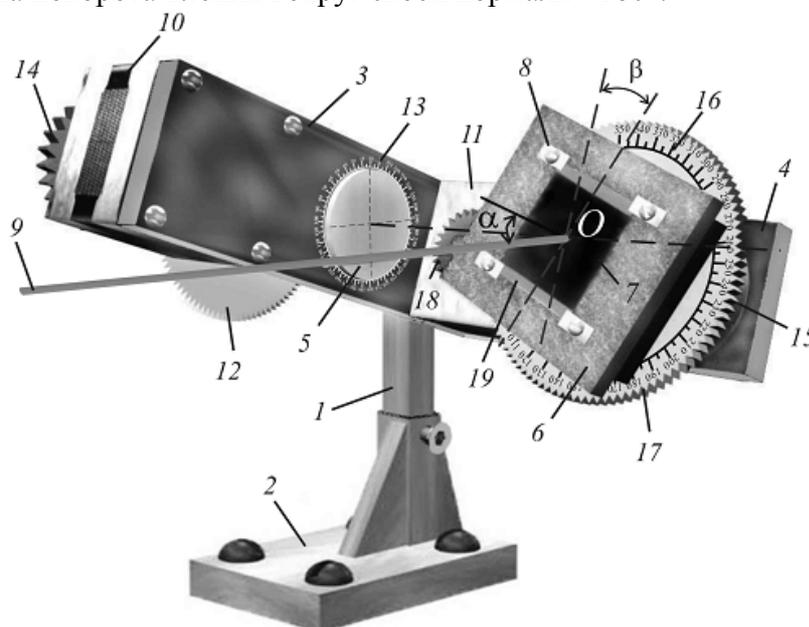
Представлено гониометрическое устройство для исследования ориентационных зависимостей оптоэлектрического отклика в проводящих пленках. Разработанное устройство позволяет плавно изменять углы наклона пленки и ее поворота вокруг своей нормали относительно направления пучка лазера без смещения зоны лазерного облучения на поверхности пленки.

Ключевые слова: гониометрическое устройство, проводящие пленки, оптоэлектрический сигнал, угловая зависимость.

При проведении физического эксперимента с применением лазеров часто возникает необходимость в различных приспособлениях и юстировочных устройствах, многие из которых можно найти в арсенале специализированных фирм по производству и продаже лабораторного оборудования. Между тем авторами установлено, что в нанографитных [1, 2] и серебропалладиевых резистивных пленках [3] под действием импульсного лазерного излучения

наносекундной длительности возникает импульсное электрическое напряжение, амплитуда которого существенно зависит от угла падения луча (α) и угла поворота пленки (β) вокруг своей нормали. Для получения достоверных экспериментальных данных, характеризующих пространственно-ориентационные зависимости этого явления в широком диапазоне изменения углов α и β , возникает необходимость в специальном гониометрическом устройстве, аналога которого отсутствуют в ассортименте производителей оптического оборудования. Следует отметить, что в рентгентехнике подобные устройства хорошо известны [4]. Они входят в состав многих серийно выпускаемых рентгентехнических приборов, а также имеются в продаже отдельно (см., например, каталог фирмы „Huber“, Германия). Однако имеющиеся на рынке образцы дóроги, нуждаются в некоторой доработке и сложны при самостоятельном изготовлении. Из реализованных в лабораторных условиях вариантов следует выделить гониометрическое устройство, описанное в работе [5]. Но это устройство, при значительной сложности изготовления, обеспечивает изменение угла наклона исследуемого образца лишь в диапазоне $\pm 60^\circ$.

В настоящей статье представлено описание разработанного и изготовленного простого гониометрического устройства, функционирующего в диапазонах угла падения лазерного излучения $\pm 90^\circ$ и угла поворота пленки вокруг своей нормали $\pm 180^\circ$.



Основными частями гониометрического устройства (см. рисунок) являются штатив *1*, установленный на опорном столике *2*, монтажный угольник, состоящий из двух платформ *3* и *4*, ориентированных перпендикулярно друг к другу, два несущих стержня (на рисунке показан только первый стержень *5*), а также диэлектрический держатель *6*, предназначенный для фиксации на его поверхности исследуемой проводящей пленки *7* с помощью четырех прижимных лапок-электродов *8*. Поворот монтажного угольника вокруг несущего стержня *5* обеспечивает изменение угла падения α лазерного луча *9* на поверхность пленки, а вращение держателя вокруг второго стержня обеспечивает изменение угла β , характеризующего поворот пленки вокруг своей нормали. С обратной стороны держателя *6* размещен коаксиальный разъем (на рисунке не показан) для вывода оптоэлектрического сигнала на осциллограф или другое измерительное устройство. Для автоматизации измерений устройство может быть дополнительно оснащено двумя шаговыми электродвигателями *10* и *11*, закрепленными соответственно на платформах *3* и *4* монтажного угольника.

Штатив жестко соединен с несущим стержнем *5*. На одном конце стержня *5* на подшипники установлена платформа *3*, а на другом его конце жестко закреплено зубчатое колесо *12*,

относительно которого происходит вращение монтажного угольника с лимбом 13, отмеряющим угол α . При работе шагового двигателя 10 с шестерней 14 происходит вращение монтажного угольника вокруг оси несущего стержня 5 и тем самым обеспечивается плавное изменение угла α .

На платформе 4 под прямым углом жестко закреплен второй несущий стержень (на рисунке не показан). На нем с помощью подшипников установлена втулка 15, на которой закреплены держатель 6 и зубчатое колесо 17, приводимое во вращение шаговым двигателем 11 через шестерню 18. На зубчатом колесе 17 нанесен лимб 16, отмеряющий угол β (точка отсчета на рисунке не показана). Поверхность площадки держателя для размещения пленки устанавливается перпендикулярно оси втулки и соответственно оси второго стержня. Таким образом, при работе шагового двигателя 11 обеспечивается поворот втулки вокруг своей оси и, следовательно, вращение держателя пленки вокруг нормали к его поверхности. Тем самым достигается изменение угла β .

Исследуемая проводящая пленка с нанесенными на ее поверхность измерительными электродами 19 крепится на диэлектрическом держателе с помощью проводящих прижимных лапок, попарно электрически соединенных между собой. В свою очередь, прижимные лапки закрепляются на поверхности держателя с помощью винтов в точках, расположенных вблизи концов измерительных электродов. Этим достигается возможность проведения экспериментов при углах $\alpha \approx 90^\circ$, когда луч лазера практически „скользит“ вдоль поверхности пленки.

Для получения достоверных экспериментальных результатов гониометрическое устройство должно обеспечивать неподвижность центра зоны лазерного облучения относительно измерительных электродов при изменении углов α и β . Это достигается путем установки двух несущих стержней (относительно которых происходит наклон и вращение исследуемого образца) таким образом, чтобы их оси пересекались в точке O , расположенной на поверхности пленки. Только в случае когда пучок лазера проходит через эту точку, изменения углов α и β не будут приводить к смещению центра зоны лазерного облучения относительно измерительных электродов. Конструктивно это достигается за счет точного сопряжения платформ 3 и 4 при изготовлении устройства. Однако при проведении экспериментов часто используются проводящие пленки (на подложках), имеющие разную толщину. В связи с этим предусмотрена возможность перемещения второго стержня вдоль его оси в небольших пределах (5 мм). Это обеспечивается ввинчиванием указанного стержня по резьбе посадочного отверстия в платформе 4 на необходимую глубину и последующей его фиксацией при помощи контргайки.

В конструкции измерительного устройства целесообразно за точку отсчета угла α использовать такое положение пленки, при котором обеспечивается нормальное падение луча на пленку. Отсчет угла β следует производить при таком положении, когда электроды расположены перпендикулярно плоскости падения луча при наклонном падении луча лазера на поверхность пленки. В ходе экспериментов луч лазера выравнивался по горизонтали, а лимбы углов наклона и поворота пленки юстировались по уровню. Точность установки углового положения образца определяется минимальным шагом, который обеспечивает шаговый двигатель совместно с зубчатой передачей (в ручном режиме — точностью нониусной шкалы, определяющей углы α и β). В разработанном устройстве точность задания углового положения составляет не хуже $0,5^\circ$ при шаге двигателя $1,8^\circ$ за счет зубчатой передачи с передаточным отношением 3,6.

Габаритные размеры устройства составляют 132×170 мм, высота устройства в начальном положении 130 мм и может плавно меняться до 160 мм. При этом лазерный пучок должен проходить на высоте 80—120 мм относительно оптического стола. Такая конструкция устройства позволяет исследовать пленки на подложках толщиной до 5 мм и размером до 40×40 мм.

Описанное устройство использовалось для определения ориентационных зависимостей амплитуды импульсной ЭДС, возникающей в нанографитных и серебропалладиевых резистивных пленках при облучении их импульсным излучением мощного наносекундного YAG:Nd³⁺-лазера, в диапазоне углов $\alpha \pm 90^\circ$ и $\beta \pm 180^\circ$ [1—3]. Размер исследуемых пленок составлял 25×25 мм. Нанографитные пленки, полученные методом плазмохимического осаждения, имели толщину вместе с подложкой около 0,5 мм [1, 2]. Измерительные электроды шириной 3 мм наносились на нанографитные пленки методом термического напыления меди и золота в вакууме. Толщина серебропалладиевых пленок вместе с керамической подложкой составляла 2 мм. Они снабжались двумя параллельными измерительными пленочными электродами, выполненными из серебра и расположенными между диэлектрической подложкой и резистивной пленкой.

Данное устройство применялось также для исследования влияния поляризации лазерного излучения на оптоэлектрический отклик в нанографитных пленках при ориентации измерительных электродов перпендикулярно и параллельно плоскости падения лазерного излучения [6].

Работа выполнена по государственному контракту № 02.513.11.3048 от 22.03.2007 г. (шифр „2007-3-1.3-07-01-095“), при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 10-02-96017-р_урал_a) и Президиума Уральского отделения РАН (грант для молодых ученых).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н., Свирко Ю. П. Оптическое выпрямление в углеродных нанопленках // ЖЭТФ. 2004. Т. 126, № 5. С. 1083—1088.
2. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Образцов А. Н. и др. Быстродействующий фотоприемник мощного лазерного излучения на основе нанографитной пленки // ПТЭ. 2005. № 3. С. 84—89.
3. Михеев Г. М., Зонов Р. Г., Александров В. А. Светоиндуцированная ЭДС в серебропалладиевых резистивных пленках // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36, вып. 14. С. 79—87.
4. Березка В. Н., Ганенко В. Б., Головкин Н. Г. и др. Гониометрическая установка „Кристалл-2“ с автоматизированной системой управления // ПТЭ. 1991. № 3. С. 188—192.
5. Копанев В. Д., Дравин В. А., Седелников А. Э., Спицин А. В. Прецизионный трехосевой вакуумный гониометр с дистанционным управлением // Там же. 1987. № 4. С. 207—210.
6. Михеев Г. М., Стяпшин В. М., Образцов П. А. и др. Зависимость оптоэлектрического выпрямления в нанографитных пленках от поляризации лазерного излучения // Квантовая электроника. 2010. Т. 40, № 5. С. 425—430.

Сведения об авторах

- Руслан Геннадьевич Зонов** — канд. физ.-мат. наук; Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; ст. науч. сотрудник; E-mail: ZNV@udman.ru
- Василий Михайлович Стяпшин** — Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; мл. науч. сотрудник; E-mail: vms@udman.ru
- Геннадий Михайлович Михеев** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт прикладной механики, Уральское отделение РАН, Ижевск; гл. науч. сотрудник; E-mail: mikheev@udman.ru

Рекомендована Ученым советом
Института

Поступила в редакцию
25.11.10 г.

SUMMARY

P. 5—9.

REGULARIZATION OF VARIATIONAL ESTIMATIONS OF NONLINEAR DYNAMIC SYSTEM STATE PARAMETERS

Application of the variational approach to regularization of the problem of estimation of statistical parameters of nonlinear dynamic system state with the use of the maximum-likelihood criterion is considered.

Keywords: statistical estimation, regularization, nonlinear dynamic system, maximum-likelihood criterion.

Data on authors

- Viacheslav I. Mironov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Leading Scientist; E-mail: mironuv@yandex.ru
- Yury V. Mironov** — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Scientist; E-mail: mironuv@yandex.ru
- Rafael M. Yusupov** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences; Director; E-mail: spiiran@iias.spb.su

P. 9—14.

ANALYSIS OF REFERENCE POINT SELECTION ALGORITHMS IN SEGMENT FRAMES CLASSIFICATION IN VIDEO SEQUENCE

A scheme is presented of reference points selection based on analysis of existing algorithms and possibilities of their application to the problems of segments classification of a video sequence frame.

Keywords: block-based approach, variable size of block, reference points, classification of segments, motion compensation.

Data on authors

- Irina S. Rubina** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Technology; E-mail: rubren@mail.ru
- Alexander Yu. Tropchenko** — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Technology; E-mail: tau@d1.ifmo.ru

P. 15—18.**ESFIMATION OF PROBABILITY OF THE FIRST LEVELS-CROSSING OF GAUSSIAN MARKOV SEQUENCE**

The probability of the time of first-crossing of constant and variable level by finite-order Gaussian Markov sequence is estimated using the geometrical and the generalized geometrical distributions.

Keywords: probability of first-crossing time, finite-order Gaussian Markov sequence, constant and variable levels.

Data on author

Natalia V. Girina — Post-Graduate Student; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information and Network Technologies; E-mail: natalia.girina@gmail.com

P. 19—24.**PHOTOGRAMMETRIC MODEL OF SPACE PANORAMIC IMAGES**

Functional photogrammetric relations between elements of geometric structure of space images and Greenwich coordinates of the corresponding points of the earth surface are obtained on the base of analysis of dynamics and characteristics of space images in panoramic survey modes with scanning head mirror.

Keywords: space scanner images, panoramic survey, photogrammetric model.

Data on authors

Vladimir G. Andronov — Cand. Techn. Sci.; South West State University, Department of Telecommunications, Kursk; E-mail: vladiA58@yandex.ru

Sergey V. Degtyarev — Dr. Techn. Sci., Professor; South West State University, Department of Information Systems and Technologies, Kursk; E-mail: ist.@kistu.kursk.ru

Eugenia V. Lazareva — Post-Graduate Student; South West State University, Department of Telecommunications, Kursk; E-mail: eugenia-lazareva@yandex.ru

P. 25—31.**COMPOSITE BLOCKING OF COOPERATIVE TASKS IN SYSTEMS WITH MULTI-CORE PROCESSORS**

The protocols for software tasks access to joint resources are considered. A comparison is carried out of properties of such protocols in systems with single-core and multi-core processors. It is shown that some protocol properties, which are true for the systems with single-core processors, become invalid for the systems with multi-core processors. Both versions of the priority ceiling protocol prevent mutual blocking of tasks in systems with single-core processors, but stack-optimized version of the protocol loses this valuable property in systems with multi-core processors. Both versions of the protocol prevent composite blocking of tasks for single-core processors, but lose this property for multi-core processors.

Keywords: multitask systems, systems with multi-core processors, real-time systems, cooperative tasks, protocols for access to resources.

Data on authors

Viktor V. Nikiforov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Software Technologies and Systems; E-mail: nik@iiias.spb.su

Viacheslav I. Shkirtil — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation of the Russian Academy of Sciences, Laboratory of Software Technologies and Systems; E-mail: jvatlas@mail.rcom.ru

P. 31—34.

DIGITAL MODELING OF LIDAR SYSTEMS

A digital model is proposed for estimation of power transfer coefficient for simulation of laser radiation propagation along the pass “atmosphere – water surface – atmosphere” by the Monte-Carlo method. Results of simulation are presented.

Keywords: monitoring, optical-digital systems, lidars, direction finding, stratified medium.

Data on authors

- Anatoly V. Demin* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Informatics and Applied Mathematics; E-mail: dav_60@mail.ru
- Yulia Yu. Gatchina* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Computer Systems Design; Assistant; E-mail: Gatchina@mail.ifmo.ru
- Sergey I. Zhukov* — OAO “LOMO”, St. Petersburg; Chief Specialist

P. 34—38.

OPTICAL FUZZY-LOGIC DEVICES

One of the actual problems in the field of development of fuzzy logic devices and systems – hardware realization fuzzy information systems is concerned. Disadvantages of microprocessor devices for fuzzy information processing are considered. Application perspectives of fuzzy logic devices based on space-distributed optical technologies of information processing are discussed, an example of hardware implementation – optical fuzzyfication device is described. The main advantages of the use of optical fuzzy logic information processing devices are analyzed.

Key words: fuzzy logic, microprocessor, optical information technology, optical fuzzyfication device.

Data on authors

- Mikhail A. Alles* — Post-Graduate Student; Rostov State Transport University, Department of Automatics and Telemechanics on Railway Transport, Rostov-on-Don; E-mail: alles@nextmail.ru
- Sergey V. Sokolov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Rostov State Transport University, Department of Automatics and Telemechanics on Railway Transport, Rostov-on-Don; E-mail: s.v.s.888@yandex.ru
- Sergey M. Kovalev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Rostov State Transport University, Department of Automatics and Telemechanics on Railway Transport, Rostov-on-Don; E-mail: ksm@rfnias.ru

P. 39—43.

CALCULATION OF NATURAL VIBRATIONS FREQUENCIES OF MANOMETRIC TUBULAR SPRINGS

Dynamic equations of manometric tubular spring are derived and a method for estimation of fundamental vibration frequencies is proposed. Manometric spring is considered as a bent bar executing vibrations in the plane of central axis curvature. Dependences of fundamental vibration frequency of tubular spring on geometrical parameters are obtained in numerical experiments.

Keywords: natural vibrations, manometric tubular spring.

Data on authors

- Sergey P. Pirogov* — Cand. Techn. Sci.; Tyumen State Oil and Gas University, Department of Theoretical and Applied Mechanics; E-mail: piro-gow@yandex.ru
- Alexander Yu. Chuba* — Cand. Techn. Sci.; Tyumen State Agricultural Academy, Department of General Technical Disciplines; E-mail: aleksandr-chuba@mail.ru

P. 43—47.

ENHANCEMENT OF THE HYDRODYNAMIC BEARING RELIABILITY

The causes of the hydrodynamic sliding bearing wear are described and methods of the bearing reliability improvement are considered. Description of the bearing with improved reliability is presented, analysis of lubrication film characteristics in sliding bearing is performed. A mathematical model of the bearing with enhanced reliability is developed.

Keywords: hydrodynamic bearing, bearing capacity, eccentricity, safety factor.

Data on author

Vladimir S. Mayorov — Post-Graduate Student; St. Petersburg State Transport University, Department of Machines Theory and Robotics; E-mail: mayorov.pgups@gmail.com

P. 48—52.

TECHNICAL AND CONSTRUCTIVE JUSTIFICATION OF DESIGN OF A MOVING UNDERWATER VEHICLE BRAKING DEVICE

The problem of technological maintenance of tests of starting arrangements of small-sized unmanned underwater vehicles in the conditions of industrial premises is considered. A design is proposed of a braking device for a specialized hydrodynamic test desk.

Keywords: autonomous unmanned underwater vehicle, brake mechanism, schematic design, technical characteristics, the design substantiation.

Data on author

Anton V. Krasilnikov — Cand. Tech. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Instrument-Making Technology; E-mail: a.v.krasilnikov@mail.ru

P. 53—56.

THE THEOREM OF SAMPLES FOR COMPLEX AND REAL SIGNALS

The problem of optimal choice of discretization period for continuous complex and real signals with a limited spectrum is studied. It is shown that for single-valued reconstruction of a continuous complex signal from its samples it is necessary for the sampling rate to be no less than twice the highest frequency in the signal spectrum. At the same time, for a real signal, the sampling rate must be greater than twice the highest frequency in the signal spectrum.

Keywords: complex and real signals, discretization, reconstruction, errors.

Data on author

Sergey I. Ziatdinov — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Information and Network Technologies; E-mail: Kaf53@GUAP.ru

P. 57—62.

ON TWO APPROACHES TO PARAMETRIC ENCODING OF STEREO SIGNAL

Two approaches to stereophonic signals encoding allowing for high quality stereo signal with low bit costs are considered. The first approach is useful in the case of low bit rates, but sometimes does not allow for a perfect signal reconstruction. The second one is more bits expensive but makes it possible to obtain perfect quality.

Keywords: parametric stereo, audio encoding

Data on authors

- Kirill V. Yurkov** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Information Systems;
E-mail: yourkovkirill@mail.ru
- Sergey E. Petrov** — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Advanced Computing Laboratory; Junior Scientist;
E-mail: petrovse@mail.ru

P. 62—67.

DEVELOPMENT OF A THERMAL SCANNER FOR ELECTROMAGNETIC FIELD IN WAVEGUIDE TRANSMISSION LINE

A device is described which allows for various studies of electromagnetic field along the rectangular waveguide transmission line by measuring temperature distribution on a part of its wide wall.

Keywords: radio measurements, rectangular waveguide, wavelength measurement, measuring line.

Data on authors

- Vladlen N. Kuznetsov** — Cand. Techn. Sci., Professor; Sary Oskol Technological Institute, Branch of National University of Science and Technology “Moscow Institute of Steel and Alloys”, Department of Automation and Industrial Electronics; E-mail: vnk@sti-misis.ru
- Anatoly S. Grankin** — Post-Graduate Student; Sary Oskol Technological Institute, Branch of National University of Science and Technology “Moscow Institute of Steel and Alloys”, Department of Automation and Industrial Electronics; E-mail: a_grankin@mail.ru

P. 68—73.

NONLINEAR-OPTICAL METHOD FOR MEASURING SPHERICAL ABERRATION OF GERMANIUM LENSES IN THE INFRARED

A method is presented for determination of spherical aberration of various germanium lenses in IR. The spherical aberration value is evaluated on the base of data on spatial-angular structure of second optical harmonic.

Keywords: second harmonic, spherical aberration, spatial-angular structure, IR radiation.

Data on authors

- Anatoly I. Illarionov** — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Irkutsk State University of Railway Transport, Department of Physics; E-mail: illarionov_a@irgups.ru
- Maxim S. Ivanov** — Post-Graduate Student; Zabaikalsky Institute of Railway Transport, Chita, Branch of Irkutsk State University of Railway Transport, Department of Vital Activity Safety and Engineering Environmental Protection; E-mail: vanov.maks@mail.ru

P. 73—79.

DETERMINATION OF OPTICAL CHARACTERISTICS OF LASER HARDWARE ELEMENTS BY INTRACAVITY LOSS METHOD

A three-mirror scheme is proposed for measurement of optical losses of radiation in intracavity elements of ion lasers. Peculiarities of loss measurement in optical elements with the use of mirror of controlled reflectance and by calibrated loss method are considered. Results of ellipsometric measurements of variations in polarization properties of optical element during the surface finishing are compared with data obtained with the use of intracavity loss method.

Keywords: optical loss, ellipsometric measurements, optical characteristics of surface layer.

Data on authors

- Polina S. Belomutskaya* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics
- Tatiana M. Danilova* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics
- Igor A. Khrantsovsky* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid State Optoelectronics

P. 79—82.

A GONIOMETRICAL DEVICE FOR INVESTIGATION OF ANGLE DEPENDENCES OF PHOTOVOLTAGE RESPONSE OF CONDUCTIVE FILMS

A goniometrical device for investigation of angle dependences of photovoltage response of conductive films is presented. This device allows for variation of laser beam incidence angle and rotate the film under investigation relative to normal to its surface without displacement of laser action area on the film surface.

Keywords: goniometrical device, conductive films, photovoltage response, angle dependence.

Data on authors

- Ruslan G. Zonov* — Cand. Phys.-Math. Sci.; Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk; Senior Scientist; E-mail: ZNV@udman.ru
- Vasily M. Styapshin* — Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk; Junior Scientist; E-mail: vms@udman.ru
- Gennady M. Mikheev* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Institute of Applied Mechanics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Izhevsk; Chief Scientist; E-mail: mikheev@udman.ru