

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Гриценко П. А., Арановский С. В., Бобцов А. А., Пыркин А. А. Повышение точности идентификации с использованием метода каскадной фильтрации..... 587
- Буй Ван Шон, Бушуев А. Б., Шмигельский Г. М., Литвинов Ю. В., Щаев Е. Г. Алгоритмы управления летающим роботом при слежении за подвижным объектом..... 593
- Бушуев А. Б., Воробьев В. С., Томашевич С. П., Мансурова О. К., Кульчицкий А. А. Поведение агента, заданное логистическим отображением..... 600
- Якимов В. Н., Машков А. В. Цифровой спектральный анализ на основе знакового оценивания корреляционной функции и косинус-преобразования корреляционного окна..... 606
- Балахонцева М. А., Бухановский А. В. Мультиагентное моделирование процесса эвакуации пассажиров аварийного судна в штормовых условиях..... 614

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Андреев Л. Н., Дегтярева Г. С. Афокальный компенсатор аберраций..... 621
- Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автономная астрономическая система навигации и слежения..... 625
- Саврасов Ф. В. Исследование влияния снежного покрова на производительность фотоэлектрического модуля..... 639

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Толмачев В. А., Никитина М. В., Кононова М. Е. Синтез скоростной подсистемы двухдвигательно-го следящего электропривода телескопа с трехмассовым механизмом исполнительной оси..... 645
- Зиятдинов С. И. Импульсная характеристика комплексного полосового фильтра Баттерворта..... 653

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

- Медунецкий В. М., Николаев В. В. Функциональный анализ и выбор технических решений механических систем..... 659

НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАЗРАБОТКИ

- Поляков Д. С., Яковлев Е. Б. Термализация электронного газа и роль эффекта насыщения межзонного поглощения при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на полупроводники и диэлектрики..... 664

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Билятдинова А. З., Бухановский А. В. Особенности подготовки кадров в области суперкомпьютерного моделирования на основе международных магистерских программ двойного диплома..... 670

THE MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

IZVESTIYA VYSSHIKH UCHEBNYKH ZAVEDENIY

PRIBOROSTROENIE

ITMO UNIVERSITY

The journal is published since January 1958

Vol. 58

AUGUST 2015

№ 8

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Gritcenko P. A., Aranovskiy S. V., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A.** Improving Accuracy of Frequency Identification by Using a Cascade of Adaptive Filters 587
- Bui Van Shon, Bushuev A. B., Shmigelsky G. M., Litvinov Yu. V., Shchaev E. G.** Algorithms for Controlling a Flying Robot when the Robot is Tracking a Moving Object..... 593
- Bushuev A. B., Vorobiev V. S., Tomashevich S. I., Mansurova O. K., Kulchitsky A. A.** Agent Behavior Defined by Logistic Mapping..... 600
- Yakimov V. N., Mashkov A. V.** Digital Spectral Analysis Based on the Sign Approach to Correlation Function Estimation and the Integral Cosine Transformation of Correlation Window 606
- Balakhontceva M. A., Boukhanovsky A. V.** Multiagent Simulation of Passenger Evacuation Considering Ship Motions 614

OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Andreev L. N., Degtiareva G. S.** Afocal Compensator of Aberrations 621
- Kuznetsov V. I., Danilova T. V.** Autonomous Astronomical System for Navigation and Tracking..... 625
- Savrasov F. V.** The Effect of Snow Covering on Photovoltaic Solar Cell Efficiency 639

ELECTRON AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Tolmachev V. A., Nikitina M. V., Kononova M. E.** Synthesis of a Speed Subsystem of Two-Motor Servo Drive of a Telescope with Three-Mass Actuating Axle 645
- Ziatdinov S. I.** Pulse Characteristic of Butterworth Complex Bandpass Filter..... 653

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGY

- Medunetskiy V. M., Nikolaev V. V.** Functional Analysis and Selection of Engineering Solutions for Mechanical Systems 659

SCIENTIFIC AND PRACTICAL DEVELOPMENTS

- Polyakov D. S., Yakovlev E. B.** Thermalisation of Electron Gas and the Role of Saturation of Interband Absorption under the Action of Femtosecond Laser Pulse in Semiconductors and Dielectrics 664

BRIEF NOTES

- Bilyatdinova A. Z., Boukhanovsky A. V.** Training in the Field of Supercomputer Simulations: International Master's Double Degree Programs 670

Editor-in-Chief E. B. Yakovlev

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИДЕНТИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА КАСКАДНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

П. А. ГРИЦЕНКО, С. В. АРАНОВСКИЙ, А. А. БОБЦОВ, А. А. ПЫРКИН

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru*

Рассматривается задача повышения точности идентификации частоты зашумленного синусоидального сигнала. Предлагается использовать адаптивный каскад полосовых фильтров совместно с алгоритмом идентификации. Такой каскад может значительно улучшить качество идентификации, ослабить осцилляции сигнала ошибки идентификации и уменьшить его смещение. Эффективность предложенной схемы продемонстрирована посредством численного моделирования.

Ключевые слова: *идентификация частоты, автоподстройка фильтров, каскадная схема.*

Введение. Компенсация помех и возмущений является не только фундаментальной проблемой теории управления, но и актуальной прикладной задачей [1, 2]. Действительно, большинство промышленных объектов управления подвержены действию внешних возмущений, например, вибраций. Зачастую возмущения, которые испытывают системы управления, являются периодическими функциями времени. Например, в жестких дисках компьютера на считывающую головку воздействуют вибрации [3], вращающийся двигатель вертолета также является источником периодического шума и вибраций [4]. Для устранения подобных нежелательных воздействий используют различные методы компенсации.

С целью компенсации возмущений, в частности, используется непрямой адаптивный метод, но для этого требуется точно знать частоту возмущающего воздействия. Как правило, на практике такая информация отсутствует или же частота возмущения меняется в ходе функционирования системы. Если использование датчиков частоты невозможно ввиду технических или экономических причин, необходимо найти частоту гармонического сигнала, причем качество компенсации напрямую зависит от точности идентификации частоты. Задача идентификации значительно усложняется в условиях реальных шумов измерений, которые могут привести к появлению смещения или осцилляции вокруг среднего значения оценки частоты. Таким образом, требуется разрабатывать методы повышения точности идентификации частоты синусоидального сигнала в условиях шумов измерений.

Известно множество подходов к решению задачи идентификации частоты [5—10]. Целью настоящей статьи является разработка метода повышения точности оценок, получаемых при идентификации. В работе предложена схема каскадной фильтрации сигнала, позволяющая существенно снизить влияние шумов и тем самым повысить точность оценивания частоты для широкого класса методов идентификации.

Постановка задачи. Рассмотрим задачу идентификации частоты синусоидального сигнала

$$y(t) = \sigma_0 + \sigma \sin(\omega t + \phi) + \delta(t), \tag{1}$$

где σ_0, σ, ϕ принимают неизвестные постоянные значения, $\delta(t)$ — шум измерений. Основной задачей идентификации параметров такого сигнала является получение оценки частоты $\hat{\omega}$. К настоящему времени разработаны различные алгоритмы решения поставленной задачи (см., например, [5—10]), но большинству из них присущ определенный недостаток — при прохождении через идентификатор значение составляющей $\delta(t)$ может увеличиться, что приведет к существенным колебаниям в оценке частоты и снизит точность идентификации. Для снижения влияния $\delta(t)$ разработчик должен варьировать настраиваемые коэффициенты алгоритмов, что, в свою очередь, также снижает точность. С целью устранения указанного недостатка предлагается каскадная схема идентификации с настраиваемыми полосно-пропускающими фильтрами для последовательного уточнения оценки частоты идентифицируемого сигнала.

На рис. 1 приведена структурная схема предлагаемой каскадной идентификации. Здесь идентификационные блоки $\mathcal{ID}_{1,\dots,n+1}$ представляют собой реализации выбранных алгоритмов идентификации, n — число фильтров в каскаде. Фильтрующие блоки $\mathcal{F}_{1,\dots,n}$ являются реализацией устойчивых линейных полосовых фильтров, где i -й фильтр пропускает синусоидальный сигнал с частотой, находящейся в диапазоне $[\omega_{l,i}, \omega_{r,i}]$ ($\omega_{l,i}$ и $\omega_{r,i}$ — левая и правая границы полосового фильтра), и ослабляет сигналы с частотами вне указанного диапазона. Следовательно, i -й фильтр параметризован своей полосой пропускания $b_{\omega,i}$ и средней частотой на полосе пропускания $\omega_{\text{mid},i}$:

$$b_{\omega,i} = \frac{\omega_{r,i} - \omega_{l,i}}{2}, \quad \omega_{\text{mid},i} = \frac{\omega_{r,i} + \omega_{l,i}}{2}.$$

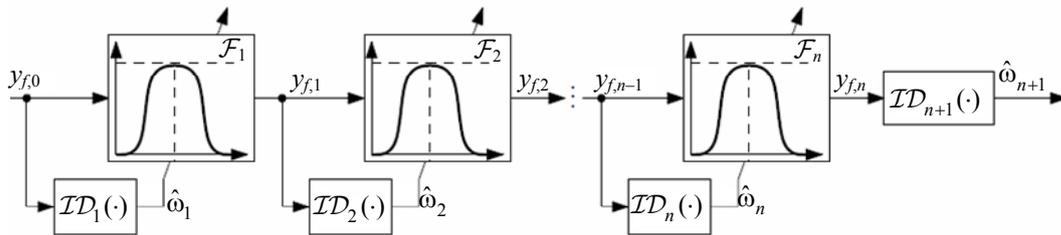


Рис. 1

Кроме того, предполагается, что пропускная способность i -го фильтра является фиксированным расчетным параметром, и фильтр можно параметризовать только его центральной частотой: $\mathcal{F}_i = \mathcal{F}_i(\omega_{\text{mid},i})$. Центральная частота фильтра может быть найдена как

$$\omega_{c,i} = \sqrt{\omega_{l,i} \omega_{r,i}}.$$

Адаптивный каскад может быть описан следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} y_{f,0}(t) &= y(t), \\ \hat{\omega}_i(t) &= \mathcal{ID}_i(\alpha_i, k_i)[y_{f,i-1}(t)], \\ y_{f,i}(t) &= \mathcal{F}_i(\hat{\omega}_i(t))[y_{f,i-1}(t)], \\ \hat{\omega}_{n+1}(t) &= \mathcal{ID}_{n+1}(\alpha_{n+1}, k_{n+1})[y_{f,n}(t)], \\ i &= 1, \dots, n, \end{aligned} \right\}$$

где $\mathcal{ID}[y_{f,i}(t)]$ и $\mathcal{F}[y_{f,i}(t)]$ представляют собой сигнал $y_{f,i}(t)$, проходящий через системы \mathcal{ID} и \mathcal{F} , i -й блок \mathcal{ID}_i — реализация используемого идентификатора. Идентификатор принимает сигнал $y_{f,i-1}(t)$ в форме (1) как входной и обеспечивает оценку частоты этого сигнала $\hat{\omega}_i(t)$. Эта оценка используется для настройки средней частоты i -го фильтра $\mathcal{F}_i(\hat{\omega}_i(t))$. Сигнал $y_{f,i}(t)$ получается в результате прохождения $y_{f,i-1}(t)$ через настроенный i -й фильтр. Если фильтры выбраны таким образом, что $b_{w,i} < b_{w,i-1}$, то уровень шума в сигнале $y_{f,i}(t)$ будет ниже, чем уровень шума в сигнале $y_{f,i-1}(t)$. Это, в свою очередь, приведет к уменьшению установившегося значения ошибки измерения $\hat{\omega}_{i+1}(t)$ по сравнению с установившимся значением ошибки измерения $\hat{\omega}_i(t)$.

Результаты численного моделирования. В качестве примера рассматривается задача идентификации частоты сигнала

$$y(t) = \sin(10 \cdot 2\pi \cdot t + \pi/3) + \delta(t),$$

где $\delta(t)$ — случайный равномерно распределенный ограниченный сигнал с нулевым средним значением.

Каскад состоит из трех идентификаторов \mathcal{ID}_i ($i = 1, 2, 3$) и двух полосовых фильтров, выбраны фильтры Баттерворта 6-го порядка. Рассмотрим реализацию с минимальной размерностью пространства состояний номинального i -го полосового фильтра, т.е. фильтра с единичной центральной частотой $\omega_{c,i} = 1$:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_{i,1} \\ \dot{v}_{i,2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_i & I \\ -I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i,1} \\ v_{i,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix} y_{f,i-1}, \\ y_{f,i} &= \begin{bmatrix} C_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i,1} \\ v_{i,2} \end{bmatrix} + D_i y_{f,i-1}, \end{aligned}$$

где $v_{i,1}, v_{i,2} \in R^3$ — внутренние состояния i -го фильтра, A_i, B_i, C_i и D_i — матрицы соответствующих размерностей для i -го фильтра, $I \in R^{3 \times 3}$ — единичная матрица. Тогда уравнение, описывающее i -й фильтр с фиксированной полосой пропускания $b_{w,i}$ и желаемой средней частотой $\omega_{mid,i}$, имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{v}_{i,1} \\ \dot{v}_{i,2} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_i & \omega_{c,i} I \\ -\omega_{c,i} I & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i,1} \\ v_{i,2} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_i \\ 0 \end{bmatrix} y_{f,i-1}, \\ y_{f,i} &= \begin{bmatrix} C_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{i,1} \\ v_{i,2} \end{bmatrix} + D_i y_{f,i-1}, \\ \omega_{c,i} &= \frac{\sqrt{\omega_{mid,i}^2 - b_{w,i}^2}}{2}. \end{aligned} \right\}$$

Для наглядности исследуем работоспособность предложенного каскада с использованием в качестве идентификационных блоков реализации трех алгоритмов идентификации, описанных в работах [6—8]. Были выбраны следующие значения параметров для адаптивного алгоритма [6] $\alpha = 10$, $k = 10^4$ и нулевые начальные условия на интеграторах; для алгоритма [7] $K_s = 1$, $\lambda = 1$, $Q_0 = (1/\lambda)I$, $\hat{\theta}_0 = [64 \ 64]^T$; для алгоритма идентификации [8] $(x_1, x_2, \theta) = (1, 1, 11)$, $\zeta = 0,25$, $\gamma = 0,01$. Для численного моделирования были использованы

следующие значения параметров адаптивных фильтров: $b_{\omega,1} = 6 \cdot 2\pi$, $b_{\omega,2} = 1 \cdot 2\pi$. Результаты численного моделирования представлены на рис. 2 (а — работа [6], б — [7], в — [8]; ω — действительное значение частоты, $\hat{\omega}_1$, $\hat{\omega}_2$, $\hat{\omega}_3$ — оценки частот, полученные на выходе блоков ID_1 , ID_2 , ID_3 соответственно). Отдельные количественные оценки этих результатов приведены в таблице. Для ошибок идентификации $\tilde{\omega}_{1,2,3}$ и каждого из рассматриваемых алгоритмов идентификации оцениваются две количественные характеристики: математическое ожидание E и дисперсия V , при этом желаемое значение математического ожидания ошибки идентификации $E = 0$.

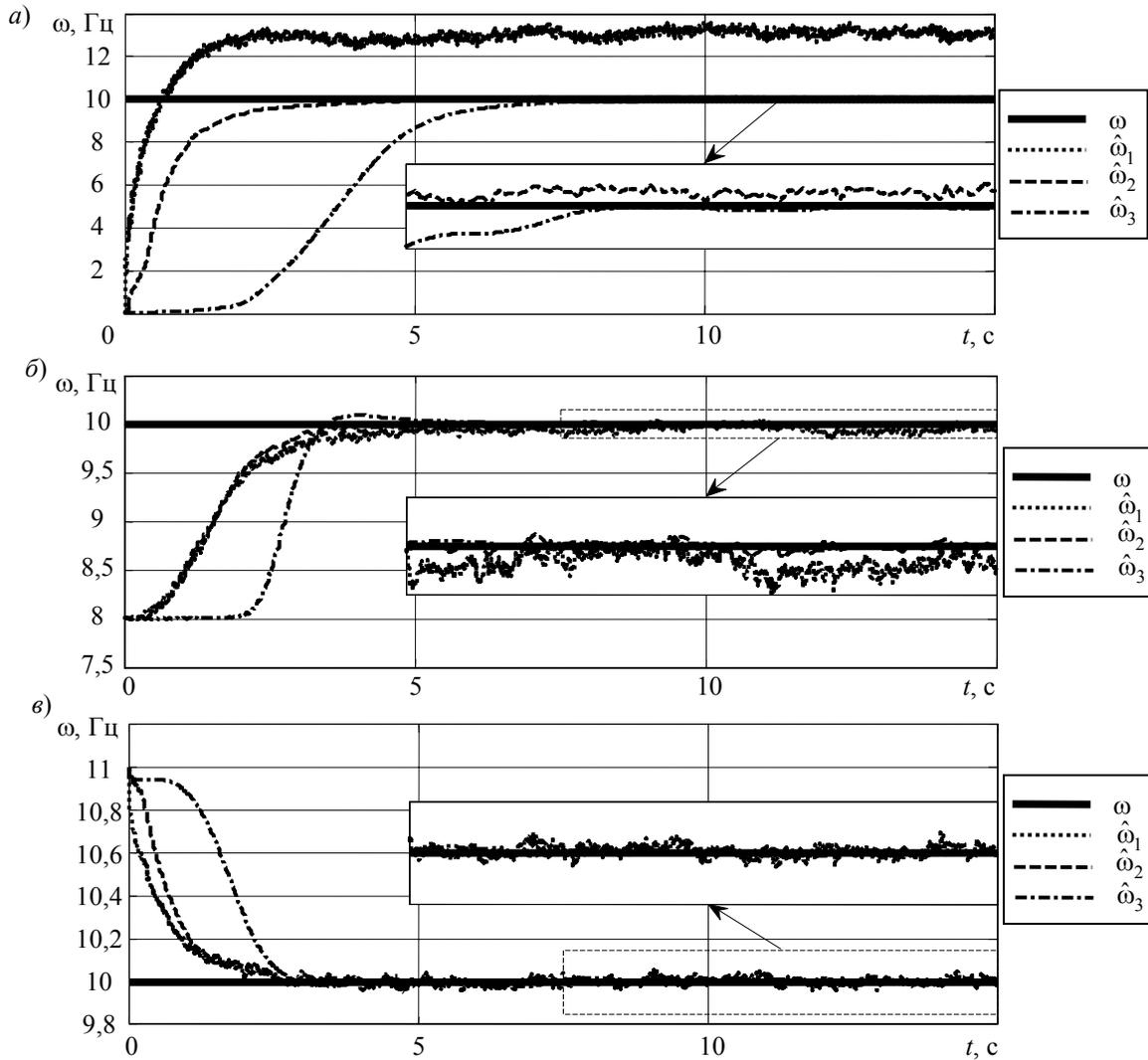


Рис. 2

Алгоритм, источник	Количественные оценки	$\tilde{\omega}_1$	$\tilde{\omega}_2$	$\tilde{\omega}_3$
[6]	$E, \text{Гц}$	3,11	0,05	0,03
	$V, \text{Гц}^2$	0,02	0,01	0,01
[7]	$E \cdot 10^{(-1)}, \text{Гц}$	0,53	0,04	0,02
	$V \cdot 10^{(-3)}, \text{Гц}^2$	1,04	0,14	0,05
[8]	$E \cdot 10^{(-1)}, \text{Гц}$	0,04	0,01	0,01

Полученные результаты показывают, что в случае зашумленного входного сигнала каскад адаптивных фильтров может значительно повысить качество идентификации, уменьшить отклонение и дисперсию установившейся ошибки.

Заключение. В работе рассмотрена проблема идентификации частоты синусоидального сигнала. Предложено использовать схему, состоящую из адаптивного каскада полосовых фильтров, в сочетании с реализацией алгоритмов идентификации. Эта схема значительно улучшает качество идентификации и существенно снижает ожидаемое значение установившейся ошибки и дисперсию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поляк Б. Т., Щербаков П. С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
2. Цыкунов А. М. Компенсация возмущений и помех в системах с измеряемым вектором состояния // Вестн. АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2.
3. Sacks A., Bodson M., Khosla P. Experimental results of adaptive periodic disturbance cancellation in a high performance magnetic disk drive // ASME J. of Dynamic Systems Measurement and Control. 1996. Vol. 118. P. 416—424.
4. Bittanti S., Moiraghi L. Active control of vibrations in helicopters via pole assignment techniques // IEEE Transact. on Control Systems Technology. 1994. Vol. 2(4). P. 343—350.
5. Wu B., Bodson M. A magnitude/phase-locked loop approach to parameter estimation of periodic signals // IEEE Transact. Autom. Control. 2003. Vol. 48. P. 612—618.
6. Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Identification of frequency of biased harmonic signal // EUCA Europ. J. of Control. 2010. Vol. 16. P. 129—139.
7. Fedele G., Ferrise A. Non adaptive second-order generalized integrator for identification of a biased sinusoidal signal // IEEE Transact. Autom. Control. 2012. Vol. 57. P. 1838—1842.
8. Mojiri M., Bakhshai A. R. An adaptive notch filter for frequency estimation of a periodic signal // IEEE Transact. Autom. Control. 2004. Vol. 49. P. 314—318.
9. Xia X. Global frequency estimation using adaptive identifiers // IEEE Transact. Autom. Control. 2002. Vol. 47. P. 1188—1193.
10. Elliott S., Nelson P. Active noise control // IEEE Signal Processing Magazine. 1993. Vol. 10. P. 12—35.

Сведения об авторах

- Полина Андреевна Гриценко** — студентка; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: polina.gritsenko@gmail.com
- Станислав Владимирович Арановский** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: s.aranovskiy@gmail.com
- Алексей Алексеевич Бобцов** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; заведующий кафедрой; E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru
- Антон Александрович Пыркин** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

Рекомендована кафедрой систем управления и информатики

Поступила в редакцию 07.06.15 г.

Ссылка для цитирования: Гриценко П. А., Арановский С. В., Бобцов А. А., Пыркин А. А. Повышение точности идентификации с использованием метода каскадной фильтрации // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 587—592.

IMPROVING ACCURACY OF FREQUENCY IDENTIFICATION BY USING A CASCADE OF ADAPTIVE FILTERS

P. A. Gritcenko, S. V. Aranovskiy, A. A. Bobtsov, A. A. Pyrkin

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru

The problem of frequency identification for a biased sinusoidal signal is considered. The use of an adaptive cascade of band-pass filters together with application of an identification algorithm is proposed to improve accuracy of frequency identification. This method may lead to significant improvement in the identification performance, to attenuation of oscillations in the signal identification error, and to reduction in the error signal bias. Numerical simulations demonstrate the proposed scheme efficiency.

Keywords: frequency identification, frequency locked loop, cascade circuit.

Data on authors

- Polina A. Gritsenko** — Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: polina.gritsenko@gmail.com
- Stanislav V. Aranovskiy** — PhD; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: s.aranovskiy@gmail.com
- Alexey A. Bobtsov** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; Head of the Department; E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru
- Anton A. Pyrkin** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

Reference for citation: *Gritsenko P. A., Aranovskiy S. V., Bobtsov A. A., Pyrkin A. A.* Improving accuracy of frequency identification by using a cascade of adaptive filters // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 8. P. 587—592 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-587-592

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАЮЩИМ РОБОТОМ ПРИ СЛЕЖЕНИИ ЗА ПОДВИЖНЫМ ОБЪЕКТОМ

Буй Ван Шон, А. Б. Бушуев, Г. М. Шмигельский, Ю. В. Литвинов, Е. Г. Щаев

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: yurl13@yandex.ru*

Рассматриваются алгоритмы управления беспилотным летательным аппаратом (квадрокоптером), позволяющие решать задачи слежения за подвижным объектом с использованием технического зрения на основе встроенной в квадрокоптер видеокамеры. Разработан алгоритм перемещения квадрокоптера по заданной траектории, который базируется на аппроксимации исходной кривой небольшими отрезками и позволяет упростить процесс управления использованием только двух команд: движение вперед и поворот вокруг вертикальной оси (по углу рыскания). Представлены способы идентификации объектов на цифровом изображении, основанные на выделении контуров (границ); проанализированы методы определения перемещений объекта слежения с учетом непостоянности фона, вызванной движением камеры. Разработан алгоритм измерения расстояния до объекта слежения с использованием одной камеры, который является модификацией метода стереоскопического зрения (жесткое крепление камеры к квадрокоптеру, учитывается специфика его полета). Алгоритм основан на сравнении двух кадров, снятых с различной высоты полета. Предложен метод, позволяющий измерять расстояние до нескольких целей независимо от их положения в кадре, что может быть использовано для безопасного прохождения препятствий на маршруте. Совместное использование описанных алгоритмов позволяет получить полный набор параметров, определяющих местоположение и движение цели, на основе которого возможно выработать команды управления полетом летающего робота, необходимые для организации полноценной системы слежения беспилотных летательных аппаратов за подвижными объектами с помощью технического зрения.

Ключевые слова: квадрокоптер, траекторное управление, БПЛА, слежение, подвижный объект, техническое зрение.

Введение. Все большее распространение в различных сферах деятельности получают летающие роботы, или беспилотные летательные аппараты (БПЛА), в частности, квадрокоптеры, представляющие собой платформу с четырьмя несущими винтами, попарно вращающимися в противоположные стороны. Квадрокоптеры обладают рядом преимуществ (простота конструкции, большая маневренность, компактность и малая собственная масса при существенной массе полезной нагрузки) и могут быть использованы как недорогое и эффективное средство при картографировании, аэрофотосъемке в местах чрезвычайных ситуаций, доставке небольших грузов, а также для слежения за подвижными объектами (животные, люди, транспортные средства и т.п.).

В большинстве работ, посвященных решению задач мониторинга местности при помощи БПЛА, рассматривается движение летательного аппарата по известной траектории. В частности, в работе [1] предлагается система управления, реализующая движение квадрокоптера при заданной скорости с учетом рельефа местности по прямой линии, соединяющей начальную и конечную точки траектории. В работе [2] рассмотрен алгоритм передвигания квадрокоптера вдоль любой траектории в пространстве, при котором квадрокоптер способен следовать за движущимся объектом с известными координатами и скоростью.

В настоящей работе предлагаются алгоритмы идентификации и анализа перемещения объектов на изображении, полученном с фронтальной камеры квадрокоптера. На основе этих алгоритмов формируются команды управления полетом для идентификации препятствий, автоматической корректировки траектории, поиска конкретных объектов на маршруте и автономного сопровождения выбранной цели. Актуальность работы состоит в том, что существующие решения на разных этапах выполнения поставленной задачи требуют либо значительного количества исходных данных о маршруте следования, которые могут быть заранее неизвестны, либо вмешательства человека в процесс управления для корректировки полета. В любом случае функция летательного аппарата именно как беспилотного не реализуется в достаточной мере. Однако использование технического зрения как инструмента автоматизации процесса управления БПЛА позволяет усовершенствовать существующие системы и свести к минимуму необходимость участия человека в процессе управления.

Способ задания траектории. Для формирования первоначальной траектории была разработана программа [3, 4]. Траектория представляет собой множество точек на декартовой плоскости с координатами (x, y) , эти данные могут быть представлены в форме массива точек, который разбивается на небольшие части — отрезки кривой, аппроксимирующие первоначальную траекторию.

На рис. 1 представлено окно программного приложения (*а* — траектория, задаваемая на экране монитора, *б* — аппроксимированная первоначальная траектория).

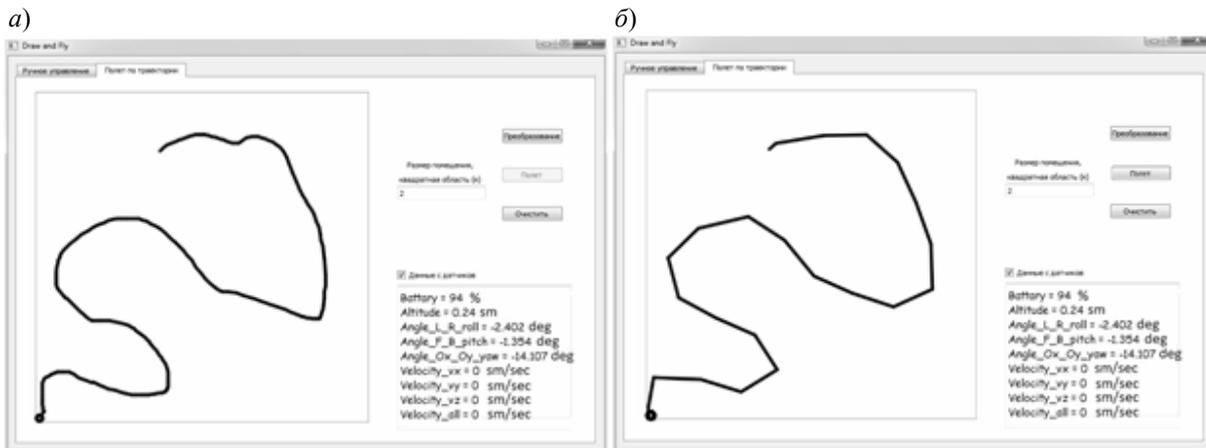


Рис. 1

Аналитический расчет траектории. Перемещение квадрокоптера по траектории включает в себя движение по прямой, соединяющей точки начала и конца элемента-отрезка, и вращение вокруг вертикальной оси, проходящей через центр квадрокоптера. Длина продольного перемещения рассчитывается как расстояние (в пикселях) между двумя точками, умноженное на коэффициент соответствия (зависит от размеров площадки для полета и области рисования на дисплее).

Расчет угла поворота происходит в несколько этапов (рис. 2):

1) первый угол (α) определяется следующим выражением

$$\alpha = \arccos \left(\frac{y_0 - y_1}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \frac{180}{\pi} \right);$$

2) второй и последующие углы (β_i) рассчитываются по формуле

$$\beta_i = \arccos \left(\frac{(x_i - x_{i-1})(x_{i+1} - x_{i-1}) + (y_i - y_{i-1})(y_{i+1} - y_{i-1})}{\sqrt{[(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2][x_{i+1} - x_{i-1})^2 + (y_{i+1} - y_{i-1})^2]}} \frac{180}{\pi} \right),$$

где $i = 1 - (N - 1)$, N — число отрезков траектории.

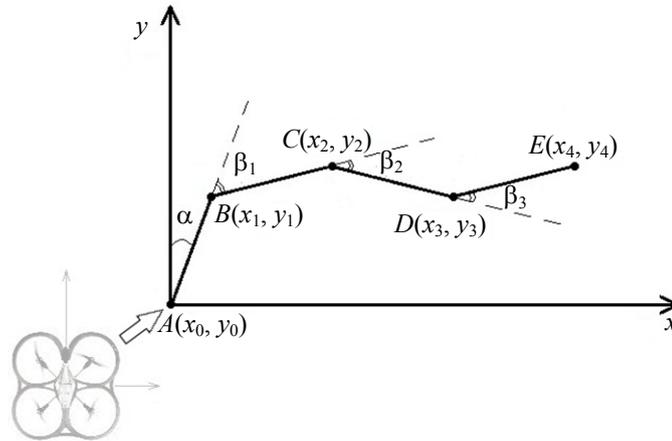


Рис. 2

На основании сформированной траектории вырабатываются команды управления и передаются в БПЛА, который в процессе полета должен обнаружить и идентифицировать объект, за которым необходимо вести слежение, используя бортовую видеокамеру [5].

Идентификация объектов на изображениях. Существует много различных алгоритмов, которые обеспечивают решение задачи идентификации объектов на изображении [6]. Все они предназначены для распознавания лишь определенного класса объектов (лица, рукописный текст, автомобильные номерные знаки и т.п.). Следовательно, для решения задачи необходимо заранее определить, за какими именно объектами квадрокоптер будет выполнять слежение. Однако любой из методов идентификации основан на базовых алгоритмах обработки и анализа изображений, эти методы прямо или косвенно опираются на наличие границы между фоном и распознаваемым объектом. Рассмотрим некоторые базовые методы поиска объектов на изображении.

Контурный анализ использует самый простой способ поиска объекта на изображении — выделение и анализ его контура. Этот метод предполагает анализ свойств сигнала яркости — разрывность и однородность. Согласно первому подходу, деление изображения на области сводится к поиску резких перепадов сигнала яркости. Второй подход основан на разбиении изображения на однородные участки по заранее выбранному критерию. Практическая реализация этих двух подходов состоит в применении так называемых масок (фильтров) [5]. Маска представляет собой матрицу коэффициентов (некоторый двумерный массив). Процесс фильтрации основан на простом перемещении маски фильтра между точками изображения и выделении точек, значение яркости которых существенно отличается от окружающего фона. Найденные точки образуют линии, которые будут являться границами объектов на изображении. После выделения всех границ можно решать задачу распознавания конкретных объектов на изображении. Алгоритмы поиска индивидуальны для каждой конкретной задачи [7], но все они основываются на анализе формы границ и цвета в заданной области в соответствии с характерными для установленного класса объектов критериями.

Метод Канни [8] — один из наиболее эффективных для выделения границ объекта. При определении границ используют два порога (для „слабых“ и „сильных“ границ). „Слабые“ границы отмечаются в результирующем изображении только тогда, когда они соединены с „сильными“. Для зашумленных изображений этот метод обеспечивает наилучшее выделение границ по сравнению с остальными методами, но требует существенно большего времени.

Анализ перемещения объекта слежения. Решение задачи слежения за подвижными объектами с помощью камеры всегда сводится к покадровому анализу видеопотока [6]. Однако существует два различных подхода. Один из них основан на сравнении двух смежных кадров, полученных с камеры [9]. Каждый новый кадр сравнивается с предыдущим, в результате чего на новом выделяются области, в которых произошли изменения, что соответствует перемещению какого-либо объекта на изображении. Также к найденным областям можно применять алгоритмы идентификации и выделять нужные объекты. Традиционно используемый алгоритм довольно прост в реализации и обеспечивает требуемое быстродействие. Но даже при незначительных скоростях полета квадрокоптера затруднительно отделить постоянно меняющийся фон от движущегося объекта. Поэтому оптимальным решением задачи слежения за объектом с помощью подвижной камеры является поиск объекта на каждом новом кадре и сравнение его положения с положением на предыдущем снимке [10]. При таком подходе можно пренебречь изменением фона, а привязка непосредственно к цели позволяет сузить область поиска на новом кадре, опираясь на положение объекта в предыдущем, что положительно скажется на быстродействии всей системы в целом. Приведенный алгоритм позволяет обнаружить движение цели только в двумерной плоскости. Существующий метод анализа размера цели малоэффективен, так как определить, насколько приблизился или отдалился объект, с приемлемой точностью невозможно. В связи с этим возникает задача измерения расстояния до объекта слежения.

Измерение расстояния до объекта слежения. Квадрокоптер при слежении за объектом должен находиться на заданном расстоянии от объекта. Измерить это расстояние с помощью камеры можно, только используя метод стереоскопического зрения [11]. Так как используемая в настоящей работе модель квадрокоптера оборудована только одной фронтальной камерой, реализовать этот метод возможно с помощью двух снимков, сделанных с разных точек полета [12, 13]. Однако вследствие жесткой связи камеры и квадрокоптера, а также особенностей его управления точное перемещение камеры в горизонтальной плоскости довольно сложный процесс, который требует внесения изменений в систему стабилизации полета. Поэтому для измерения расстояния до каких-либо объектов на изображении был разработан алгоритм, основанный на периодическом изменении высоты полета на заданную величину и сравнении двух соседних снимков. Схематично работа данного алгоритма показана на рис. 3 (h_1 и h_2 — высота полета в метрах, Δh — изменение высоты в метрах, φ — половина угла обзора в градусах, s_x — расстояние до объекта в метрах, K_1 и K_2 — кадры, полученные с камеры на разной высоте, h' — захватываемая объективом камеры высота в метрах, $\Delta h'$ — изменение положения цели на изображении в пикселах).

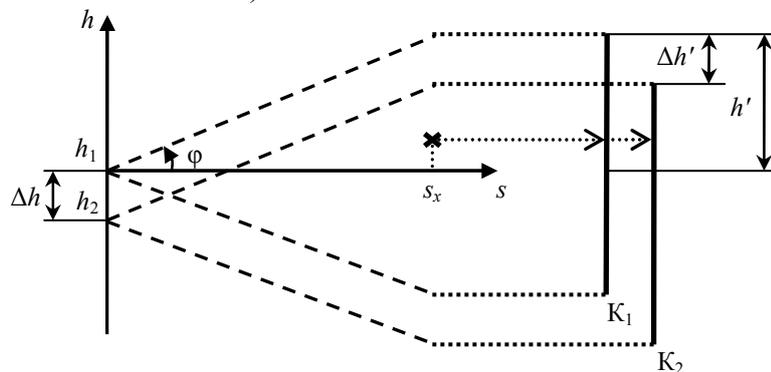


Рис. 3

В зависимости от расстояния до цели объектив камеры захватывает различное расстояние по вертикали [14] на линии объекта, которое определяется формулой:

$$h' = s_x \operatorname{tg} \varphi. \quad (1)$$

Так как камера, которой оборудован квадрокоптер, имеет формат съемки 1280×720 , каждому пикселу на изображении соответствует реальная высота $\frac{h'}{360}$. Изменение высоты Δh полета квадрокоптера вызовет соответствующее перемещение $\Delta h'$ объекта слежения на изображении, а следовательно, эквивалентом одному пикселу по высоте будет $\frac{\Delta h}{\Delta h'}$:

$$1 \text{ пкс} \Leftrightarrow \frac{h'}{360} = \frac{\Delta h}{\Delta h'} \Rightarrow h' = 360 \frac{\Delta h}{\Delta h'}. \quad (2)$$

Подставив (2) в (1), получим формулу для вычисления расстояния до объекта слежения:

$$s_x = \frac{360 \Delta h}{\text{tg}(\varphi) \Delta h'}. \quad (3)$$

Изменение высоты будет являться разностью показаний высотомера на высотах h_1 и h_2 , $\Delta h'$ рассчитывается на основе анализа кадров K_1 и K_2 .

На основании полученных таким образом данных о местоположении объекта вырабатываются команды управления тягой двигателей квадрокоптера, что позволяет изменять траекторию полета в соответствии с движениями объекта слежения, выдерживая заданное расстояние до него.

Заключение. В результате проведенных исследований на примере квадрокоптера ArDrone были разработаны алгоритмы:

- задания и формирования команд управления для произвольной пространственной траектории полета квадрокоптера;
- выделения контура объекта слежения;
- определения расстояния до объекта слежения с помощью бортовой видеокамеры;
- формирования команд управления квадрокоптером для организации слежения за подвижным объектом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоконь С. А., Золотухин Ю. Н., Нестеров А. А., Филиппов М. Н. Управление квадрокоптером на основе организации движения по желаемой траектории в пространстве состояний // Тр. XIII Междунар. конф. „Проблемы управления и моделирования в сложных системах“. Самара: Самарский научный центр РАН, 2011. С. 217—222.
2. Puls T., Hein A. 3D trajectory control for quadcopter // Intelligent Robots and System (IROS), IEEE/RSJ Intern. Conf. 2010. P. 640—645
3. Литвинов Ю. В., Бушуев А. Б., Гриценко П. А., Шмигельский Г. М. Полет квадрокоптера по произвольно задаваемой траектории // Сб. матер. IX МНПК „Современные научные достижения – 2013“. Ч. 77. Прага: Образование и наука, 2013. 96 с.
4. Шмигельский Г. М., Гриценко П. А., Бобцов А. А., Кремлёв А. С., Литвинов Ю. В. Свид. о гос. рег. программы для ЭВМ № 2013614903 от 22.05.2013.
5. Литвинов Ю. В., Мазулина В. В., Фролов С. Н. Использование веб-камеры для обнаружения препятствия на пути движения мобильного робота // Сб. матер. МНПК „Системы обработки информации. Информационные проблемы теории акустических, радиоэлектронных и информационных систем“. Харьков, 2013. Вып. 7 (114). С. 34—36.
6. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004. 928 с.
7. Шапиро Л., Стокманн Дж. Компьютерное зрение. М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. 752 с.
8. Герман Е. В. Алгоритмы совмещения разнородных изображений в бортовых системах визуализации: Дис. ... канд. техн. наук. Рязань: Рязанский государственный радиотехнический университет, 2014. 180 с.
9. Shapiro L., Stockman G. Textbook: Computer Vision. NJ: Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2000.

10. CVonline: On-Line Compendium of Computer Vision / Ed. by R. B. Fisher. Division of Informatics, University of Edinburgh, 2012.
11. Кравков С. В. Глаз и его работа. М.—Л., 1950.
12. Валюс Н. А. Стереоскопия. М., 1962.
13. Валюс Н. А. Стереоскопия: фотография, кино, телевидение. М., 1986.
14. Бегунов Б. Н. Геометрическая оптика. М.: Изд-во МГУ, 1966.

Сведения об авторах

- Буй Ван Шон** — студент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: bui.son1412@gmail.com
- Александр Борисович Бушуев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: bushuev@inbox.ru
- Григорий Михайлович Шмигельский** — студент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: gri6ka16@gmail.com
- Юрий Володарович Литвинов** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: yurl13@yandex.ru
- Егор Геннадьевич Щаев** — студент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: egor-94@bk.ru

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики

Поступила в редакцию
18.03.15 г.

Ссылка для цитирования: Буй Ван Шон, Бушуев А. Б., Шмигельский Г. М., Литвинов Ю. В., Щаев Е. Г. Алгоритмы управления летающим роботом при слежении за подвижным объектом // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 593—599.

ALGORITHMS FOR CONTROLLING A FLYING ROBOT WHEN THE ROBOT IS TRACKING A MOVING OBJECT

Bui Van Shon, A. B. Bushuev, G. M. Shmigelsky, Yu. V. Litviniv, E. G. Shchaev

*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: yurl13@yandex.ru*

Algorithms for controlling an unmanned aerial vehicle (quadrocopter) are considered. The algorithms allow solving the problem of tracking moving objects with the use of video camera mounted on the quadrocopter. An algorithm of quadrocopter piloting along a predetermined path was developed. The algorithm applies an approximation of the original curve with small segments and it allows for simplification of the controlling by utilization of only two commands: forward movement and rotation about the vertical axis (yaw). An approach to object identification from its digital image, based on edge detection is presented. Methods of obtaining of the tracking object displacement while accounting for background inconstancy caused by the camera movements are analyzed. An algorithm for measuring distance to the tracking object using a single camera is developed. The algorithm is based on comparison of two frames taken from different altitudes, and it is a modification of the method of stereoscopic vision when the camera is hard mounted on the quadrocopter. For multiple targets in a frame, a method to measure distances to the targets is proposed. The method applicability does not depend on the targets position in the frame and therefore may be used for safe passing over obstacles along the route. Combined application of the above algorithms is reported to allow obtaining of the full set of parameters describing target position and movement, the parameters may serve as a base for creation of control commands for flying robot necessary to implement a valuable system of tracking moving objects with the use of unmanned aerial vehicles

Keywords: quadrocopter, trajectory control, UAV, tracking, moving object, Vision Systems.

Data on authors

- Bui Van Shon** — Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: bui.son1412@gmail.com
- Alexander B. Bushuev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: bushuev@inbox.ru
- Grigory M. Shmigelsky** — Student; ITMO University, ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: gri6ka16@gmail.com
- Yury V. Litvinov** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: yurl13@yandex.ru

Egor G. Shchaev

— Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: egor-94@bk.ru

Reference for citation: *Bui Van Shon, Bushuev A. B., Shmigelsky G. M., Litvinov Yu. V., Shchaev E. G.* Algorithms for controlling a flying robot when the robot is tracking a moving object // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 8. P. 593—599 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-593-599

ПОВЕДЕНИЕ АГЕНТА, ЗАДАННОЕ ЛОГИСТИЧЕСКИМ ОТОБРАЖЕНИЕМ

А. Б. БУШУЕВ¹, В. С. ВОРОБЬЕВ¹, С. П. ТОМАШЕВИЧ¹,
О. К. МАНСУРОВА², А. А. КУЛЬЧИЦКИЙ²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bushuev@inbox.ru

²Национальный минерально-сырьевой университет „Горный“, 197101, Санкт-Петербург, Россия

Рассматривается поисковый алгоритм в системе трехмерного пространственного слежения, основанный на биологических подходах. В качестве системы слежения выступает поисковый агент в поле некоторой пространственной функции. Задача агента — нахождение области экстремума этой функции. Поведение агента задается логистическим отображением. Проводится моделирование поведения поискового агента, действующего согласно предложенному алгоритму поиска. Для оценки качества движения агента используется норма вектора координат отклонения агента от объекта поиска.

Ключевые слова: случайный поиск, пространство, интеллектуальный агент, гомеостат, логистическое отображение.

Введение. Поиск в плоскости. Известны различные алгоритмы пространственного поиска, применяемые в технических системах [1—4], характеризующиеся четкими правилами выбора действий, планированием и построением модели поиска. Недостатком таких алгоритмов является необходимость анализа больших объемов информации об объекте и окружающей среде. Для устранения этого недостатка в технических системах используются так называемые „природные вычисления“ [5, 6] — алгоритмы, основанные на функционировании биологических систем. Такие технические системы относятся к интеллектуальным, они способны, подобно живым организмам, принимать решения о собственном поведении в условиях неопределенности и неполноты информации, основываясь на отказе от планирования и моделирования в пользу простых правил поведения [7, 8].

В настоящей работе рассматриваются действия интеллектуальных агентов в режиме поиска. Пошаговый алгоритм поиска воспроизводится динамической моделью простейших биологических систем. Для описания систем используется логистическое отображение. Двумерная модель поиска на плоскости описана в работе [9]:

$$\left. \begin{aligned} R(i+1) &= \lambda_R(i)R(i)[1-R(i)], \\ L(i+1) &= \lambda_L(i)L(i)[1-L(i)], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

координаты R и L моделируют намерение о выполнении поворота агента вправо и влево на i -м шаге. Система (1) включает уравнения развития популяций [10, 11]. Здесь произведения координат в правых частях определяют воспроизводство новых намерений о выполнении поворотов вправо или влево, а координаты в первой степени задают отмену предыдущих намерений, коэффициенты λ в системе (1) обозначают шумы, описывающие случайный характер поиска, а также перекрестные связи между каналами, и управляющие воздействия, которые зависят от функции поиска $S=S(i)$.

Функция поиска задает свойства искомого агентом объекта. По аналогии с биологическими системами, в которых ищется источник запаха — пища, будем называть эту функцию функцией запаха. Эта функция принимает максимальное значение для места расположения искомого объекта.

Система уравнений (1) описывает так называемый компенсационный гомеостат [12, 13], в котором реализуется закон единства и борьбы противоположных намерений о выполнении поворотов агента вправо и влево. В силу случайного характера поиска гомеостат обладает избыточностью движений, что свойственно биологическим системам.

Трехмерный поиск. Будем считать, что гомеостат (1) задает движение агента в горизонтальной плоскости. Для перехода к пространственному поиску введем систему уравнений, задающую движение агента в вертикальной плоскости. Тогда поисковая модель будет иметь две пары логистических отображений, вырабатывающих намерения о выполнении поворотов в вертикальной (поворот вверх U и вниз D) и горизонтальной (вправо R и влево L) плоскостях:

$$\left. \begin{aligned} R(i+1) &= \lambda_R(i)R(i)[1-R(i)], \\ L(i+1) &= \lambda_L(i)L(i)[1-L(i)], \\ U(i+1) &= \lambda_U(i)U(i)[1-U(i)], \\ D(i+1) &= \lambda_D(i)D(i)[1-D(i)]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Чтобы система (2) была устойчивой, вводятся ограничения [14] $\lambda_R, \lambda_L, \lambda_U, \lambda_D \in [0, 1]$; параметры $\lambda_R, \lambda_L, \lambda_U, \lambda_D$ определяются следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_R(i) &= \mu + \sigma \xi_R(i) - L(i) + KdS(i), \\ \lambda_L(i) &= \mu + \sigma \xi_L(i) - R(i) + KdS(i), \\ \lambda_U(i) &= \mu + \sigma \xi_U(i) - D(i) + KdS(i), \\ \lambda_D(i) &= \mu + \sigma \xi_D(i) - U(i) + KdS(i), \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где μ — константа; $\xi_R, \xi_L, \xi_U, \xi_D$ — белые шумы, ранжированные в области $[-1; 1]$; σ — амплитуда шума; K — коэффициенты влияния приращения функции запаха; $dS(i)$ — относительное приращение функции запаха на последующей итерации:

$$dS(i) = \frac{S(i) - S(i-1)}{S(i)}. \quad (4)$$

Результирующие углы поворотов в вертикальной θ и горизонтальной плоскостях φ определяются соответствующими намерениями

$$\left. \begin{aligned} \theta(i+1) &= \theta(i) + [U(i) - D(i)], \\ \varphi(i+1) &= \varphi(i) + [L(i) - R(i)]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Система (5) представляет собой компенсационный гомеостат, антагонистами в котором являются повороты агента в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Для определения движения агента в трехмерном пространстве с координатами x, y, z необходимо в уравнения (5) ввести перекрестные связи. Для этого построим проекцию вектора положения агента в трехмерном пространстве на оси x, y, z с помощью синусов и косинусов углов поворота в горизонтальной и вертикальной плоскостях

$$\left. \begin{aligned} x(i) &= r \sin \theta(i) \cos \varphi(i), \\ y(i) &= r \sin \theta(i) \sin \varphi(i), \\ z(i) &= r \cos \theta(i), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где r — длина шага поискового агента в каждой итерации.

Функция запаха вводится в трехмерном пространстве $S = S(x, y, z)$. Фактически она является выигрышем в двойной гомеостатической игре, которая впервые рассматривалась Ю. М. Горским [15]. Цель игры — нахождение экстремума $S = S(x, y, z)$. Ходами двусторонней игры во внутренних гомеостатах для горизонтальной плоскости являются, с одной стороны,

повороты агента влево, с другой — повороты вправо, для вертикальной плоскости ходами, с одной стороны, являются повороты агента вверх, с другой — повороты вниз.

Результаты моделирования. Для моделирования использовались следующие параметры: $\sigma = 2,8$; $K = 20$; $\mu = 1,5$; $L_0 = 0,2$; $R_0 = 0,5$; $U_0 = 0,1$; $D_0 = 0,6$; $\varphi_0 = 0,3$; $\theta_0 = 0,7$. Тем самым задаются начальные углы и результирующие тенденции. Пространственный шаг $r = 0,005$ мм, а начальное положение: $(x_0, y_0, z_0) = (-10, 20, 10)$. Функция запаха задается следующим образом:

$$S(x, y, z) = \exp(-x^2 - y^2 - z^2). \quad (7)$$

Очевидно, что в таком случае функция запаха имеет максимум в точке $(0, 0, 0)$.

Результат моделирования движения агента в трехмерном пространстве представлен на рис. 1.

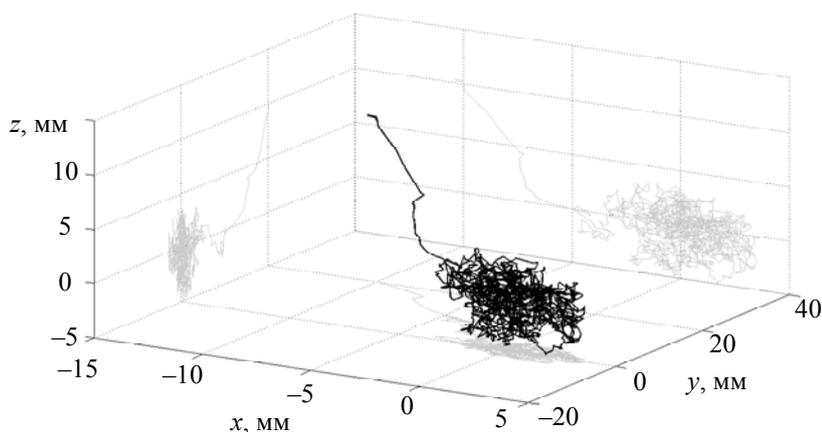


Рис. 1

Как видно, агент начинает движение из точки с заданными координатами и движется в направлении начала координат. Несмотря на то что изначально движения были направлены не к началу координат (x_0, y_0, z_0) , система выходит на почти детерминированную траекторию, иногда изменяя направление вследствие шума. При достижении начала координат агент вращается около максимума функции запаха, „проскакивая“ положение максимума и к нему возвращаясь. Устойчивая область установившегося движения составляет „сферу“ радиусом 5 мм.

На рис. 2 представлен график изменения управляющего воздействия, т.е. величины KdS .

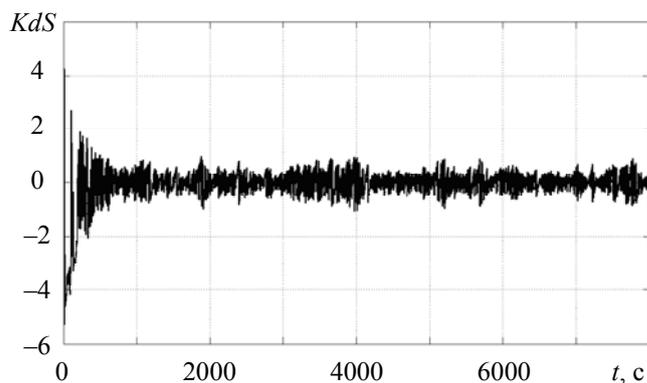


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что сначала наблюдается активная фаза, на которой приращение управления KdS велико, агент быстро движется к максимуму функции запаха. После попадания в область установившегося движения диапазон значений, имеющих разные знаки, KdS ограничен.

Рассмотрим движения при изменении коэффициента в диапазоне $K = 0—150$. Для оценки будем использовать среднее значение нормы $\|\mathbf{r}\| = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$ вектора положения агента. Чем значение $\|\mathbf{r}\|$ меньше, тем быстрее или ближе к максимуму движется агент. Результат моделирования представлен на рис. 3.

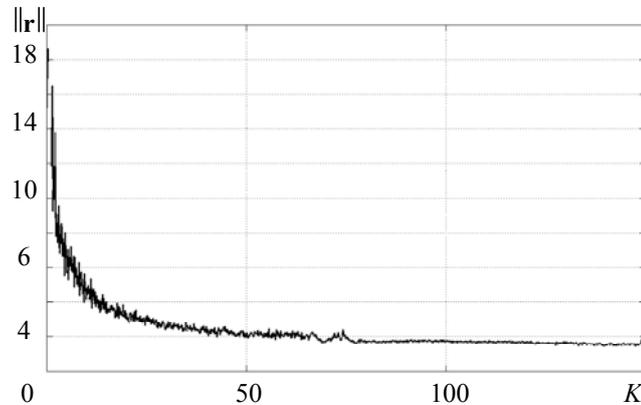


Рис. 3

Из рис. 3 видно, что наибольшая область сходимости (наихудшая характеристика) при $K = 0$, когда нет обратной связи и агент управляется только шумом. При увеличении K качество процесса улучшается, однако повышение коэффициента обратной связи в два или три раза (от 50 до 100 или 150) не дает существенного улучшения. Таким образом, использование большого усиления шума бесполезно, а в технических системах и сложно реализуемо.

Заключение. Предложенный алгоритм может быть использован в системах управления легкими беспилотными летательными аппаратами (БПЛА). Общность моделей, описывающих пространственное движение БПЛА, и биологических систем заключается в разделении движений на продольное и поперечное и управлении углами тангажа и рысканья. Детерминированная траектория движения центра масс БПЛА определяется биологическими уравнениями развития популяций в ареале, заданном целевой функцией.

Случайный характер поиска задается шумовым сигналом, накладываемым на детерминированную составляющую. Существует некоторое оптимальное отношение сигнал/шум, которое определяется выбором коэффициентов обратной связи в законе управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jianhua Lu, Ming L., Lion A. Simple and efficient search algorithm for block-matching motion estimation // IEEE Transact. on circuits and systems for video technology. 1997. Vol. 7, N 2. P. 429—433.
2. Каладзе В. А. Адаптация случайного поиска методом направляющего конуса // Вестн. ВГТУ. 2012. Т. 8, № 1. С. 31—37.
3. Горбунов Ю. Н., Лобанов Б. С., Куликов Г. В. Введение в стохастическую радиолокацию. М.: Горячая линия-Телеком, 2015. 376 с.
4. Жиглявский А. А., Жилинская А. Г. Методы поиска глобального экстремума. М.: Наука, 1991. 248 с.
5. Редько В. Г. Эволюционная кибернетика // Кибернетика: неограниченные возможности и возможные ограничения. М.: Наука, 2001. 156 с.
6. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. 2003. № 4. С. 70—75.
7. Непомнящих В. А. Модели автономного поискового поведения // От моделей поведения к искусственному интеллекту / Под общ. ред. В. Г. Редько. М.: УРСС, 2006. С. 200—242.
8. Непомнящих В. А. Как животные решают плохо формализуемые задачи поиска // Синергетика и психология. Вып. 3. Когнитивные процессы. М.: Когито-Центр, 2004. С. 197—209.

9. *Непомнящих В. А., Подгорный К. А.* Порождение правил поискового поведения динамической системой // IV Всерос. науч.-техн. конф. „Нейроинформатика—2002“. Ч. 1. М.: Изд-во МИФИ, 2012. С. 110—116.
10. *Марри Дж.* Нелинейные дифференциальные уравнения в биологии. Лекции о моделях. М.: Мир, 1983. 400 с.
11. *Бушувев А. Б.* Применение методов технического творчества в инновационной деятельности. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. С. 49—60.
12. *Горский Ю. М.* Основы гомеостатики. Гармония и дисгармония живых, природных, социальных и искусственных систем. Иркутск: Изд-во ИГЭА, 1998. 337 с.
13. *Бушувев А. Б.* Математическое моделирование процессов технического творчества. СПб: СПбГУ ИТМО, 2010. 181с.
14. *May R. M.* Simple mathematical models with very complicated dynamics // *Nature*. 1976. Vol. 261. P. 459—467.
15. *Горский Ю. М.* Системно-информационный анализ процессов управления. Новосибирск: Наука, 1988. 327 с.

Сведения об авторах

- | | |
|---|--|
| <i>Александр Борисович Бушувев</i> | — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: bushuev@inbox.ru |
| <i>Владимир Сергеевич Воробьев</i> | — магистрант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: vladimir.s.vorobev@gmail.com |
| <i>Станислав Игоревич Томашевич</i> | — магистрант; Университет ИТМО, кафедра систем управления и информатики; E-mail: tomashevich.stanislav@gmail.com |
| <i>Ольга Карибековна Мансурова</i> | — канд. техн. наук, доцент; Национальный минерально-сырьевой университет „Горный“, кафедра автоматизации технологических процессов и производств |
| <i>Александр Александрович Кульчицкий</i> | — канд. техн. наук, доцент; Национальный минерально-сырьевой университет „Горный“, кафедра автоматизации технологических процессов и производств |

Рекомендована кафедрой
систем управления и информатики

Поступила в редакцию
10.04.15 г.

Ссылка для цитирования: Бушувев А. Б., Воробьев В. С., Томашевич С. П., Мансурова О. К., Кульчицкий А. А. Поведение агента, заданное логистическим отображением // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 600—605.

AGENT BEHAVIOR DEFINED BY LOGISTIC MAPPING

**A. B. Bushuev¹, V. S. Vorobiev¹, S. I. Tomashevich¹,
O. K. Mansurova², A. A. Kulchitsky²**

¹*ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: bushuev@inbox.ru*

²*National Mineral Resource University, 197101, Saint Petersburg, Russia*

A search algorithm based on biological approach in 3D space system is considered. A search agent in the field of a spatial function serves as the tracing system. The agent purpose is to determine the function extremum domain, and the agent behavior is defined by logistics mapping. The system represents search model in three-dimensional space. Modeling of the agent behavior operating in accordance with a proposed algorithm is carried out. The agent movement quality is characterized by the norm of coordinate vector of deviation of the agent from the search object.

Keywords: random search, space, intellectual agent, homeostat, logistic mapping.

Data on authors

- | | |
|---------------------------------|---|
| Alexander B. Bushuev | — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: bushuev@inbox.ru |
| Vladimir S. Vorobiev | — Graduate Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: vladimir.s.vorobev@gmail.com |
| Stanislav I. Tomashevich | — Graduate Student; ITMO University, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: tomashevich.stanislav@gmail.com |
| Olga K. Mansurova | — PhD, Associate Professor; National Mineral Resource University, Department of Technological Process Automation and Production |

Alexander A. Kulchitsky — PhD, Associate Professor; National Mineral Resource University,
Department of Technological Process Automation and Production

Reference for citation: *Bushuev A. B., Vorobiev V. S., Tomashevich S. I., Mansurova O. K., Kulchitsky A. A.* Agent behavior defined by logistic mapping // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie.* 2015. Vol. 58, N 8. P. 600—605 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-600-605

ЦИФРОВОЙ СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НА ОСНОВЕ ЗНАКОВОГО ОЦЕНИВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ И КОСИНУС-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КОРРЕЛЯЦИОННОГО ОКНА

В. Н. ЯКИМОВ, А. В. МАШКОВ

*Самарский государственный технический университет, 443100, Самара, Россия
E-mail: yvnr@hotmail.com*

Рассматривается задача снижения вычислительных затрат на численное оценивание спектральной плотности мощности случайного процесса коррелограммным методом с применением корреляционных окон. Задача решается с использованием в качестве первичного преобразования исследуемого случайного процесса знакового аналого-стохастического квантования. Вычисление оценок корреляционной функции по знаковым сигналам и дискретно-временное представление этих сигналов позволило выполнить аналитические вычисления интегрального косинус-преобразования функции корреляционного окна при разработке алгоритма спектрального оценивания. В качестве примера рассмотрены корреляционные окна Бартлетта, Хана, Хэмминга, Блэкмана и Наттолла. Разработанный алгоритм вычисления оценок спектральной плотности мощности не требует предварительного прямого оценивания корреляционной функции, в нем используются логические операции и простые арифметические операции суммирования и вычитания, это снижает трудоемкость получения численной оценки спектральной плотности мощности.

Ключевые слова: *спектральная плотность мощности, случайный процесс, аналого-стохастическое квантование, корреляционное окно, знаковый сигнал, отсчет времени.*

Введение и постановка задачи. Решение широкого круга прикладных задач связано со статистическим анализом непрерывных во времени случайных процессов (СП). При этом во многих случаях необходимо проводить спектральный анализ, характеризующий распределение средней мощности СП в некоторой заданной полосе частот.

Одним из основных классических методов спектрального анализа СП является коррелограммное оценивание спектральной плотности мощности (СПМ) [1—3]. Согласно этому методу для получения приемлемой оценки СПМ следует применять временные корреляционные окна. С учетом корреляционного окна и свойства четности корреляционной функции (КФ) непрерывная коррелограммная оценка СПМ имеет вид

$$\hat{S}_{XX}(f) = 2 \int_0^T w(\tau) \hat{R}_{XX}(\tau) \cos 2\pi f \tau d\tau, \quad (1)$$

где $\hat{R}_{XX}(\tau)$ — оценка КФ исследуемого СП $X(t)$; $w(\tau)$ — функция корреляционного окна; T — интервал времени, в пределах которого осуществляется процедура спектрального оценивания.

В настоящее время широкое распространение получил численный подход к реализации коррелограммного метода оценивания СПМ. При этом переход к алгоритму осуществляется дискретизацией непрерывной коррелограммной оценки СПМ с интервалом дискретизации Δt и заменой интеграла соответствующей ему суммой. При выполнении такого алгоритма на практике [1] первоначально выполняется классическая процедура аналого-цифрового преобразования и формируется последовательность цифровых отсчетов СП. По этим отсчетам вычисляется конечная последовательность дискретных значений оценки КФ, по которым затем

с учетом результатов взвешивания с отсчетами корреляционного окна оценивается СПМ. Такая процедура спектрального оценивания требует выполнения многочисленных операций цифрового умножения, что приводит к существенным временным затратам.

Знаковое аналого-стохастическое квантование как методическая основа решения поставленной задачи. Снизить временные затраты в ходе проведения численного спектрального анализа можно, если в качестве первичного преобразования СП использовать знаковое аналого-стохастическое квантование, позволяющее осуществлять предельно грубое двухуровневое квантование СП без внесения систематической погрешности [4—6].

Общая идея использования знакового аналого-стохастического квантования основана на возможности осуществления косвенного оценивания КФ исследуемого СП $X(t)$ по знаковым сигналам, формируемым в ходе выполнения двух независимых процедур такого квантования. Эти сигналы могут быть представлены следующим образом:

$$z_1(t) = \operatorname{sgn} \left\{ \overset{o}{x}(t) + \xi_1(t) \right\} \text{ и } z_2(t) = \operatorname{sgn} \left\{ \overset{o}{x}(t) + \xi_2(t) \right\}, \quad (2)$$

оператор $\operatorname{sgn}\{\dots\}$ определяет процедуру знакового преобразования; $\overset{o}{x}(t)$ — центрированная (т.е. имеющая нулевое математическое ожидание) реализация СП $X(t)$; $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$ — вспомогательные случайные сигналы, которые выполняют функцию стохастического порога квантования.

Вспомогательные сигналы $\xi_1(t)$ и $\xi_2(t)$ являются однородными. Они независимы относительно друг друга и относительно исследуемого СП $X(t)$. Мгновенные значения этих сигналов распределены равномерно внутри интервала от $-\xi_{\max}$ до $+\xi_{\max}$. При этом должно выполняться условие $|\overset{o}{x}(t)|_{\max} \leq \xi_{\max}$, где $|\overset{o}{x}(t)|_{\max}$ — абсолютное максимальное значение, которое может принять реализация $\overset{o}{x}(t)$ СП $X(t)$.

По своей сути добавление равномерно распределенного независимого сигнала к непрерывному СП и дискретизация представляют собой две статистически эквивалентные операции [4].

Важно, что применение вспомогательных случайных сигналов позволяет анализировать СП, когда их закон распределения вероятностей произволен и заранее не известен [5].

КФ исследуемого СП $X(t)$ и взаимная КФ знаковых сигналов $z_1(t)$ и $z_2(t)$ связаны соотношением

$$R_{Z_1 Z_2}(\tau) = M[z_1(t)z_2(t+\tau)] = \xi_{\max}^{-2} R_{XX}(\tau), \quad (3)$$

где $M[\dots]$ — оператор математического ожидания.

Разработка цифрового алгоритма оценивания СПМ. Пусть сигналы $z_1(t)$ и $z_2(t)$ сформированы соответственно в пределах интервалов времени $0 \leq t \leq T$ и $0 \leq t \leq 2T$. Тогда, принимая во внимание соотношение (3), в качестве оценки $\hat{R}_{XX}(\tau)$ для $0 \leq \tau \leq T$ возьмем несмещенную оценку следующего вида [7—11]:

$$\hat{R}_{XX}(\tau) = \xi_{\max}^2 T^{-1} \int_0^T z_1(t)z_2(t+\tau)dt. \quad (4)$$

Подставим $\hat{R}_{XX}(\tau)$ в выражение для $\hat{S}_{XX}(f)$. При этом предварительно введем обозначение

$$g(\tau, f) = w(\tau) \cos 2\pi f\tau, \quad (5)$$

тогда

$$\hat{S}_{XX}(f) = 2\xi_{\max}^2 T^{-1} \int_0^T z_1(t) \int_0^T g(\tau, f) z_2(t+\tau) d\tau dt. \quad (6)$$

В результате знакового аналого-стохастического квантования получается непрерывный во времени сигнал, ограниченный по уровню двумя возможными значениями „-1“ и „+1“, которые последовательно сменяют друг друга [6]. Поэтому динамику изменения сигналов $z_1(t)$ и $z_2(t)$ можно однозначно описать с помощью соответствующих им значений в начальный момент времени квантования $t_0 = 0$ и множеств отсчетов моментов времени, в которые они пересекает нулевой уровень. В соответствии с этим для сигналов получим отсчеты $z_1(t_0)$ и $z_2(t_0)$ и два множества отсчетов времени $\{t_i^{z_1}\}$ и $\{t_i^{z_2}\}$, где $1 \leq i < I$ и $1 \leq j < J$. При этом $t_0^{z_1} = t_0^{z_2} = t_0 = 0$, $t_I^{z_1} = T$, $t_J^{z_2} = 2T$.

Поскольку сигнал $z_1(t)$ остается постоянным в пределах интервалов времени $t_i^{z_1} \leq t \leq t_{i+1}^{z_1}$ и может принимать лишь одно из возможных значений („-1“ или „+1“), интеграл по переменной t в выражении (6) можно представить в виде суммы интегралов. В соответствии с этим получим

$$\hat{S}_{XX}(f) = 2\xi_{\max}^2 T^{-1} z_1(t_0) \sum_{i=0}^{I-1} (-1)^i \int_{t_i^{z_1}}^{t_{i+1}^{z_1}} \int_t^{t+T} z_2(\tau) g(\tau-t, f) d\tau dt. \quad (7)$$

Изменим порядок интегрирования по переменным τ и t , в этом случае

$$\hat{S}_{XX}(f) = 2\xi_{\max}^2 T^{-1} z_1(t_0) \sum_{i=0}^{I-1} (-1)^i \times \left\{ \int_{t_i^{z_1}}^{t_{i+1}^{z_1}} z_2(\tau) \int_0^{\tau-t_i^{z_1}} g(t, f) dt d\tau + \int_{t_{i+1}^{z_1}}^{t_i^{z_1}+T} z_2(\tau) \int_{\tau-t_{i+1}^{z_1}}^{\tau-t_i^{z_1}} g(t, f) dt d\tau + \int_{t_i^{z_1}+T}^{t_{i+1}^{z_1}+T} z_2(\tau) \int_{\tau-t_{i+1}^{z_1}}^T g(t, f) dt d\tau \right\}. \quad (8)$$

Функция $g(t, f)$ является детерминированной, ее вид определяется функцией корреляционного окна $w(\tau)$. Допустим, что существует такая непрерывная во времени функция $Q(t, f)$, для которой выполняется условие дифференцируемости в пределах $0 \leq t \leq T$ (т.е. она имеет производную в любой точке этого интервала), и при этом выполняется равенство

$$dQ(t, f) = g(t, f) dt. \quad (9)$$

По существу $Q(t, f)$ является результатом интегрального косинус-преобразования функции корреляционного окна $w(\tau)$

$$\int g(t, f) dt = \int w(t) \cos 2\pi f t dt = \int dQ(t, f) = Q(t, f). \quad (10)$$

Тогда интегралы в соотношении (8) по переменной t можно вычислить аналитически:

$$\int_0^{\tau-t_i^{z_1}} g(t, f) dt = \int_0^{\tau-t_i^{z_1}} dQ(t, f) = Q(\tau-t_i^{z_1}, f) - Q(0, f), \quad (11)$$

$$\int_{\tau-t_{i+1}^{z_1}}^{\tau-t_i^{z_1}} g(t, f) dt = \int_{\tau-t_{i+1}^{z_1}}^{\tau-t_i^{z_1}} dQ(t, f) = Q(\tau-t_i^{z_1}, f) - Q(\tau-t_{i+1}^{z_1}, f), \quad (12)$$

$$\int_{\tau-t_{i+1}^{\bar{z}_1}}^T g(t, f) dt = \int_{\tau-t_{i+1}^{\bar{z}_1}}^T dQ(t, f) = Q(T, f) - Q(\tau-t_{i+1}^{\bar{z}_1}, f). \quad (13)$$

После подстановки значений этих интегралов в (8) и приведения подобных слагаемых оценка $\hat{S}_{XX}(f)$ примет вид

$$\hat{S}_{XX}(f) = 2Q(T, f)\hat{R}_{XX}(T) - 2Q(0, f)\hat{R}_{XX}(0) + 2\xi_{\max}^2 T^{-1} z_1(t_0) \sum_{i=0}^I (-1)^i \lambda_i W_i(t_i^{\bar{z}_1}, f). \quad (14)$$

В соотношении (14) приняты следующие обозначения:

$$\hat{R}_{XX}(0) = \xi_{\max}^2 T^{-1} z_1(t_0) \sum_{i=0}^{I-1} (-1)^i \int_{t_i^{\bar{z}_1}}^{t_{i+1}^{\bar{z}_1}} z_2(\tau) d\tau, \quad (15)$$

$$\hat{R}_{XX}(T) = \xi_{\max}^2 T^{-1} z_1(t_0) \sum_{i=0}^{I-1} (-1)^i \int_{t_i^{\bar{z}_1}+T}^{t_{i+1}^{\bar{z}_1}+T} z_2(\tau) d\tau, \quad (16)$$

$$W_i(t_i^{\bar{z}_1}, f) = \int_{t_i^{\bar{z}_1}}^{t_i^{\bar{z}_1}+T} z_2(\tau) Q(\tau-t_i^{\bar{z}_1}, f) d\tau, \quad (17)$$

$$\lambda_i = \begin{cases} 1, & i=0 \text{ и } i=I; \\ 2, & 1 \leq i \leq I-1. \end{cases} \quad (18)$$

Разработка алгоритма оценивания СПМ свелась к разработке алгоритма вычисления $W_i(t_i^{\bar{z}_1}, f)$.

Пусть для знакового сигнала $z_2(t)$ границам интервала $t_i^{\bar{z}_1} \leq t \leq t_i^{\bar{z}_1} + T$ соответствуют моменты времени $t_{m(i)}^{\bar{z}_2} = t_i^{\bar{z}_1}$ и $t_{m(i)+r(i)+1}^{\bar{z}_2} = t_i^{\bar{z}_1} + T$, где $m(i)$ и $r(i)$ являются целыми числами, из их обозначений видна зависимость от номера интервала. В соответствии с этим получим совокупность величин $\{t_{m(i)+1}^{\bar{z}_2}, t_{m(i)+2}^{\bar{z}_2}, \dots, t_{m(i)+r(i)}^{\bar{z}_2}\}$, которые принадлежат множеству $\{t_j^{\bar{z}_2}\}$ и определяют те моменты времени, в которые знаковый сигнал $z_2(t)$ с течением времени пересекает нулевой уровень в интервале $t_i^{\bar{z}_1} \leq t \leq t_i^{\bar{z}_1} + T$.

С учетом множества моментов времени $\{t_{m(i)}^{\bar{z}_2}, t_{m(i)+1}^{\bar{z}_2}, \dots, t_{m(i)+r(i)+1}^{\bar{z}_2}\}$, а также вследствие того, что сигнал $z_2(t)$ принимает значения только „-1“ или „+1“, интеграл в выражении (17) представим в следующем виде:

$$W_i(t_i^{\bar{z}_1}, f) = z_2(t_i^{\bar{z}_1}) \sum_{j=m(i)}^{m(i)+r(i)} (-1)^{j-m(i)} \int_{t_j^{\bar{z}_2}-t_i^{\bar{z}_1}}^{t_{j+1}^{\bar{z}_2}-t_i^{\bar{z}_1}} Q(\tau, f) d\tau. \quad (19)$$

Перейдем к дискретной форме представления функции $Q(\tau, f)$ по переменной τ с интервалом дискретизации $\Delta\tau$. Тогда для $0 \leq \tau \leq T$ будем иметь $(M+1)$ отсчетов $Q(k\Delta\tau, f)$, где $0 \leq k \leq M$ и $T = kM$.

Существуют такие целые числа $n(i, j)$ и $n(i, j+1)$, для которых будут справедливы неравенства

$$(t_j^{\bar{z}_2} - t_i^{\bar{z}_1}) \leq n(i, j)\Delta\tau \leq (t_{j+1}^{\bar{z}_2} - t_i^{\bar{z}_1}) + \Delta\tau, \quad (20)$$

$$(t_{j+1}^{z_2} - t_i^{z_1}) - \Delta\tau \leq n(i, j+1)\Delta\tau \leq (t_{j+1}^{z_2} - t_i^{z_1}), \quad (21)$$

Вследствие этого для любого $k \in [n(i, j); n(i, j+1)]$ будет выполняться условие $(t_j^{z_2} - t_i^{z_1}) \leq k\Delta\tau \leq (t_{j+1}^{z_2} - t_i^{z_1})$. В соответствии с этим условием $W_i(t_i^{z_1}, f)$ можно представить в дискретном виде следующим образом:

$$W_i(t_i^{z_1}, f) = \Delta\tau z_2(t_i^{z_1}) \sum_{j=m(i)}^{m(i)+r(i)} (-1)^{j-m(i)} G_{ji}(f), \quad (22)$$

где

$$G_{ji}(f) = \sum_{k=n(i,j)}^{n(i,j+1)} Q(\Delta\tau k, f). \quad (23)$$

Для практического использования полученного соотношения при вычислении $\hat{S}_{XX}(f)$ необходимо перейти к числовому представлению дискретных отсчетов моментов времени $\{t_i^{z_1}\}$ и $\{t_j^{z_2}\}$. На практике это можно сделать, используя классический подход к цифровому представлению интервалов времени с заданной точностью, согласно которому

$$t_i^{z_1} = \eta_i^{z_1} \Delta t \text{ и } t_j^{z_2} = \eta_j^{z_2} \Delta t, \quad (24)$$

где Δt — период счетных импульсов.

В результате будем иметь два множества целых чисел $\{\eta_i^{z_1}\}$ и $\{\eta_j^{z_2}\}$, где $1 \leq i \leq I-1$ и $1 \leq j \leq J-1$. При этом $\eta_0 = \eta_0^{z_1} = \eta_0^{z_2} = 0$, время анализа $T = N\Delta t$. Отсюда следует, что $\eta_I^{z_1} = N$ и $\eta_J^{z_2} = 2N$.

Будем вычислять значения оценок СПМ $\hat{S}_{XX}(f)$ на дискретных частотах $f_n = n\Delta f$, где $\Delta f = T^{-1}$ соответствует предельному разрешению по частоте.

В результате получаем

$$\hat{S}_{XX}(f_n) = 2Q(N, f_n) \hat{R}_{XX}(N) - 2Q(0, f_n) \hat{R}_{XX}(0) + 2\xi_{\max}^2 \Delta f z_1(\eta_0) \sum_{i=0}^I (-1)^i \lambda_i W_i(\eta_i^{z_1}, f_n), \quad (25)$$

$$W_i(t_i^{z_1}, f) = \Delta\tau z_2(\eta_i^{z_1}) \sum_{j=m(i)}^{m(i)+r(i)} (-1)^{j-m(i)} G_{ji}(f_n), \quad (26)$$

$$G_{ji}(f_n) = \sum_{k=n(i,j)}^{n(i,j+1)} Q(\Delta\tau k, f_n). \quad (27)$$

В качестве примера в табл. 1 для некоторых наиболее известных корреляционных окон [12—16] представлены функции $Q(\tau, f)$, а также их значения $Q(0, f_n)$ и $Q(N, f_n)$. Корреляционные окна Хана, Хэмминга, Блэкмана и Наттолла являются частными случаями одной временной функции. В табл. 2 для определенности приведены значения коэффициентов a_k для этих окон.

Из полученного соотношения для вычисления $\hat{S}_{XX}(f_n)$ следует, что необходимо иметь два значения оценки КФ $\hat{R}_{XX}(0)$ и $\hat{R}_{XX}(N)$, которые можно вычислить по отсчетам $\{\eta_i^{z_1}\}$ и $\{\eta_j^{z_2}\}$ с использованием простого и эффективного в вычислительном отношении цифрового алгоритма, разработанного в статье [7]. Отметим, что необходимость расчета оценок $\hat{R}_{XX}(0)$

и $\hat{R}_{XX}(N)$ зависит от конкретного вида используемой функции корреляционного окна. Например, для естественного окна и окон Хана, Хэмминга, Блэкмана и Наттолла в этом нет необходимости, так как $Q(0, f_n) = 0$ и $Q(N, f_n) = 0$, следовательно, $Q(0, f_n)\hat{R}_{XX}(0) = 0$ и $Q(N, f_n)\hat{R}_{XX}(N) = 0$.

Таблица 1

Окно	$w(\tau)$	$Q(\tau, f)$	$Q(0, f_n)$	$Q(N, f_n)$
Естественное	$\begin{cases} 1, & \tau \leq T; \\ 0, & \tau > T \end{cases}$	$\frac{\sin 2\pi f \tau}{2\pi f}$	0	0
Бартлетта (треугольное)	$\begin{cases} 1 - \frac{ \tau }{T}, & \tau \leq T; \\ 0, & \tau > T \end{cases}$	$\left(1 - \frac{\tau}{T}\right) \frac{\sin 2\pi f \tau}{2\pi f} - \frac{1}{T} \frac{\cos 2\pi f \tau}{(2\pi f)^2}$	$-\frac{N\Delta t}{(2\pi n)^2}$	$-\frac{N\Delta t}{(2\pi n)^2}$
Хана	$\begin{cases} a_0 + \sum_{k=1}^K a_k \cos \frac{k\pi\tau}{T}, & \tau \leq T; \\ 0, & \tau > T \end{cases}$	$\frac{1}{2\pi} \sum_{k=0}^K a_k \left(\frac{\sin \alpha \tau}{\alpha} + \frac{\sin \beta \tau}{\beta} \right),$ $\alpha = (2f - k\Delta f),$ $\beta = (2f + k\Delta f)$	0	0
Хэмминга				
Блэкмана				
Наттолла				

Таблица 2

Окно	K	a_0	a_1	a_2	a_3
Хана	1	0,5	0,5	—	—
Хэмминга	1	0,54	0,46	—	—
Блэкмана	2	0,42	0,5	0,08	—
Наттолла	3	0,36335819	0,4891775	0,1365995	0,0106411

Заключение. Благодаря использованию подхода к формированию оценки корреляционной функции на основе обработки знаковых сигналов, полученных в результате знакового аналого-стохастического квантования, операция интегрирования при переходе от непрерывной коррелограммной оценки СПМ к алгоритму вычислена аналитически, что исключает появление методической погрешности. Кроме того, операции умножения вырождаются в процедуры, которые требуют выполнения логических операций и простых арифметических операций суммирования и вычитания дискретных значений $G_{ji}(f_n)$, что снижает трудоемкость оценивания СПМ.

Работа поддержана грантом РФФИ (проект № 13-08-00036-А).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марпл-мл. С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. М.: Мир, 1990. 584 с.
2. Kay S. M. Modern spectral estimation: Theory and application. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall Inc., 1988. 543 p.
3. Денисенко А. Н. Сигналы. Теоретическая радиотехника. Справочное пособие. М.: Горячая линия-Телеком, 2005. 704 с.
4. Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. Т. 1. М.: Мир, 1983. 312 с.

5. Мирский Г. Я. Характеристики стохастической взаимосвязи и их измерения. М.: Энергоиздат, 1982. 320 с.
6. Якимов В. Н. Обобщенная математическая модель двухуровневого знакового преобразования // Техника машиностроения. 2000. № 4. С. 72—74.
7. Якимов В. Н. Цифровой корреляционный анализ на основе интервального представления результата знакового преобразования случайных процессов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 11. С. 61—66.
8. Якимов В. Н. Структурное проектирование цифровых коррелометров для оперативного корреляционного анализа на основе знакового аналого-стохастического квантования // Измерительная техника. 2007. № 4. С. 6—11.
9. Yakimov V. N. The structural design of digital correlometers for operational correlation analysis based on sign-function analog-stochastic quantization // Measurement Techniques. NY: Springer, 2007. Vol. 50, N 4. P. 356—363.
10. Якимов В. Н. Цифровой спектральный анализ на основе знакового двухуровневого преобразования непрерывных случайных процессов и асимптотически несмещенной оценки корреляционной функции // Измерительная техника. 2005. № 12. С. 18—23.
11. Yakimov V. N. Digital spectral analysis based on sign two-level transformation of continuous random processes and asymptotically unbiased estimation of the correlation function // Measurement Techniques. NY: Springer, 2005. Vol. 48, N 12. P. 1171—1178.
12. Дворкович В. П., Дворкович А. В. Оконные функции для гармонического анализа сигналов. М.: Техносфера, 2014. 112 с.
13. Шахтарин Б. И., Ковригин В. А. Методы спектрального оценивания случайных сигналов. М.: Гелиос АРВ, 2005. 248 с.
14. Prabhu K. M. M. Window functions and their applications in signal processing. CRC Press, 2013. 382 p.
15. Harris F. J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform // IEEE Proc. 1978. Vol. 66. P. 51—83.
16. Nuttall A. H. Some windows with very good side lobe behavior // IEEE Transact. on acoustic, speech, and signal processing. 1981. Vol. ASSP-29. P. 84—91.

Сведения об авторах

- Владимир Николаевич Якимов** — д-р техн. наук, профессор; Самарский государственный технический университет, кафедра информационных технологий;
E-mail: yvnr@hotmail.com
- Андрей Валерьевич Машков** — Самарский государственный технический университет, кафедра информационных технологий; преподаватель; E-mail: mavstu@list.ru

Рекомендована кафедрой
информационных технологий

Поступила в редакцию
06.05.15 г.

Ссылка для цитирования: Якимов В. Н., Машков А. В. Цифровой спектральный анализ на основе знакового оценивания корреляционной функции и косинус-преобразования корреляционного окна // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 606—613.

DIGITAL SPECTRAL ANALYSIS BASED ON THE SIGN APPROACH TO CORRELATION FUNCTION ESTIMATION AND THE INTEGRAL COSINE TRANSFORMATION OF CORRELATION WINDOW

V. N. Yakimov, A. V. Mashkov

Samara State Technical University, 443100, Samara, Russia
E-mail: yvnr@hotmail.com

The problem of reduction of computing expenses for digital estimation of power spectral density of a random process with correlogram method using correlation windows is considered. A solution to the problem is obtained with the use of a sign-analog stochastic quantization as a primary transformation of the random process under investigation. Estimates of the correlation function calculated from the sign-function signals and discrete-time representation of these signals make it possible to carry out an analytical calculation of the integral cosine transformation of correlation window function when spectral estima-

tion algorithm is designed. The well-known window functions by Bartlett, Hann, Hamming, Blackman, and Nuttall are considered as examples. The developed algorithm for spectral power density estimating does not require direct calculation of the correlation function estimates to be carried out preliminary. The algorithm uses logical operations and simple arithmetic operations of addition and subtraction, and therefore reduces the complexity of digital estimation of power spectral density.

Keywords: power spectral density, random process, stochastic quantization, correlation window, sign-function signal, time readout.

Data on authors

- Vladimir N. Yakimov** — Dr. Sci., Professor; Samara State Technical University, Department of Information Technologies; E-mail: yvnr@hotmail.com
- Andrey V. Mashkov** — Samara State Technical University, Department of Information Technologies; Lecturer; E-mail: mavstu@list.ru

Reference for citation: *Yakimov V. N., Mashkov A. V.* Digital spectral analysis based on the sign approach to correlation function estimation and the integral cosine transformation of correlation window // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 8. P. 606—613 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-606-613

МУЛЬТИАГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ЭВАКУАЦИИ ПАССАЖИРОВ АВАРИЙНОГО СУДНА В ШТОРМОВЫХ УСЛОВИЯХ

М. А. БАЛАХОНЦЕВА, А. В. БУХАНОВСКИЙ

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: avb_mail@mail.ru

Эвакуация пассажиров на аварийном судне зависит от множества факторов, включая характеристики окружающей среды и психологические аспекты поведения человека в экстремальных ситуациях. Разработана и реализована мультиагентная модель, которая учитывает влияние на процесс эвакуации таких факторов, как ветер, волнение и динамика судна. Предложен подход к моделированию процесса эвакуации пассажиров в штормовых условиях, основанный на силовой модели передвижения агентов, учитывающей влияние перемещений, скорости и ускорения качки. Полученные результаты позволяют оценить время эвакуации в зависимости от условий штормования (интенсивность волнения, скорость хода, курсовой угол). Представленная мультиагентная система может быть развита в части моделей, связанных с развитием затопления судна, а также с распространением пожара, задымлением, т.е. внутренними источниками аварийных ситуаций.

Ключевые слова: *эвакуация, имитационное моделирование, мультиагентные модели, динамика судна, аварийная остойчивость.*

Эксплуатация судов и объектов океанотехники происходит в агрессивной морской среде, что в ряде случаев приводит к катастрофическим ситуациям, угрожающим жизни и здоровью людей. Наиболее критичными с этой точки зрения являются катастрофы современных пассажирских судов [1—3], вместимость которых может достигать пяти тысяч человек [4]. Основная причина человеческих жертв — внезапность возникновения аварийной ситуации, приводящей к стремительному развитию катастрофы. Как следствие, снижению потерь должны способствовать оперативные действия экипажа по борьбе за живучесть судна и по организации экстренной эвакуации пассажиров. Вопросы эвакуации пассажиров регламентируются Международной Морской организацией (ИМО). В руководстве [5] содержатся базовые сведения по определению оптимального времени эвакуации и скорости передвижения пассажиров в зависимости от пола, возраста и геометрии пространства (лестница вверх и вниз, коридор). Однако поскольку современные пассажирские суда являются сложными инженерными объектами массового использования и существенно различаются в части организации внутреннего пространства, в общем виде процессы эвакуации пассажиров могут быть изучены только средствами компьютерного моделирования.

Задачи моделирования эффектов паники и процессов эвакуации традиционно решаются для различных зданий и сооружений с помощью соответствующего математического аппарата: от клеточных автоматов [6] до интеллектуальных агентов [7]. Существуют аналогичные решения и для морских объектов (например, система EVI [8], предназначенная для моделирования эвакуации при пожаре). Однако для морских объектов возможности их применения ограничены стационарными средствами океанотехники (например, буровыми платформами) и штилевыми характеристиками внешней среды. Поскольку катастрофы и гибель морских судов чаще всего происходят в штормовых условиях, необходимо учитывать влияние качки самого судна на процессы перемещения пассажиров.

Существующие решения в этой области (maritimeEXODUS [9] и AENEAS [10, 11]) лишь отчасти позволяют принимать во внимание влияние качки судна на процесс эвакуации. Они учитывают только кинематику перемещений судна посредством введения редуцированных коэффициентов, характеризующих скорость движения эвакуирующегося пассажира. Эти коэффициенты рассчитаны с использованием реальных данных, полученных в результате экспериментов по определению значений скорости каждого человека в толпе при статическом изменении углов крена или дифферента.

Вместе с тем практика нормирования обитаемости морских объектов и сооружений [12] показывает, что перемещение пассажиров существенно зависит не только от кинематических, но и динамических характеристик качки судна — ускорений, действующих на человека при движении в заданном направлении. Воздействие ускорения напрямую невозможно учесть, используя модели эвакуации, основанные на задании законов распределения скоростей [13]. Таким образом, требуется альтернативный подход, в котором правила движения агентов задаются на основе силовых моделей, например — модели социальных сил (Social Force) [14]. Согласно ей движение пешехода может быть описано тремя составляющими: ускорение (замедление), притяжение и отталкивание, которые являются мерами внутренней мотивации человека для совершения того или иного действия. В этой интерпретации движение пассажиров на корабле описывается в виде задачи многих тел, в которой уравнение изменения скорости \mathbf{v}_k для k -го индивидуума имеет вид:

$$m_k \frac{d\mathbf{v}_k}{dt} = \mathbf{F}_k(t) + \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (1)$$

Здесь $\boldsymbol{\varepsilon}$ — случайные отклонения, связанные с неоднородностью популяции, m_k — масса пассажира, а \mathbf{F}_k — результирующая сила, состоящая из следующих компонентов:

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_k(t) = & \mathbf{F}_k^{(0)}(\mathbf{v}_k, v_k^0 \mathbf{e}_k) + \sum_j \mathbf{F}_{kj}(\mathbf{e}_k, \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_j) + \sum_n \mathbf{F}_{kn}(\mathbf{e}_k, \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_n^k) + \\ & + \sum_i \mathbf{F}_{ki}(\mathbf{e}_k, \mathbf{r}_k - \mathbf{r}_i, t) + \mathbf{F}_k^{(R)}(X, \dot{X}, \ddot{X}) + \mathbf{F}_k^{(S)}(X, \dot{X}, \ddot{X}). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь \mathbf{e}_k — направление движения пассажира (агента), $\mathbf{F}_k^{(0)}$ — сила его собственного ускорения, зависящая от желаемого и текущего значений скорости, \mathbf{F}_{kj} — сила взаимного отталкивания (недопущения столкновений) между агентами k и j , \mathbf{F}_{kn} — сила отталкивания между агентом и препятствием, \mathbf{F}_{ki} — сила притяжения между агентом и окружающими его объектами (другими пассажирами — члены семьи, друзья; стационарными объектами — поручни на стенах). Детализированные выражения для этих сил приведены в работе [14]. Специфическое значение имеют компоненты, зависящие от комплексов X, \dot{X}, \ddot{X} — линейных и угловых перемещений, скоростей и ускорений качки судна в различных плоскостях. Так, $\mathbf{F}_k^{(R)}$ совокупно характеризует статические и динамические силы, влияющие на передвижение человека по поверхности переменного наклона, $\mathbf{F}_k^{(S)}$ — силы, связанные со сменой режима движения по поверхности переменного наклона: проскальзыванием или падением. Для учета смены режима движения в $\mathbf{F}_k^{(S)}$ включен случайный фактор, нормируемый на основе ускорений в диапазоне 3—7 м/с² в зависимости от принадлежности агента к той или иной группе (по физическим или гендерным признакам).

Уравнения (1)—(2) позволяют описать передвижения пассажиров в рамках геометрической модели судна (псевдотрехмерного непрерывного пространства, т.е. в виде набора взаимосвязанных двумерных уровней-палуб). Каждая палуба состоит из точек интереса (каюты и

выходы); навигационного графа, который связывает точки интереса; порталов для перемещений между палубами (лифты и лестницы). Можно выделить отдельные группы пассажиров по таким характеристикам, как пол, возраст, желаемая скорость передвижения, желаемый радиус зоны комфорта. Кроме того, каждому пассажиру задается желаемый пункт назначения (предпочтительный эвакуационный выход) исходя из плана эвакуации, соответствующего исходному положению индивидуума (например, занимаемой каюте). Для идентификации модели динамики пассажиров (1)—(2) использованы агрегированные данные экспериментов из работы [15], а также результаты экспериментов с движущимися платформами [16].

Ключевым аспектом применимости модели (1)—(2) является возможность получения характеристик качки судна. На морском волнении положение судна, движущегося с заданной скоростью V и курсовым углом χ к генеральному направлению распространения волн, описывается тремя угловыми (угол дифферента ψ , крена θ , а также угол рысканья) и тремя метрическими (продольно-горизонтальными, поперечно-горизонтальными, вертикальными ζ) перемещениями. В рамках настоящей работы рассматриваются угол дифферента, угол крена и вертикальное перемещение $X = (\zeta, \Theta, \psi)$. Такой выбор обусловлен тем, что углы (Θ, ψ) определяют наклон плоскости, по которой движется пассажир, а ускорения вертикальной качки $\ddot{\zeta}$ влияют на силу трения (сцепления с поверхностью) при ходьбе. Для определения этих величин используется система нелинейных уравнений [17]:

$$\begin{aligned} \ddot{\Theta} + 2\nu_{\Theta}(V)\dot{\Theta} + n_{\Theta}^2 \Theta f(\Theta)(1 + \vartheta\zeta) &= M_{W\Theta}(x, t), \\ \ddot{\zeta} + 2\nu_{\zeta}\dot{\zeta} + n_{\zeta}^2 \zeta - a_{33}V\dot{\psi} - a_{35}V\psi &= F_{W\zeta}(\chi, x, t), \\ \ddot{\psi} + 2\nu_{\psi}(V)\dot{\psi} + n_{\psi}^2(V)\psi &= M_{W\psi}(\chi, x, t). \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения записаны в абсолютной (не связанной с перемещением судна) системе координат. Здесь $F_{W\zeta}(\chi, x, t)$, $M_{W\psi}(\chi, x, t)$, $M_{W\Theta}(\chi, x, t)$ — возмущающие сила и моменты волновой природы, зависящие от возвышения взволнованной поверхности, x — пространственная координата, t — время. Коэффициенты демпфирования $\nu_{\zeta}, \nu_{\psi}(V), \nu_{\Theta} = \nu_1 + \nu_2(V)$, собственные частоты $n_{\zeta}, n_{\psi}(V), n_{\Theta}$ и коэффициенты связи a_{33}, a_{35} суть функции моментов инерции и присоединенных масс жидкости; $\vartheta = \vartheta(S, z_p)$, где S — площадь ватерлинии, а $z_p = z_c - z_g$ — возвышение центра величины над центром тяжести. Функция $f(\Theta)$ задает степень нелинейности поперечного восстанавливающего момента и выражается через его диаграмму статической остойчивости.

Система уравнений (3) описывает перемещения судна под действием возмущающей силы $F_{W\zeta}$ и моментов $M_{W\Theta}, M_{W\psi}$ нерегулярной природы. Они вычисляются путем прямого интегрирования по текущей смоченной поверхности судна, определяемой его положением относительно пространственно-временного поля морского волнения $\xi(x, y, t)$, которое воспроизводится модифицированной моделью Лонге—Хиггинса:

$$\xi(x, y, t) = \sum_n a_n \left(\cos k_n^{(x)} x + \sin k_n^{(y)} y - \omega(k_n^{(x)}, k_n^{(y)}) + \varphi_n \right). \quad (4)$$

Здесь $k_n^{(x)}, k_n^{(y)}$ — волновые числа, связанные с частотой волнения ω_n дисперсионным соотношением, a_n — амплитуды отдельных гармоник, вычисляемые по энергетическому спектру, а φ_n — случайные фазы. При этом величины $k_n^{(x)}, k_n^{(y)}$ также обладают случайной изменчивостью внутри интервала дискретизации, что позволяет избежать периодичности моделируемого поля.

Таким образом, для решения задачи численного моделирования эвакуации пассажиров с судна в условиях сильной качки используется сочетание трех моделей. Вначале по характеристикам интенсивности волн задается частотно-направленный энергетический спектр, по которому моделируется пространственно-временное поле морского волнения (4). Затем вычисляются возмущающие силы и моменты, по которым производится интегрирование уравнений движения (3). Эти данные учитываются при вычислении сил в уравнении (2), которые, в свою очередь, используются в (1). При этом уравнения (1) и (3) интегрируются совместно. Эвакуация начинается одновременно для всех агентов, каждый из которых находится в своей точке интереса. После начала эвакуации точками интереса для агентов становятся только эвакуационные выходы, к которым они стремятся попасть за минимальное время. Общая схема моделирования приведена на рис. 1.

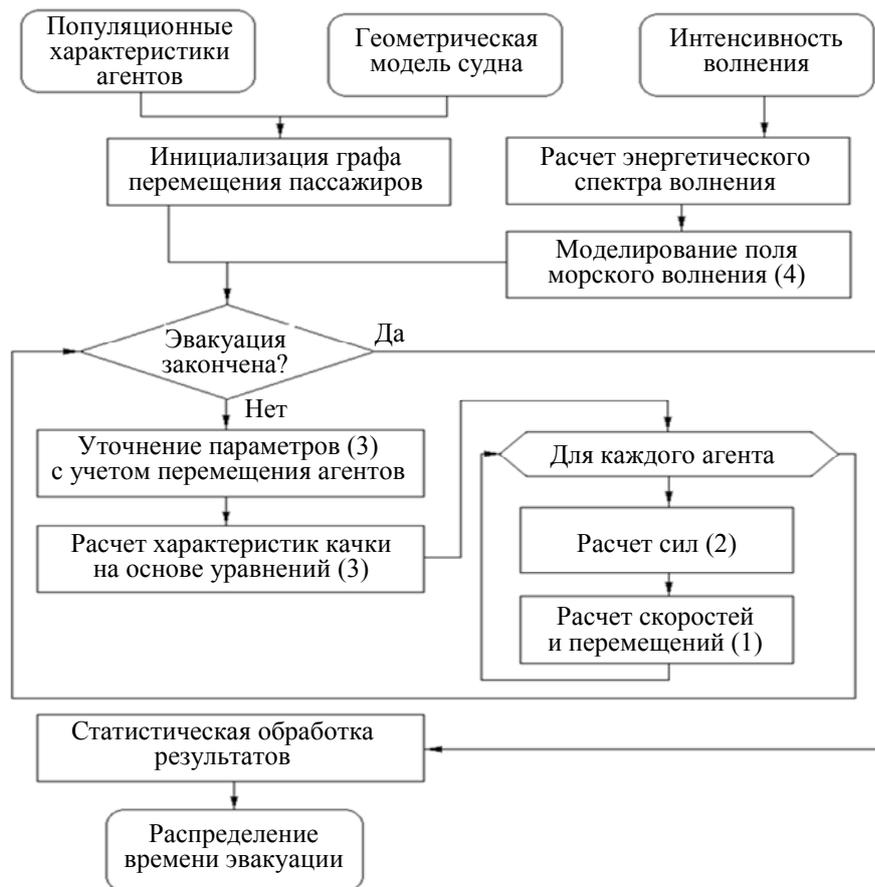


Рис. 1

В иллюстрации этого подхода рассмотрен процесс эвакуации с пассажирского судна „Коста Аллегра“ со следующими характеристиками: водоизмещение 28 597 брт, длина 187,69 м, ширина 25,75 м, осадка 8,20 м, пассажировместимость 1066 человек. Вычислительный эксперимент расчета динамики судна проводился для трех уровней интенсивности океанского волнения (5, 7, 9 баллов); судно не имело хода. При расчетах предполагалось, что курсовой угол к генеральному направлению распространения волн составляет 30° . Это допущение отражает условия штормования, в которых проявляется как килевая, так и бортовая качка.

На рис. 2 приведены графики ядерных оценок плотности распределения $p(t)$ времени эвакуации пассажиров с судна при различной интенсивности волнения. Видно, что при увеличении интенсивности волнения увеличивается разброс распределения и пик смещается вправо (в сторону увеличения): в среднем время эвакуации в штормовых условиях (9 баллов) увеличивается в полтора раза. При этом видно, что по сравнению с исходным распределением на тихой воде распределения для интенсивности волнения 7 и 9 баллов становятся достаточно

близкими. Это является следствием того, что по мере усиления качки мультиагентная система выходит на определенное насыщение.

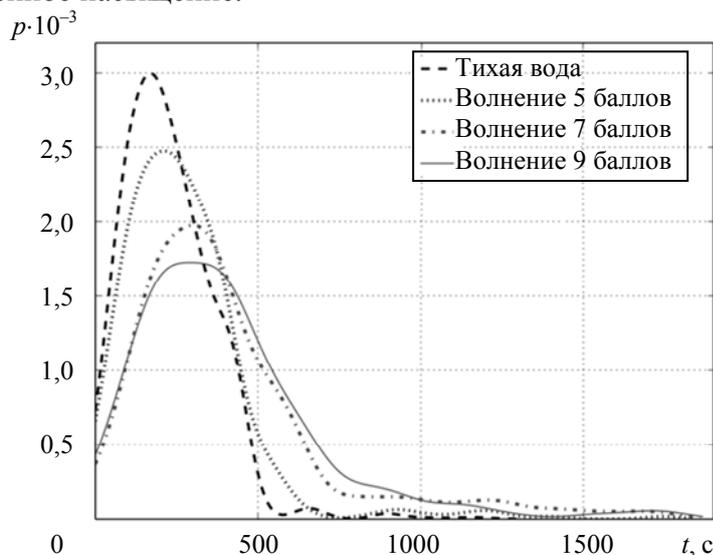


Рис. 2

Для анализа данного эффекта в таблице приведены среднеквадратичные отклонения перемещений судна вследствие вертикальной, бортовой и килевой качки, а также квантили распределения соответствующего им времени эвакуации. Из таблицы видно, что при волнении 5 баллов качка незначительно влияет на перемещения пассажиров, в основном отражаясь на снижении их собственного ускорения. Однако при волнении 7 баллов (а тем более 9 баллов) качка становится уже ощутимой; угол крена может превышать 11° , что соответствует „углу паники“. Как следствие, свободное движение пассажиров затруднено: им приходится держаться за поручни и двигаться только синхронно с колебаниями судна. При этом некоторые пассажиры не сразу могут выйти из своих кают и обычно эвакуируются последними, что и приводит к существенным различиям именно на хвостах распределений (99 % квантиль).

Вероятностные характеристики качки судна и времени эвакуации пассажиров

Режим качки	СКО качки судна			Квантили распределения времени эвакуации, с				
	ζ, \dots°	Θ, \dots°	ψ, \dots°	25 %	50 %	75 %	90 %	99 %
Штиль	—	—	—	128	206	304	411	690
5 баллов	0,4	1,8	0,4	144	249	359	438	1208
7 баллов	0,9	4,8	0,8	210	342	505	715	1618
9 баллов	0,8	12,0	1,4	210	360	506	789	1689

Таким образом, в рамках исследования предложен подход к моделированию эвакуации пассажиров аварийного судна в штормовых условиях, основанный на силовой модели перемещения агентов, учитывающей влияние перемещений, скоростей и ускорений качки. Используя его, можно на основе имитационного моделирования оценить время эвакуации в зависимости от условий штормования (интенсивность волнения, скорость хода, курсовой угол). Предложенный подход может использоваться в системах поддержки принятия решений по обеспечению безопасности мореплавания [18] с целью планирования мероприятий, уменьшающих число возможных жертв как за счет внешних факторов (позиционирование судна относительно направления волн), так и внутренних (открыть или заблокировать двери, забалластировать отсеки для уменьшения крена и пр.). Предлагаемая мультиагентная система может быть развита в части моделей, связанных с:

- развитием затопления судна;
- внутренними источниками аварийных ситуаций (распространение пожара, задымление);

— процессом управления некоторыми системами (например, закрытие/открытие дверей и люков).

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект 14-21-00137.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габрильянц В. Гибель „Адмирала Нахимова“ // Основы безопасности жизнедеятельности. 2005. № 7/8. С. 120—122.
2. Абрамов О. В. Условия и источники возникновения техногенных чрезвычайных (аварийных) ситуаций // Тр. Междунар. симп. „Надежность и качество“. 2012. Т. 1, № . С. 41—45.
3. *Costa Concordia* [Электронный ресурс]: <http://www.costacruise.com/b2c/eu/info/concordia_statement.htm>.
4. *Varela J. M., Rodrigues J. M., Soares C. G.* On-board decision support system for ship flooding emergency response // *Procedia Computer Science*. 2014. Vol. 29. P. 1688—1700.
5. IMO. Interim guidelines for evacuation analyses for new and existing passenger ships. MSC/Circ. 1033; 2002 [Электронный ресурс]: <http://www.imo.org/includes/blastDataOnly.asp/data_id%3D5333/1033.pdf>.
6. *Pelechano N., Malkawi A.* Evacuation simulation models: Challenges in modeling high rise building evacuation with cellular automata approaches // *Automation in construction*. 2008. Vol. 17, N 4. P. 377—385.
7. *Pan X. et al.* A multi-agent based framework for the simulation of human and social behaviors during emergency evacuations // *Ai & Society*. 2007. Vol. 22, N 2. P. 113—132.
8. *Azzi C. et al.* Evacuation simulation of shipboard fire scenarios // *Fire and Evacuation Modeling Technical Conf.*, 2011 [Электронный ресурс]: <<http://www.researchgate.net/publication/253650856>>.
9. *Gwynne S. et al.* Analysing the evacuation procedures employed on a Thames passenger boat using the maritime EXODUS evacuation model // *Fire Technology*. 2003. Vol. 39, N 3. P. 225—246.
10. *Meyer-König T., Klüpfel H., Schreckenberg M.* Assessment and analysis of evacuation processes on passenger ships by microscopic simulation // *Schreckenberg and Sharma*. 2002. P. 297—302.
11. *Meyer-König T., Valanto P., Povel D.* Implementing ship motion in AENEAS—model development and first results // *Pedestrian and evacuation dynamics 2005*. Springer Berlin Heidelberg, 2007. P. 429—441.
12. *Ломов О.П. и др.* Физические факторы обитаемости кораблей и судов. СПб: Судостроение, 2014. 560 с.
13. *Van den Berg J., Lin M., Manocha D.* Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation // *Robotics and Automation*, 2008. ICRA 2008. IEEE Intern. Conf. 2008. P. 1928—1935.
14. *Helbing D., Molnar P.* Social force model for pedestrian dynamics // *Phys. Rev. E*. 1995. Vol. 51, N 5. P. 4282.
15. *Murphy S. Ó., Brown K. N., Sreenan C.* The EvacSim pedestrian evacuation agent model: development and validation // *Proc. of the 2013 Summer Computer Simulation Conf. Society for Modeling & Simulation International*. 2013. P. 38.
16. *Heus R., Wertheim A. H., Havenith G.* Human energy expenditure when walking on a moving platform // *European J. of Applied Physiology and Occupational Physiology*. 1998. Vol. 77, N 4. P. 388—394.
17. *Бухановский А. В., Иванов С. В., Нечаев Ю. И.* Виртуальное моделирование динамики судна на морском волнении в интеллектуальных тренажерах // *Искусственный интеллект*. 2004. Вып. 3. С. 350—359.
18. *Нечаев Ю. И.* Интеллектуальные технологии при контроле экстремальных ситуаций на основе современной теории катастроф // *Морские интеллектуальные технологии*. 2012. № 1. С. 138—147.

Сведения об авторах

- Марина Андреевна Балахонцева** — аспирант; Университет ИТМО; высокопроизводительных вычислений; E-mail: m.balakhontseva@gmail.com
- Александр Валерьевич Бухановский** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра высокопроизводительных вычислений; заведующий кафедрой; E-mail: avb_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой
высокопроизводительных вычислений

Поступила в редакцию
30.04.15 г.

Ссылка для цитирования: Балахонцева М. А., Бухановский А. В. Мультиагентное моделирование процесса эвакуации пассажиров аварийного судна в штормовых условиях // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 614—620.

MULTIAGENT SIMULATION OF PASSENGER EVACUATION CONSIDERING SHIP MOTIONS

M. A. Balakhontceva, A. V. Boukhanovsky

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

E-mail: avb_mail@mail.ru

This paper presents a multiagent simulation of passenger evacuation in case of the inclination of a ship under the storm. Evacuation process depends on many different factors: environmental properties (such as wind velocity, intensity of waves), behavioral aspects of a human and so on. In order to describe a passenger's behavior in an evacuation situation considering the inclination of a ship, we use a force-based model adapted from multiagent system. Our approach provides an opportunity to estimate evacuation time depending on intensity of waves, rate of sailing and relative direction. Proposed model can be used in couple with ship flooding or fire propagation simulation and also it can be used in decision support systems for crew assistance.

Keywords: evacuation, computer simulation, passenger ship, human behavior, ship motions.

Data on authors

- Marina A. Balakhontceva** — Post-Graduate Student; ITMO University; Department of High Performance Computing; E-mail: m.balakhontseva@gmail.com
- Alexander V. Boukhanovsky** — Dr. Sci., Professor; ITMO University; Department of High Performance Computing; Head of the Department; E-mail: avb_mail@mail.ru

Reference for citation: Balakhontceva M. A., Boukhanovsky A. V. Multiagent simulation of passenger evacuation considering ship motions // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 8. P. 614—620 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-7-614-620

ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 535.317
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-621-624

АФОКАЛЬНЫЙ КОМПЕНСАТОР АБЕРРАЦИЙ

Л. Н. АНДРЕЕВ, Г. С. ДЕГТЯРЕВА

Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: galchonok_deg@mail.ru

Рассмотрены принципиальная оптическая схема и коррекционные свойства афокального компенсатора aberrаций, состоящего из двух одинаковых телескопических линз. Приведен метод расчета афокального компенсатора на основе теории aberrаций третьего порядка. Отмечены преимущества компенсатора, заключающиеся в том, что он не сокращает задний фокальный отрезок оптической системы и не влияет на оптическую силу системы. Приводится численный пример расчета двухлинзового объектива с афокальным компенсатором.

Ключевые слова: компенсатор, aberrации, астигматизм, кривизна поверхности, сферическая aberrация, хроматизм положения.

При расчете оптических систем иногда возникает необходимость коррекции какой-либо одной aberrации, в то время как остальные aberrации удовлетворяют критериям качества изображения. Например, компенсаторы aberrаций используются при расчете зеркальных или зеркально-линзовых объективов, когда возникает необходимость коррекции сферической aberrации, при расчете объективов микроскопа с плоским полем, если возникают трудности с исправлением кривизны поверхности, или для выполнения ахроматизации оптических систем. Целью настоящей работы являлся расчет компенсатора, позволяющего исправлять одну или несколько aberrаций, не влияя на коррекцию других, уже исправленных.

Разработанный афокальный компенсатор aberrаций представляет собой оптическую систему, включающую две одинаковые телескопические линзы 1 и 3, симметрично расположенные относительно диафрагмы 2, установленной между ними (см. рисунок) [1].

Условия образования афокального компенсатора могут быть описаны следующим образом:

$$r_1 = -r_4; \quad r_2 = -r_3; \quad d_1 = d_3, \quad (1)$$

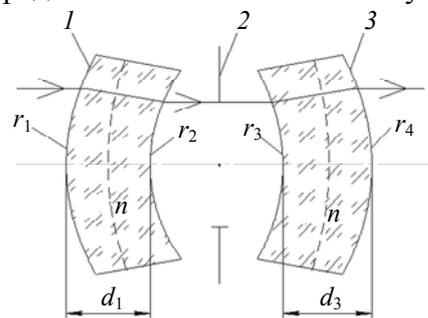
где r_1 — r_4 — радиусы кривизны поверхностей компенсатора, d_1 и d_3 — толщина первой и второй линзы.

Связь конструктивных элементов телескопической линзы описана в работах [2—4]:

$$r_1 = r_2 + \frac{n-1}{n} d, \quad (2)$$

n — показатель преломления оптического материала линзы, $d = d_1 = d_3$.

Выражение, описывающее сумму Зейделя S_4 , определяющую кривизну поверхности изображения телескопической линзы, приведено в работе [2]:



$$S_4 = -\sum_1^2 \frac{\Delta \frac{1}{n}}{r} = \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (3)$$

Поскольку компенсатор содержит две телескопические линзы, выражение, описывающее сумму Зейделя, представим следующим образом:

$$S_4 = 2 \frac{n-1}{n} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right). \quad (4)$$

В предложенном компенсаторе коэффициент S_3 , определяющий астигматизм третьего порядка, имеет отрицательный знак, он линейно зависит от изменения воздушного промежутка d_2 .

Коэффициенты S_2 , S_5 , $S_{2\text{хр}}$, определяющие кому, дисторсию и хроматизм увеличения третьего порядка, равны нулю вследствие симметрии оптической схемы компенсатора.

Следует заметить, что коэффициенты S_1 и $S_{1\text{хр}}$, определяющие сферическую aberrацию и хроматизм положения в афокальном компенсаторе [1], не равны нулю. Поэтому для устранения сферической aberrации следует наружные выпуклые сферические поверхности в обеих телескопических линзах заменить на асферические второго порядка, описанные уравнением

$$y^2 = 2r_0z + (1 - e^2)z^2,$$

где r_0 — радиус в вершине асферической поверхности, e^2 — квадрат эксцентриситета асферической поверхности [5]. Путем интерполяции величины e^2 обеспечивается необходимая коррекция сферической aberrации.

Для коррекции хроматической aberrации положения одиночные телескопические линзы следует заменить на двусклеенные из „хроматической“ пары стекол, у которых показатели преломления для средней длины волны близки, а коэффициенты средней дисперсии различны. Путем интерполяции радиусов кривизны „хроматической“ поверхности $r_{\text{хр}}$ выполняется коррекция.

Особенностью оптической системы этого афокального компенсатора является то, что изменение конструктивных параметров e^2 , d_2 , $r_{\text{хр}}$ обеспечивает коррекцию только одной aberrации, например, e^2 — сферической, d_2 — астигматизма, $r_{\text{хр}}$ — хроматизма положения, и не влияет на уже исправленные остальные aberrации.

Приведем пример расчета афокального компенсатора, обеспечивающего коррекцию кривизны поверхности и астигматизма двухлинзового склеенного объектива [6].

Как известно [7—11] у двухлинзовых склеенных объективов исправлены сферическая aberrация, кома и хроматизм положения, значительные астигматизм и кривизна поверхности у этих объективов ограничивают их угловое поле. Объясняется это тем, что значения коэффициентов aberrаций 3-го порядка у них следующие $S_3 = 1$ и $S_4 \approx 0,65$. Поэтому для коррекции астигматизма и кривизны поверхности необходим афокальный компенсатор, у которого $S_3 \approx -1$ и $S_4 \approx -0,65$.

С использованием формул (1), (2), (4) рассчитывается афокальный компенсатор с указанными значениями сумм Зейделя. Результаты aberrационного расчета приведены в таб. 1—4 ($\Delta s'$ и $\Delta y'$ — продольная и поперечная сферическая aberrация, η — коэффициент неизопланитизма, $s'_{F'} - s'_{C'}$ — хроматизм положения, ω — угловое поле, h — высота луча на первой

поверхности, y' — величина изображения, $z'_s - z'_m$ — астигматические отрезки, $\Delta y' / y'$ — хроматизм увеличения). В табл. 1 и 2 представлены aberrации двухлинзового объектива $f'=100$ мм; $D/f'=1:2,5$; $2\omega=2^\circ 30'$ [4]. В табл. 3 и 4 приведены aberrации двухлинзового объектива с афокальным компенсатором $f'=100$ мм; $D/f'=1:2,8$; $2\omega=25^\circ$ [5].

Таблица 1

Аберрации точки на оси

h , мм	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$s'_{F'} - s'_{C'}$, мм
20	0,20	0,12	0,025	-0,14	0,197
14,1	0,14	-0,30	-0,043	-0,006	-0,069
0	0	0	0	0	-0,25

Таблица 2

Аберрации главного луча

ω , ...°	$\Delta y'$, мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y' / y'$, %
-1°15'	-2,18	-0,039	-0,082	0,043	-0,002
-53'	-1,54	-0,019	-0,041	0,022	-0,001
0	0	0	0	0	0

Таблица 3

Аберрации точки на оси

h , мм	$\text{tg } \sigma'$	$\Delta s'$, мм	$\Delta y'$, мм	η , %	$s'_{F'} - s'_{C'}$, мм
20	0,20	-0,003	-0,0006	-0,11	0,15
14,1	0,14	-0,16	-0,023	-0,07	0,002
0	0	0	0	0	-0,11

Таблица 4

Аберрации главного луча

ω , ...°	$\Delta y'$, мм	z'_s , мм	z'_m , мм	$z'_s - z'_m$, мм	$\Delta y' / y'$, %
-12°30'	21,71	0,104	0,098	0,006	-1,9
-8°54'	15,50	0,037	0,125	-0,088	-0,9
0	0	0	0	0	0

После присоединения к объективу компенсатора фокусное расстояние остается прежним — $f'_0 = 99,93$ мм, также почти не изменяется значение заднего отрезка объектива ($s'_0 = 93,19$ мм, а после присоединения компенсатора $s'_0 = 93,18$ мм).

Анализ таблиц показывает, что угловое поле у двухлинзового объектива с афокальным компенсатором увеличено примерно в десять раз по сравнению с объективом без компенсатора.

В заключение следует отметить, что рассмотренный афокальный компенсатор позволяет исправить следующие aberrации объективов: сферическую, хроматизм положения, астигматизм, кривизну поверхности, благодаря чему улучшаются оптические характеристики и качество изображения.

Кроме того, расположение афокального компенсатора перед рассчитываемым объективом не влияет на его оптическую силу и не сокращает задний фокальный отрезок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 148389 РФ. Афокальный компенсатор кривизны поверхности изображения / Л. Н. Андреев, Г. С. Дегтярева. 2014. Бюл. № 34.
2. Слюсарев Г. Г. Методы расчета оптических систем. Л.: Машиностроение, 1969. 672 с.
3. Русинов М. М. Композиция оптических систем. СПб: Либроком, 2011. 382 с.
4. Турыгин И. А. Прикладная оптика. М.: Машиностроение, 1980. 383 с.

5. Андреев Л. Н., Ежова В. В. Прикладная теория аберраций. Ч. 2. СПб: НИУ ИТМО, 2011. 52 с.
6. Пат. 147364 РФ. Объектив / Л. Н. Андреев, Г. С. Дегтярева. 2014. Бюл. № 31.
7. Андреев Л. Н. Прикладная теория аберраций. СПб: СПб ГИТМО, 2002. 98 с.
8. Заказнов Н. П. Прикладная оптика. СПб: Лань, 2009. 320 с.
9. Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. Н. Теория оптических систем. СПб: Лань, 2008. 446 с.
10. Русинов М. М. Техническая оптика. СПб: Либроком, 2011. 487 с.
11. Русинов М. М. и др. Вычислительная оптика. Справочник. СПб: Либроком, 2009. 424 с.

Сведения об авторах

- Лев Николаевич Андреев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики
- Галина Сергеевна Дегтярева** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра прикладной и компьютерной оптики; E-mail: galchonok_deg@mail.ru

Рекомендована кафедрой
прикладной и компьютерной оптики

Поступила в редакцию
22.04.15 г.

Ссылка для цитирования: Андреев Л. Н., Дегтярева Г. С. Афокальный компенсатор аберраций // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 621—624.

AFOCAL COMPENSATOR OF ABERRATIONS

L. N. Andreev, G. S. Degtiareva

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

E-mail: galchonok_deg@mail.ru

Optical schematic of an afocal compensator of aberrations composed of two identical telescopic lenses is described. The corrective properties of the compensator are studied. A method for calculation of the schematic based on theory of the third-order aberration theory is presented. As an advantage of the schematic, it is noted that the compensator does not cut back focal length of the optical system and does not affect the system optical power. An example is presented of calculation of the afocal compensator for correction of field aberration in two-component lens.

Keywords: compensator, aberrations, astigmatism, surface curvature, spherical aberration, longitudinal chromatic aberration.

Data on authors

- Lev N. Andreev** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics
- Galina S. Degtiareva** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Applied and Computer Optics; E-mail: galchonok_deg@mail.ru

Reference for citation: Andreev L. N., Degtiareva G. S. Afocal compensator of aberrations // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 8. P. 621—624 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-621-624

АВТОНОМНАЯ АСТРОНОМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ И СЛЕЖЕНИЯ

В. И. КУЗНЕЦОВ, Т. В. ДАНИЛОВА

*Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: danitoma58@yandex.ru*

Представлена автономная астрономическая система навигации и ориентации искусственных спутников Земли (ИСЗ), основанная на измерениях углов „ИСЗ—звезда“ с использованием оптико-электронных приборов. Для решения навигационной задачи разработаны взаимно-угловой метод и метод слежения. В обоих методах на основе формирования оценок ориентации рассчитывается направление линии визирования. Метод слежения, помимо формирования высокоточных данных навигационного определения наблюдаемого ИСЗ, обеспечивает выявление фактов изменения его орбиты (маневра), в том числе и при малых (1—3 м/с) импульсах. Представлены результаты имитационного моделирования разработанных методов. Предлагаемая система, основанная на пассивных измерениях, обладает повышенной помехоустойчивостью, автономностью и устойчивостью функционирования. Результаты разработок могут найти применение в автономных системах наблюдения за космическими объектами.

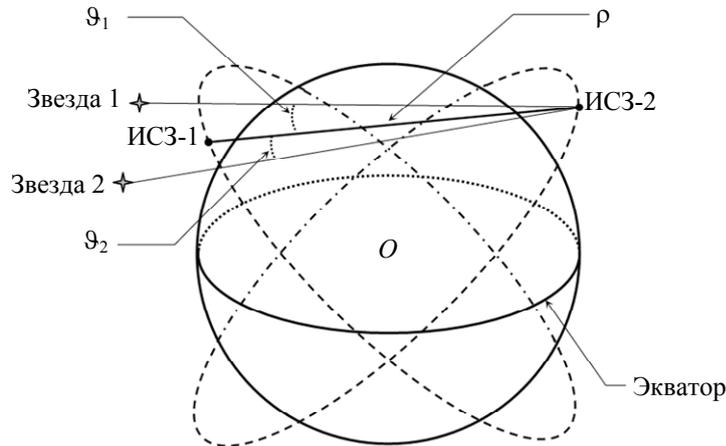
Ключевые слова: автономная навигация, автономная ориентация, методы навигации, астроизмерения, распознавание звезд, оптико-электронный прибор, системы наблюдения, изменение орбиты.

В русле общемировой тенденции повышения уровня автономности функционирования систем управления искусственных спутников Земли (ИСЗ), переноса функций управления с наземных на бортовые комплексы управления (БКУ) астрономические системы навигации и ориентации, основанные на использовании данных пассивных измерений относительно естественных полей, являются наиболее перспективными. Актуальность разработки таких систем определяется также надежностью, помехозащищенностью и малыми массогабаритными характеристиками требуемых для их реализации измерителей. Особенно важно создавать автономные астрономические системы наблюдения (слежения), позволяющие оперативно выявлять факт изменения орбиты ИСЗ, в том числе при малых импульсах (1—3 м/с).

В настоящей статье представлена разработанная авторами система автономной навигации, ориентации и слежения, основанная на бортовых измерениях углов „ИСЗ—звезда“. Для решения навигационной задачи предлагаются взаимно-угловой метод и метод слежения — модификации широко известного взаимного метода автономной навигации. Задача ориентации решается на основе распознавания звезд в оптико-электронном приборе (ОЭП), жестко закрепленном на корпусе ИСЗ.

Классический взаимный метод предполагает измерения угла „ИСЗ—звезда“, дальности между спутниками и в некоторых случаях — радиальной (относительной) скорости. Измерения производятся с первого (собственного) спутника ИСЗ-1 относительно второго (наблюдаемого) ИСЗ-2; высота орбиты первого, как правило, меньше высоты орбиты второго. При этом возможно определить вектор состояния либо одного (любого) ИСЗ — шестимерная задача, либо обоих — двенадцатимерная задача [1—3]. Для реализации метода необходимы, как минимум, помещенный в карданов подвес ОЭП, дальномер и, возможно, доплеровский измеритель скорости. На рисунке приведена схема бортовых измерений для взаимного и взаимно-углового методов (O — центр масс Земли; ИСЗ-1, ИСЗ-2 — положение на орбите

космических аппаратов; ϑ_1, ϑ_2 — углы с ИСЗ-1 на ИСЗ-2 и звезды; ρ — расстояние ИСЗ-1—ИСЗ-2 (дальность). Решение задачи ориентации во взаимном методе не рассматривалось.



Взаимно-угловой метод автономной навигации. В настоящей работе представлена модификация классического взаимного метода — взаимно-угловой метод навигации, основанный только на измерении углов „ИСЗ—звезда“ и исключая измерение дальности и радиальной скорости. Использование метода позволяет существенно сократить состав навигационных измерителей на ИСЗ-1: задача решается при двух ОЭП, один из которых (ОЭП-1) жестко закреплен на корпусе и предназначен для определения ориентации ИСЗ-1 и расчета направления линии визирования „ИСЗ-1—ИСЗ-2“, а другой (ОЭП-2) помещен в карданов подвес и осуществляет визирование ИСЗ-2.

ОЭП-2 не только визирует ИСЗ-2, но и измеряет координаты и звездные величины звезд, попавших в его поле зрения, после чего звезды распознаются, т.е. становятся известны их геоцентрические координаты. В расчет принимаются N самых ярких звезд ($N \geq 1$), относительно которых и измеряются угловые расстояния.

Навигационная задача решается с использованием классического метода наименьших квадратов (МНК), т.е. полагаются априори известными $\mathbf{q}_{0\text{ап}}$ — оценки орбит для ИСЗ-1 и ИСЗ-2 на некоторый момент времени (начало мерного интервала), формирование поправок к которым и составляет суть решения задачи.

После измерений, выполненных в течение мерного интервала, производится статистическая обработка результатов измерений, оценки параметров орбит итерационно корректируются:

$$\mathbf{q}_{0c} = \mathbf{q}_{0c-1} + \Delta\mathbf{q}_{0c}, \quad (1)$$

причем на нулевой итерации $\mathbf{q}_{00} = \mathbf{q}_{0\text{ап}}$. Поправки рассчитываются по следующему алгоритму [1, 2]:

$$\Delta\mathbf{q}_{0c} = \left(\sum_{j=1}^n \mathbf{G}_{0j}^T \mathbf{P}_j \mathbf{G}_{0j} \right)^{-1} \left(\sum_{j=1}^n \mathbf{G}_{0j}^T \mathbf{P}_j \Delta\mathbf{L}_j \right), \quad (2)$$

где c — номер итерации; n — число навигационных сеансов на мерном интервале; $\mathbf{G}_{0j} = \mathbf{G}_j \Phi_{0j}$ — градиентная матрица, т.е. матрица производных от текущей (на момент навигационного сеанса) измеряемой функции \mathbf{L}_{ij} по начальным параметрам опорной орбиты \mathbf{q}_{0c} , $i = 1, \dots, m$, i — номер навигационного параметра, m — размерность вектора измеряемых параметров; \mathbf{G}_j — матрица производных от \mathbf{L}_{ij} по текущим параметрам опорной орбиты;

$\Phi_{0j} = \frac{\partial \mathbf{q}_j}{\partial \mathbf{q}_{0c}}$ — матрица баллистических (изохронных) производных; $\mathbf{P}_j = \mathbf{K}_{\mathbf{L}_j}^{-1}$ — весовая

матрица измерений, \mathbf{K}_{L_j} — матрица вторых моментов погрешностей измерений в j -м навигационном сеансе; $\Delta \mathbf{L}_j = \mathbf{L}_{jн} - \mathbf{L}_{jр}$ — вектор невязок измерений, разность между вектор-функциями измеренных и рассчитанных навигационных параметров; $\mathbf{q} = \{\mathbf{r}, \mathbf{v}\}$, $\Delta \mathbf{q}_{0c} = \{\Delta \mathbf{r}_c, \Delta \mathbf{v}_c\}$, где \mathbf{r} — радиус-вектор положения КА, \mathbf{v} — вектор скорости, $\Delta \mathbf{r}_c$ и $\Delta \mathbf{v}_c$ — поправки к ним.

Итерации завершаются при выполнении условия $|\Delta \mathbf{q}_{0c}| < \varepsilon$ (ε — малое число, характеризующее требуемую точность метода).

Имитационная модель, реализующая взаимно-угловой метод, является частью разработанного в ВКА им. А. Ф. Можайского программного комплекса расчетно-информационного обеспечения автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов (АСНИ 1.1) [4].

Моделирование подтвердило предположение о том, что с увеличением количества измеряемых углов „ИСЗ—звезда“ точность навигационных определений возрастает, хотя навигационная задача решается и при $N = 1$. В АСНИ 1.1 $N \leq 5$. В табл. 1 демонстрируется зависимость точности навигационных определений от N при различных приборных погрешностях ОЭП для пар орбит, оскулирующие элементы (a — большая полуось, км; e — эксцентриситет; i — наклонение, ...°; Ω — восходящий узел, ...°; ω — аргумент перигея, ...°; Θ — истинная аномалия, ...°) которых представлены в табл. 2.

Таблица 1

Зависимость точности навигационных определений взаимно-углового метода от количества звезд (углов) для различных приборных погрешностей ОЭП

Вид анализируемой погрешности			Погрешность измерений в ОЭП					
			0,1"			5"		
			N=1	N=3	N=5	N=1	N=3	N=5
ИСЗ-1	$\Delta \mathbf{R}$, м	начальная точка	5,724	3,353	1,648	286,1	167,8	82,48
		максимум	6,859	3,353	1,989	342,6	167,8	99,37
		конечная точка	5,779	2,866	1,111	289,6	141,9	55,07
	$\Delta \mathbf{V}$, см/с	начальная точка	0,172	0,112	0,059	8,577	5,596	2,962
		максимум	0,346	0,130	0,077	17,27	6,505	3,832
		конечная точка	0,141	0,109	0,038	7,097	5,360	1,901
ИСЗ-2	$\Delta \mathbf{R}$, м	начальная точка	14,53	1,286	0,296	725,9	64,16	14,80
		максимум	14,53	3,380	1,421	725,9	168,7	70,78
		конечная точка	8,609	3,380	1,413	429,9	168,7	70,34
	$\Delta \mathbf{V}$, см/с	начальная точка	0,198	0,026	0,011	9,883	1,312	0,528
		максимум	0,198	0,040	0,018	9,883	2,017	0,912
		конечная точка	0,147	0,040	0,018	7,338	1,977	0,912

Примечание: начальная точка, максимум, конечная точка относятся к мерному интервалу (чаще всего это виток ИСЗ-2).

Таблица 2

Параметры орбит ИСЗ-1 и ИСЗ-2

Оскулирующие элементы	ИСЗ-1		ИСЗ-2	
	опорная орбита	фактическая орбита	опорная орбита	фактическая орбита
a	10010	10012	25478	25478,05
e	0,01	0,01002	0,01	0,01001
i	85	86	63	62,999
Ω	0,001	0,003	120	120,003
ω	0,05	0,02	0,05	0,0503
Θ	0,001	0,00102	0,002	0,00201

В табл. 1 приведены погрешности определения оценок радиуса-вектора ($\Delta\mathbf{R}$) и вектора скорости ($\Delta\mathbf{V}$) орбиты в начальной и конечной точках мерного интервала, а также максимум отклонений. Как видно из этой таблицы, при увеличении числа звезд от одной до пяти точность оценок векторов положения ИСЗ возрастает в среднем в три раза, а точность оценок векторов скорости возрастает на порядок.

Используя предложенный метод, можно варьировать число навигационных параметров (N), не изменяя состав навигационных измерителей. При $N > 5$, очевидно, возрастает точность метода. Введение ограничений на N вызывается только способностью ОЭП распознавать большое количество звезд и особенностями программной реализации алгоритма решения навигационной задачи.

Метод слежения. Для решения задач контроля космического пространства разработан основанный на взаимно-угловом методе навигации метод слежения, отличающийся тем, что в результате визирования ИСЗ-2 посредством ОЭП, помещенного в кардан, и измерения N углов „ИСЗ-2—звезда“ ($N \geq 1$) уточняются оценки параметров орбиты визируемого аппарата (ИСЗ-2).

Точность визирования ИСЗ-2 при этом определяется точностью оценок параметров орбиты визирующего аппарата (ИСЗ-1) и погрешностями ОЭП.

Оценки орбиты ИСЗ-1 могут быть получены путем решения задачи навигации и ориентации по методу виртуальных измерений зенитных расстояний звезд [5, 6]. После получения этих оценок в течение двух—трех витков положение ИСЗ-1 без существенных потерь в точности может определяться на основе баллистического прогноза. При наличии на борту трех ОЭП, помещенных в карданов подвес, задачи определения собственной орбиты и слежения за ИСЗ-2 (определения его орбиты) могут решаться параллельно.

Функционирование автономной системы слежения также промоделировано в среде АСНИ 1.1 [4].

В табл. 3 сравнивается точность взаимного метода и метода слежения. Здесь и в других таблицах и $\Delta\mathbf{R}$ и $\Delta\mathbf{V}$ — погрешность оценок орбиты по векторам положения и скорости; ΔS , ΔT , ΔW — отклонение определения положения ИСЗ по направлениям радиуса-вектора, трансверсали и бинормали. Анализ данных табл. 3 дает основание полагать, что при средней квадратической погрешности (СКП) измерений в ОЭП $\sim 0,1$ — $1''$ расчет пяти углов по алгоритму метода слежения показывает более высокую точность оценок орбиты ИСЗ, чем при дополнительном измерении дальности с СКП в 10—15 м и измерении одного или двух углов по алгоритму взаимного метода. По крайней мере, это справедливо для указанных пар орбит, как при одинарных решениях, так и в статистике [1, 2].

Возможность решения задачи слежения определяется взаимным положением орбит аппаратов. На основе данных об опорных орбитах спутников предварительно формируется множество отрезков мерного интервала, на которых ИСЗ-2 наблюдаем с борта ИСЗ-1, т.е. не затенен Землей, не засвечен Солнцем или Луной, и на которых, следовательно, возможны измерения. Такие отрезки называются навигационными. Прогноз успешного решения навигационной задачи по способу слежения полагается положительным, если суммарная длина навигационных отрезков T_N составляет не менее 60 % от мерного интервала T , отрицательным в случае $T_N < 0,3T$. При $0,3T < T_N < 0,6T$ возможность решения задачи определяется расположением навигационных отрезков на мерном интервале; для положительного прогноза они должны располагаться как на его первой, так и на второй половине.

Таблица 3

Сравнительная оценка точности методов навигации взаимного и слежения

№	ОЭ	Пары орбит				ИЗС-2	Измеряемые параметры	Средняя квадратическая погрешность измерения	Погрешность оценок орбиты ИЗС-2					Решение	Метод навигации
		опорная	фактическая	опорная	фактическая				ИЗС-1	ΔR , м	ΔV , см/с	ΔS , м	ΔL , м		
1	a	6679	6679,00001	10000	10004	10004	1 угол дальность	0,1"	116,4	7,21	29,3	116,3	2,1	Одинарное	Взаимный
	e	0,01	0,01000001	0,1	0,101		5 углов	0,1"	37,1	2,11	11,2	37,0	3,8	Одинарное	Слежения
	i	83,5	83,499991	56	56,01		1 угол дальность	1"	482,7	30,6	121,9	482,7	16,1	Одинарное	Взаимный
	Ω	8,94	8,9400001	0	0,001		2 угла дальность	1,0"	318,2	19,5	81,0	318,0	10,9	Одинарное	Взаимный
	ω	-42,8	-42,80001	0	0,11		5 углов	1,0"	371,2	21,1	111,8	370,3	38,2	Одинарное	Слежения
	Θ	18,2	18,20001	45	45		1 угол дальность	0,1"	8,14	0,09	0,45	-8,05	3,58	Статистическое	Взаимный
2	a	8800	8800,00001	25478	25478,05	25478,05	1 угол дальность	0,1"	8,14	0,09	0,45	-8,05	3,58	Статистическое	Взаимный
	e	0,1	0,10000001	0,01	0,01001		5 углов	0,1"	-0,37	-0,007	0,01	-0,14	0,07	Статистическое	Слежения
	i	56	56,000001	63	62,999		5 углов	0,1"	-0,71	0,009	0,30	0,65	0,34	Статистическое	Слежения
	Ω	0	0,0000001	120	119,997		5 углов	0,1"	5,5	0,08	2,31	5,14	2,04	Одинарное	Слежения
	ω	0	0,00001	0	0		1 угол дальность	0,1"	0,68	0,005	0,08	-0,02	0,009	Одинарное	Слежения
	Θ	0	0,000001	45	45		1 угол дальность	0,1"	0,51	0,006	0,22	0,49	0,17	Одинарное	Взаимный

В табл. 4 представлены результаты моделирования метода слежения на 33 витках ИСЗ-2 для пары № 1 орбит, параметры которых содержатся в табл. 5. Здесь дополнительно представлены отклонения определения оценок скорости наблюдаемого спутника по направлениям радиуса-вектора (ΔV_S), трансверсали (ΔV_T) и бинормали (ΔV_W). Алгоритм предварительного анализа возможности решения навигационной задачи показал отрицательный результат шесть раз: витки 11—13 и 25—27. На этих витках осуществлялся баллистический расчет орбиты ИСЗ-2, причем без заметного снижения точности ее оценок.

Таблица 4

Временной ряд решений метода слежения для пары орбит № 1

№	Максимальные отклонения орбит ИСЗ-2 (м, см/с)				Число измерений					Режим решений
	ΔS ΔV_S	ΔT ΔV_T	ΔW ΔV_W	ΔR ΔV	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	
1	4,17 0,783	7,95 0,363	7,91 0,850	10,9 0,992	251	251	251	249	242	НЗ
2	1,03 0,225	1,85 0,081	1,71 0,184	2,47 0,268	233	233	233	232	229	НЗ
3	1,01 0,207	2,48 0,0927	3,63 0,392	4,29 0,433	257	257	256	252	241	НЗ
4	0,268 0,174	1,49 0,0107	3,08 0,333	3,27 0,347	245	245	244	239	229	НЗ
5	0,691 0,148	2,00 0,0732	0,861 0,0931	2,13 0,161	258	258	258	255	244	НЗ
6	0,629 0,362	3,93 0,0614	5,09 0,552	5,91 0,652	255	255	254	251	239	НЗ
7	0,923 0,407	3,81 0,0857	4,52 0,489	5,31 0,606	263	263	263	255	232	НЗ
8	0,495 0,375	3,95 0,0482	4,34 0,468	5,55 0,593	203	203	199	195	181	НЗ
9	0,814 0,977	8,69 0,0635	12,8 1,38	14,8 1,65	180	180	176	165	146	НЗ
10	0,650 0,608	6,14 0,0542	11,0 1,19	12,2 1,32	169	168	159	154	143	НЗ
11	1,02 1,23	10,8 0,0716	11,0 1,18	14,4 1,61	—	—	—	—	—	БП
12	1,39 2,43	21,8 0,0957	11,0 1,18	23,8 2,52	—	—	—	—	—	БП
13	1,86 4,20	38,1 0,131	10,9 1,17	39,3 4,24	—	—	—	—	—	БП
14	4,98 0,715	10,4 0,489	5,32 0,575	11,0 0,894	158	157	157	156	147	НЗ
15	3,20 0,549	6,70 0,321	10,2 1,10	10,9 1,18	234	234	234	233	230	НЗ
16	1,37 0,361	3,50 0,114	8,84 0,952	8,98 0,996	233	233	232	223	212	НЗ
17	0,784 0,191	2,29 0,0780	1,29 0,140	2,47 0,225	237	237	237	232	219	НЗ
18	0,531 0,259	2,61 0,0342	3,87 0,419	4,34 0,492	234	234	234	231	229	НЗ
19	1,10 0,303	3,79 0,117	3,21 0,349	4,42 0,457	262	262	258	256	245	НЗ
20	0,917 0,611	6,14 0,0797	7,96 0,864	9,75 1,05	241	241	240	235	224	НЗ
21	0,755 0,941	9,56 0,0819	12,6 1,37	15,2 1,64	269	268	268	265	253	НЗ
22	0,991 0,720	6,68 0,0829	8,92 0,963	10,5 1,17	215	215	211	201	179	НЗ

Продолжение таблицы 4

№	Максимальные отклонения орбит ИСЗ-2 (м, см/с)				Число измерений					Режим решений
	ΔS ΔV_S	ΔT ΔV_T	ΔW ΔV_W	ΔR ΔV	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	
23	1,55 0,927	8,70 0,132	11,8 1,27	13,5 1,49	177	177	174	159	136	НЗ
24	1,55 1,09	11,2 0,148	15,3 1,65	18,7 1,88	175	175	169	157	133	НЗ
25	1,95 1,53	15,2 0,170	15,3 1,64	20,9 2,12	—	—	—	—	—	БП
26	2,59 2,63	25,2 0,200	15,2 1,63	29,0 2,87	—	—	—	—	—	БП
27	3,30 4,30	40,5 0,232	15,2 1,63	42,9 4,33	—	—	—	—	—	БП
28	2,99 0,749	6,82 0,257	7,59 0,812	10,1 0,860	252	252	251	249	230	НЗ
29	1,14 0,232	2,31 0,110	6,22 0,669	6,35 0,684	237	237	237	234	229	НЗ
30	0,755 0,233	2,82 0,0644	6,25 0,675	6,80 0,703	254	254	253	251	240	НЗ
31	0,271 0,149	1,60 0,0187	1,63 0,177	2,23 0,217	257	257	256	253	243	НЗ
32	0,400 0,215	2,37 0,0376	2,67 0,290	3,30 0,356	267	267	267	264	256	НЗ
33	0,576 0,203	2,49 0,0590	1,32 0,144	2,49 0,248	247	246	245	238	224	НЗ

Примечание: НЗ — навигационная задача, БП — баллистический прогноз.

Таблица 5

Параметры пар орбит ИСЗ-1 и ИСЗ-2

Оскулирующие элементы	№ пары							
	1		2		3		4	
	ИСЗ-1	ИСЗ-2	ИСЗ-1	ИСЗ-2	ИСЗ-1	ИСЗ-2	ИСЗ-1	ИСЗ-2
<i>a</i>	7378	21400	6678	7000	8800	25478	6679	10000
<i>e</i>	0,01	0,01	0,01	0,01	0,1	0,01	0,01	0,1
<i>i</i>	86	63	86	56	56	63	83,5	56
Ω	0,003	120	0	120	0	120	8,94	0
ω	0,01	2	0	0	0	0	-42,8	0
Θ	0,008	3	0	45	0	45	18,2	45

Направление линии визирования „ИСЗ-1—ИСЗ-2“ определяется после расчета геоцентрической ориентации корпуса ИСЗ-1, который производится на основе измерений в ОЭП-2. В [7] показано, что в результате измерений в ОЭП, жестко закрепленном на корпусе ИСЗ, определяется ориентация спутника в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат (ГЭИСК), т.е. рассчитывается матрица **M** перехода из ГЭИСК в связанную систему координат (ССК). Далее по известным координатам ИСЗ-1 (x_1, y_1, z_1) и опорным координатам ИСЗ-2 (x_2, y_2, z_2) определяется направляющий вектор искомой линии визирования в ГЭИСК **a** (a_x, a_y, a_z):

$$a_x = \frac{x_1 - x_2}{d}, \quad a_y = \frac{y_1 - y_2}{d}, \quad a_z = \frac{z_1 - z_2}{d},$$

где $d = ((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2)^{1/2}$.

После этого рассчитывается направляющий вектор линии визирования в ССК $\mathbf{a}' (a'_{X_{\text{ССК}}}, a'_{Y_{\text{ССК}}}, a'_{Z_{\text{ССК}}})$:

$$\mathbf{a}' = \mathbf{M}\mathbf{a}.$$

Углы между вектором \mathbf{a}' и осями $X_{\text{ССК}}$ и $Z_{\text{ССК}}$ равны $\lambda_1 = \arccos a'_{X_{\text{ССК}}}$, $\rho_1 = \arccos a'_{Z_{\text{ССК}}}$. Значения λ_1 , ρ_1 подаются на двигатели рамок карданова подвеса для физического ориентирования оптической оси ОЭП-2 в точку нахождения ИСЗ-2.

В табл. 6 представлена точность навигационного определения данных, полученных по методу слежения. Благодаря стабильно высокой точности навигационных определений метод слежения перспективен для использования в системах автономной навигации и ориентации, в первую очередь, для ИСЗ наблюдения.

Таблица 6

Метод слежения.
Максимальные расхождения орбит ИСЗ-2 за 35 витков

№ пары орбит (см. табл. 5)	ΔR , м	ΔV , см/с	ΔS , м	ΔT , м	ΔW , м
1	14,5	18,4	6,97	14,2	4,54
2	29,1	3,28	6,88	18,4	27,7
3	22,4	25,3	9,92	22,0	11,8
4	14,3	69,5	4,46	14,1	4,07

Выявление факта изменения орбиты наблюдаемого аппарата. Для предложенного авторами метода слежения разработан алгоритм решения задачи оперативного выявления факта изменения орбиты ИСЗ-2, причем эти изменения могут быть относительно незначительными. Для этого требуется высокоточное решение навигационной задачи по методу слежения (порядка единиц-десятков метров по положению и соответственно единиц-десятков миллиметров в секунду по модулю вектора скорости), что, в свою очередь, предполагает и аналогичную точность выработки оценок орбиты ИСЗ-1.

В настоящей работе предложены два способа решения задачи по выявлению изменения орбиты ИСЗ-2, на основе анализа динамики сумм поправок к опорной орбите по радиусу-вектору ($\Delta \mathbf{r}$) и модулю вектора скорости ($\Delta \mathbf{v}$), а также сумм абсолютных значений невязок измерений за мерный интервал (μ) при решении навигационной задачи по алгоритму (1), (2):

$$\Delta \mathbf{r} = \sum_c \Delta \mathbf{r}_c, \Delta \mathbf{v} = \sum_c \Delta \mathbf{v}_c, \mu = \sum_j \sum_i |\Delta L_{ij}|. \quad (3)$$

1. *Традиционный набор статистики в модели.* Разработаны два варианта реализации этого способа:

— анализируются поправки $\Delta \mathbf{r}$ на текущем мерном интервале относительно $\Delta \mathbf{r}$ двух предшествующих интервалов (первый критерий) и текущая сумма невязок μ в сравнении с аналогичной суммой на предыдущем интервале (второй критерий);

— сравниваются $\Delta \mathbf{r}$, $\Delta \mathbf{v}$ (первый критерий) и μ (второй) с аналогичными суммами, полученными на предыдущем мерном интервале.

Для выявления импульса предусмотрены два режима расчетов — совместный (А) и раздельный (Б). В режиме А при завершении текущего мерного интервала наличие импульса

фиксируется, когда оба критерия превышают установленные пороги, при режиме Б принимается в расчет превышение соответствующего порога только одним из критериев.

На основе моделирования были выбраны диапазоны значений порогов для первого критерия 2,0—3,0, для второго — 1,25—2,5, в зависимости от пары орбит. Результаты выявления фактов изменения орбиты ИСЗ-2 по первому способу представлены в табл. 7. В графе „Фиксация“ значком „+“ отмечен формируемый алгоритмом сигнал успешного выявления изменения орбиты, здесь же после запятой указано число ложных сигналов во всей статистике из 35 решений соответствующей записи базы решений. В графе „Видимость“ приведена интегрированная характеристика возможности решения навигационной задачи по всем мерным интервалам этой записи: „различная“ означает, что часть решений вынужденно была заменена баллистическим прогнозом, на этих витках возможное изменение орбиты ИСЗ-2 не могло быть установлено.

Таблица 7

Выявление в БКУ изменения орбиты ИСЗ-2. Способ 1, вариант 1

№	Параметры опорных орбит			Видимость	Импульс, м/с	Включение		Режим	Фиксация
	ОЭ	ИСЗ-1	ИСЗ-2			витки	сеансы		
1	<i>a</i>	6679	10000	Полная	50	5	10	А	+
	<i>e</i>	0,01	0,1			10	10		+
	<i>i</i>	83,5	56,0			25	10		+,0
	Ω	8,94	0		30	5	10	А	+
	ω	-42,8	0			10	10		+
	θ	18,2	45,0			25	10		+,0
2	<i>a</i>	7000	10000	Полная	50	4	10	А	+
	<i>e</i>	0,015	0,1			15	10		+
	<i>i</i>	83,5	56,0			28	10		+,0
	Ω	0	0		40	4	50	А	-
	ω	0	0			15	100		+
	θ	18,2	45,0			28	10		+,0
3	<i>a</i>	6678	7000	Различная	50	8	10	Б	+
	<i>e</i>	0,01	0,01			20	12		+
	<i>i</i>	86	63			33	13		+,0
	Ω	0	120		40	8	10	Б	+
	ω	0	0			20	12		+
	θ	0	0			33	13		+,2
4	<i>a</i>	6680	25478	Полная	50	11	10	Б	+
	<i>e</i>	0,01	0,01			21	10		+
	<i>i</i>	86	63,5			31	10		+,0
	Ω	0	0		40	11	10	Б	+
	ω	-15	-34			21	10		+
	θ	100	45			31	10		+,0
					30	11	10	Б	+
					21	10	+		
					31	10	+,0		

Продолжение таблицы 7

№	Параметры опорных орбит			Видимость	Импульс, м/с	Включение		Режим	Фиксация
	ОЭ	ИСЗ-1	ИСЗ-2			витки	сеансы		
5	a	7378	25478	Полная	50	11	10	Б	+
	e	0,01	0,01			21	10		+
	i	86	63,5			31	10		+, 0
	Ω	120	0		30	11	10	Б	+
	ω	-15	-34			21	10		+, 1
	θ	100	45			31	10		+
6	a	7000	8238	Различная	50	6	10	А	+
	e	0,01	0,001			26	15		+
	i	56	104			34	100		+, 0
	Ω	1,20	29,5		40	6	10	А	+
	ω	-50	0			26	15		+
	θ	0	0			34	100		+, 0
7	a	7000	8258	Полная	50	6	10	А	+
	e	0,01	0,001			26	15		+
	i	56	104,1			34	100		+, 1
	Ω	120	209,78		30	4	10	А	+
	ω	-50	51,4			26	15		+
	θ	0	0			34	100		-, 0
					20	4	10	А	+
						26	15		+
						34	100		+, 0

2. *Бортовой способ* разработан на основе двух параллельно работающих программ. Первая, полетная программа, осуществляет расчет уточненной опорной орбиты (УОО) ИСЗ-2 согласно (1), (2) на основе априорных данных об орбите и модели бортовых измерений. Вторая, модельная программа, реализует исключительно модельный алгоритм, в ней опорная и истинная орбиты представляются выработанной в полетной программе УОО, на основе которой моделируются измерения; импульсы, подаваемые для изменения орбиты ИСЗ-2, в ней отсутствуют.

В динамике набора статистики взаимодействие полетной и модельной программ происходит следующим образом. В течение первого витка работает только полетная программа, рассчитывающая УОО. На втором и последующем витках функционируют обе программы параллельно. Модельная программа в процессе решения навигационной задачи вырабатывает базовые значения описанных в (3) критериев, с которыми сравниваются результаты аналогичных расчетов полетной программы. При превышении их по первому критерию в три и более раза, а по второму критерию — в 1,25 и более раз фиксируется факт изменения орбиты ИСЗ-2.

Результаты расчетов по бортовому способу представлены в табл. 8 и 9. Табл. 8 составлена для четвертой пары, но с изменением направления импульса: S — радиус-вектор орбиты, T — трансверсаль, W — бинормаль; табл. 9 — для второй и четвертой пар орбит из табл. 5, импульс направлен по трансверсали.

Таблица 8

Фиксирование на ИСЗ-1 изменения орбиты ИСЗ-2. Способ 2

№	Программа полетная						Программа модельная				Критерий			Фиксация	
	импульс			навигационные параметры			навигационные параметры				$\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2}$	$\frac{\mu_1}{\mu_2}$	режим А	режим Б	
	ориентация	модуль, м/с	виток	подача сеанс	Δv_1 , м	Δv_1 , мм/с	μ_1 , "	Δv_2 , м	Δv_2 , мм/с	μ_2 , "					
1	T	10	2	15	29,7	1,24	715	1,59	0,21	223	18,68	5,90	3,21	+	+
2	T	5	2	450	2,35	0,56	285	1,59	0,21	223	1,48	2,67	1,28	-	+
3	T	3	2	100	8,92	1,72	371	1,59	0,21	223	5,61	8,19	1,66	+	+
4	T	1	2	15	6,88	0,13	263	1,59	0,21	223	4,33	0,62	1,18	-	-
5	S	10	2	15	37,7	2,15	4807	1,59	0,21	223	23,71	10,24	21,55	+	+
6	S	5	2	100	28,74	5,14	1731	1,59	0,21	223	18,08	24,48	7,76	+	+
7	S	3	2	400	7,08	1,18	262	1,59	0,21	223	4,45	5,62	1,17	-	+
8	S	1	2	100	7,14	1,15	460	1,59	0,21	223	4,49	5,48	2,06	+	+
9	W	10	2	150	12,10	3,22	413	1,59	0,21	223	7,61	15,33	1,85	+	+
10	W	5	2	200	8,41	1,21	304	1,59	0,21	223	5,29	5,76	1,36	+	+
11	W	3	2	225	5,63	0,57	271	1,59	0,21	223	3,54	2,71	1,22	-	+
12	W	1	2	15	5,11	0,34	266	1,54	0,21	223	3,21	1,62	1,19	-	+
13	T	5	3	-	10,56	1,26	301	2,85	0,35	219	3,71	3,60	1,35	+	+

Фиксирование на ИСЗ-1 изменения орбиты ИСЗ-2. Способ 2

№	Программа полетная						Программа модельная			Критерий			Фиксация	
	импульс			навигационные параметры			навигационные параметры							
	модуль, м/с	подача												
		виток	сеанс	Δr_1 , м	Δv_1 , мм/с	μ_1 , "	Δr_2 , м	Δv_2 , мм/с	μ_2 , "	$\frac{\Delta r_1}{\Delta r_2}$	$\frac{\Delta v_1}{\Delta v_2}$	$\frac{\mu_1}{\mu_2}$	режим А	режим Б
1	3	2	100	8,92	1,72	371	1,59	0,21	223	5,61	8,19	1,66	+	+
	10	7	400	0,88	0,25	313	1,95	0,11	278	0,45	9,27	1,12	-	-
	-	8	-	18,75	2,46	410	0,63	0,81	320	29,7	3,01	1,28	+	+
2	3	2	100	8,92	1,72	371	1,59	0,21	223	5,61	8,19	1,66	+	+
	10	7	25	21,6	3,17	625	1,91	0,10	278	10,3	31,7	2,25	+	+
3	3	2	100	5,67	2,73	320	4,88	3,62	263	1,16	0,75	1,25	-	+
	10	7	400	10,83	9,07	260	7,72	5,54	212	1,40	1,61	1,22	-	-
	-	8	-	17,62	7,32	656	6,09	4,19	428	2,89	1,74	1,29	-	+
4	3	2	15	3,85	1,94	304	4,88	3,62	263	0,79	0,53	1,16	-	-
	10	7	25	10,62	3,75	485	6,74	6,00	206	1,57	0,62	2,35	-	+
5	5	2	15	7,34	3,38	389	4,88	3,62	263	1,50	0,93	1,43	-	+
	5	7	25	12,09	7,96	300	7,51	5,63	224	1,61	1,41	1,34	-	+
6	3	2	50	17,30	0,273	125	6,45	0,126	99,4	2,68	2,17	1,26	-	+
	10	7	200	14,26	0,086	396	6,21	0,126	133,0	2,30	0,68	2,98	-	+
7	1	2	50	4,64	0,074	128	6,44	0,127	99,4	0,72	0,58	1,29	-	+
	10	5	12	47,90	0,730	527	3,88	0,047	128,0	12,35	15,5	4,12	+	+
8	3	2	50	82,80	2,44	252	32,35	3,67	91,5	2,56	0,66	275,0	-	+
	10	5	200	230,2	24,99	3375	122,4	8,15	109,0	1,88	3,07	30,96	-	+
9	3	2	8	143,1	5,09	365	32,35	3,67	91,5	4,42	1,39	3,99	-	+
	10	5	12	241,0	17,66	4732	64,10	4,19	115,0	3,76	4,21	41,15	+	+
10	5	2	8	31,30	2,39	261	32,35	3,67	91,5	0,96	0,65	2,85	-	+
	5	5	12	571,5	41,6	1713	38,40	3,67	110,6	14,88	11,34	15,49	+	+

Примечание: ориентация по оси T .

Анализ табл. 7—9 показывает, что первый способ, более простой для программной реализации, позволяет уверенно определять изменение орбиты ИСЗ-2 лишь при относительно больших импульсах (20 м/с и более) и требует тонкой настройки порогов, в зависимости от пар орбит, для исключения ложных сигналов. Второй способ гораздо чувствительнее к величине импульса (1—3 м/с) и в нем практически отсутствует ложное выявление сигналов, поскольку в нем на каждом витке сравниваются два решения задачи по одному и тому же алгоритму с близкими исходными данными. При отсутствии импульсов значения критериев будут близки, а их отношения далеки от пороговых значений. Однако по сравнению с первым этот способ требует значительного усложнения программы.

Время выявления импульса зависит от времени его подачи относительно начала мерного интервала (витка). Если этот момент выпадает на первую половину или середину интервала, импульс фиксируется по его окончании, в противном случае — в течение следующего интервала или, в крайнем случае, по его завершении (табл. 8, строки 2 и 13, 7 и 14, 11 и 15).

Используя оба предложенных метода — взаимно-угловой и слежения, на каждом навигационном сеансе после определения ориентации ИСЗ-1 в ГЭИСК возможно определить на основе данных о его орбите ориентацию и в подвижной орбитальной системе координат [7—9].

Таким образом, предлагаемая автономная астрономическая система является многофункциональной; она обеспечивает решение задач навигации и ориентации собственного ИСЗ, выполнение функций формирования высокоточных навигационных определений и выявления фактов изменения орбиты наблюдаемого спутника. Выполнение всех функций обеспечивается использованием одних и тех же измерителей — ОЭП.

Предлагаемая система, основанная на пассивных измерениях, характеризуется повышенным уровнем автономности, устойчивости и помехозащищенности, не требует для своей реализации дополнительных полей и излучений. Разработанные методы могут быть использованы в автономных системах наблюдения за космическими объектами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автоматизированная система исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов: Учеб. пособие. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2006.
2. Кузнецов В. И. Автоматизированная система научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов. СПб: ВКА им. А. Ф. Можайского, 2010.
3. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Моделирование метода взаимной автономной навигации космических аппаратов: новые результаты // Изв. вузов. Приборостроение. 2005. Т. 48, № 10. С. 20—27.
4. Свид. о гос. рег. программ для ЭВМ № 2013617182 РФ. Программный комплекс расчетно-информационного обеспечения автоматизированной системы научных исследований методов и алгоритмов автономной навигации и ориентации космических аппаратов (АСНИ 1.1) / В. И. Кузнецов, Т. В. Данилова, М. А. Архипова. Заявл. 19.06.2013; опублик. 05.08.2013.
5. Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Система автономной навигации и ориентации ИСЗ, основанная на виртуальных измерениях зенитных расстояний звезд // Космические исследования. 2011. Т. 49, № 6. С. 551—562.
6. Пат. 2454631 РФ. Способ автономной навигации и ориентации космических аппаратов на основе виртуальных измерений зенитных расстояний звезд / В. И. Кузнецов, Т. В. Данилова, Д. М. Косулин. Заявл. 28.10.2010.
7. Данилова Т. В., Архипова М. А. Определение ориентации корпуса космического аппарата в геоцентрической экваториальной инерциальной системе координат на основе астроизмерений при отсутствии данных о параметрах орбиты // Изв. вузов. Приборостроение. 2013. Т. 56, № 7. С. 13—20.
8. Данилова Т. В. Автономный метод определения оценок параметров орбиты и ориентации космического аппарата в пространстве при отсутствии априорной информации // Изв. вузов. Приборостроение. 2014. Т. 57, № 5. С. 30—38.
9. Пат. 2013128117 РФ. Способ автономного определения орбиты и ориентации корпуса космического аппарата в пространстве при отсутствии априорной информации / В. И. Кузнецов, Т. В. Данилова, Д. М. Косулин, М. А. Архипова. Заявл. 18.06.2013; опублик. 27.12.2014. Бюл. № 36.

Сведения об авторах

- Владислав Иванович Кузнецов** — д-р техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, 34 отдел военного института; E-mail: vikilz@mail.ru
- Тамара Валентиновна Данилова** — канд. техн. наук; ВКА им. А. Ф. Можайского, 34 отдел военного института; E-mail: danitoma58@yandex.ru

Рекомендована ВКА

Поступила в редакцию
05.11.14 г.

Ссылка для цитирования: Кузнецов В. И., Данилова Т. В. Автономная астрономическая система навигации и слежения // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 625—638.

AUTONOMOUS ASTRONOMICAL SYSTEM FOR NAVIGATION AND TRACKING**V. I. Kuznetsov, T. V. Danilova***A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, Saint Petersburg, Russia**E-mail: danitoma58@yandex.ru*

An autonomous astronomical system for artificial satellite navigation and orientation is presented. The system makes use of "satellite–star" angle measurements with optical-electronic instruments. A reciprocal angles method and a tracking method are developed to solve the navigation problem. In both the methods, the line-of-sight direction is calculated from obtained estimates of the satellite orientation. Along with generation of high-precision navigation data on the satellite under observation, the tracking method reveals the facts of the satellite orbit change (maneuver) even under weak pulse (1—3 m/s). Results of simulation testing of the developed methods are presented.

Keywords: autonomous navigation, methods of navigation, stellar measurements, star recognition, optical-electronic device, orbit change.

Data on authors

- Vladislav I. Kuznetsov** — Dr. Sci.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department 34 of the Military Institute; E-mail: vikilz@mail.ru
- Tamara V. Danilova** — PhD; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department 34 of the Military Institute; E-mail: danitoma58@yandex.ru

Reference for citation: *Kuznetsov V. I., Danilova T. V. Autonomous astronomical system for navigation and tracking // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 8. P. 625—638 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-625-638

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СНЕЖНОГО ПОКРОВА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО МОДУЛЯ

Ф. В. САВРАСОВ

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Институт кибернетики, 634034, Томск Россия
E-mail: savrasov@tpu.ru*

Исследуется возможность повышения выработки электроэнергии фотоэлектрическим модулем за счет излучения, отраженного от снежного покрова. Проведен эксперимент по определению величины тока, вырабатываемого с помощью дополнительной подсветки от подстилающей снежной поверхности. Проведены эксперименты по определению влияния на производительность фотоэлементов снега, расположенного на поверхности модуля.

Ключевые слова: фотоэлектрический модуль, снежный покров, отраженное излучение.

Многие электронные устройства являются автономными системами, функционирующими без непосредственного участия человека. Соответственно возникает задача обеспечения непрерывного и стабильного электропитания таких устройств. В настоящее время для энергоснабжения автономных систем все большее распространение получают источники питания на основе возобновляемых видов энергии, среди которых наиболее перспективной (в силу доступности) является фотоэлектрическая [1].

Несмотря на популярность данного вида энергии за рубежом, в России его использование пока весьма ограничено, хотя в некоторых регионах страны оно целесообразно в силу климатических особенностей. Снежный покров, при определенных условиях, может выступать естественным концентратором солнечной энергии, которую возможно использовать для фотопреобразования.

Снежный покров обладает малой плотностью, возрастающей со временем. В зависимости от угла падения лучей отражательная способность (альбедо) свежеснежного покрова составляет до 90 % от значения падающего на него светового потока (для сравнения, альбедо темной почвы составляет около 10 %). Отражательная способность талого снега не более 40 % [2]. На большей части территории России снег лежит 4—5 месяцев в году, а в северных районах — 8—9 месяцев. Средняя продолжительность существования снежного покрова в г. Томске, где проводилось исследование, более 6 месяцев (преимущественно с начала октября до середины марта).

Представляет интерес исследование влияния снежного покрова на производительность фотоэлектрического модуля и, как следствие, на производительность фотоэлектрической системы в целом [3—4].

Как известно, производительность фотоэлектрического модуля зависит от интенсивности солнечного излучения и угла ориентирования приемной поверхности модуля относительно Солнца и света, отраженного от подстилающей поверхности и рассеянного в окружающей атмосфере [2].

Кроме таких параметров атмосферы, как прозрачность и облачность, большое влияние на рассеянное излучение оказывает характер подстилающей поверхности. По мере увеличения отражательной способности подстилающей поверхности значительно возрастает поток

рассеянного света. Снежный покров увеличивает отражение прямого солнечного света, вторичное рассеяние которого в атмосфере приводит к увеличению рассеянного света [5].

Упрощенная схема воздействия солнечного света на поверхность фотоэлектрического модуля приведена на рис. 1.

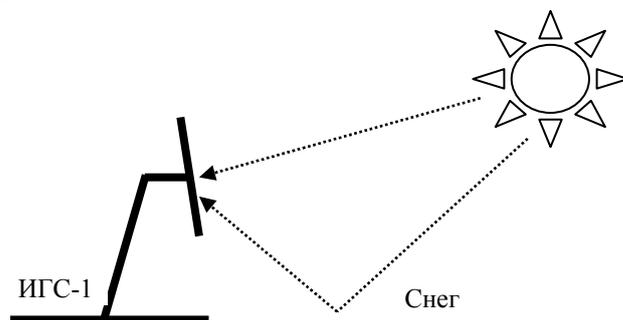


Рис. 1

Для определения влияния отражающей способности снежного покрова на величину вырабатываемой фотоэлектрическим модулем электроэнергии была разработана двухкоординатная механическая система слежения за Солнцем ИГС-1, позволяющая размещать на специальной штанге малогабаритные фотоэлектрические модули в качестве чувствительного элемента (рис. 2). Эталонным элементом выступала измерительная часть стандартного пиранометра М-80.



Рис. 2

Механическая система слежения за Солнцем позволяет вращать модуль в горизонтальной плоскости от 0 до 360° и вертикальной от 0 до 90°, также возможно размещать принимающую поверхность модуля параллельно подстилающей поверхности фотоэлектрическими преобразователями вниз.

При проведении эксперимента по определению влияния отражающей поверхности на производительность модуля использовались две механические системы. Первая была установлена на открытой незатененной горизонтальной поверхности на черное покрывало для исключения воздействия отраженного солнечного света на измерительный модуль (рис. 2), вторая — непосредственно на снежный покров.

Эксперимент проводился 08 февраля 2013 года с 10:00 до 16:00 по местному времени, использовался цифровой мультиметр М-832Р. Приемная поверхность модуля располагалась под углом к подстилающей поверхности, равным широте местности (приблизительно 56°), и была ориентирована на юг.

В эксперименте использовался фотоэлектрический модуль ФСМ-2-6 (номинальная мощность — 2 Вт, напряжение холостого хода $U_{xx} = 6$ В, ток короткого замыкания $I_{кз} = 0,5$ А,

размеры 230×145×4 мм) из монокристаллического кремния, серийно производимый в Исследовательском институте полупроводниковых приборов (Томск).

Местом проведения эксперимента была выбрана ровная площадка неподалеку от реки Томь. За весь период наблюдения Солнце не было заслонено облаками, а также строениями и деревьями, средняя температура воздуха составляла $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При проведении эксперимента было отмечено, что напряжение фотоэлектрического модуля слабо меняется в зависимости от освещенности. Результаты измерения вырабатываемого модулями тока приведены на рис. 3.

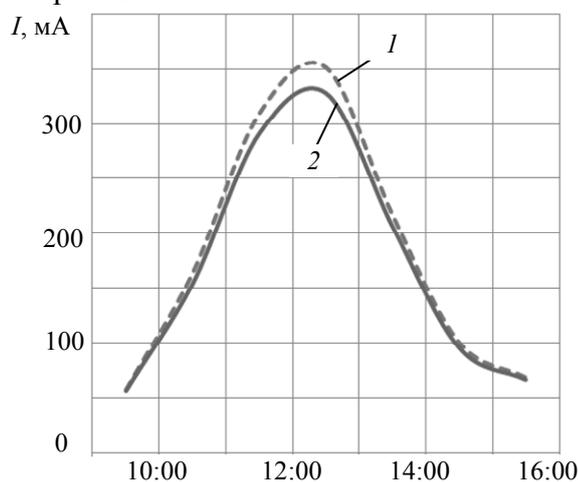


Рис. 3

Из полученных данных видно, что фотоэлектрический модуль, расположенный непосредственно на снегу (кривая 1), вырабатывает больше (до 7,3 %) энергии, чем находящийся на черном полотне (2). Следует отметить, что при различной освещенности фотоэлектрического модуля в зависимости от времени дня (и соответственно от положения Солнца на небе) существует разница в вырабатываемых токах. Так, при освещении поверхности модуля Солнцем под углом, при котором отраженная инсоляция оказывает меньшее влияние на фотопреобразователи, наблюдается снижение эффективности выработки тока.

Суммарное (за весь день) значение тока, выработанного за счет расположения фотоэлектрического модуля на снегу, превышает значение, выработанное модулем на черном полотне, на 6 %. При наличии устойчивого снежного покрова с высоким альбедо в короткие световые дни (декабрь и январь) выигрыш будет меньше, а в более длинные (март) — больше.

Таким образом, проведенный эксперимент показал, что отраженный от снежного покрова свет увеличивает вырабатываемый фотоэлектрическим преобразователем ток. Следовательно, целесообразно устанавливать фотопреобразователи, являющиеся неотъемлемой частью источников питания приборов, на поверхности с высоким альбедо (к примеру, на крыши, выкрашенные в светлые тона, крыши из оцинкованного железа и т.п.) либо на поверхности, на которых значительную часть времени года присутствует снежный покров. Также определенный вклад в выработку дополнительной энергии фотопреобразователями вносит рассеянное солнечное излучение.

С целью выявления потенциального значения тока, вырабатываемого за счет отраженного от снежного покрова света, был проведен соответствующий эксперимент. В ходе эксперимента фотоэлектрический модуль располагался (преобразователями вниз) в плоскости, параллельной солнечным лучам, по направлению к Солнцу (рис. 4). При этом с двух сторон он ограждался фанерными пластинами, окрашенными в черный цвет, для максимального снижения воздействия периферийного отраженного и рассеянного солнечного света, а также исключения воздействия прямых лучей. Измерялся вырабатываемый ток при различном типе подстилающей поверхности (снег либо фрагмент черного полотна, I_c и I_{Π} соответственно).

Также одновременно с этим измерялся ток I_r , вырабатываемый модулем, расположенным на горизонтальной поверхности преобразователями вверх (при данном расположении нет воздействия отраженной от подстилающей поверхности радиации на преобразователи). При этом снималось значение двух токовых величин: I_{r1} — для случая, когда поверхность модуля не была занесена снегом, и I_{r2} — для случая, когда на поверхность модуля был нанесен снежный слой толщиной 2 см. Последняя величина измерялась с целью определения возможности выработки модулем электроэнергии вследствие покрытия его снежным налетом (например, в случае снегопада или метели).

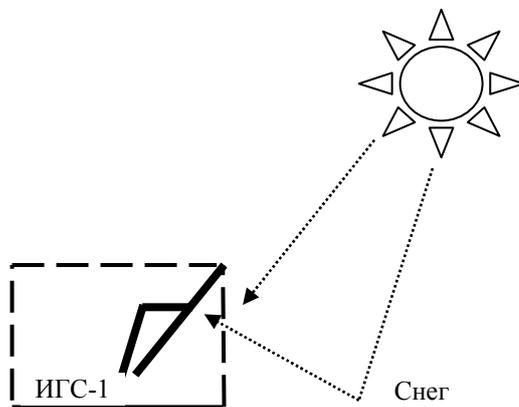


Рис. 4

Для этого эксперимента использовался фотоэлектрический модуль ФСМ-2-6. Показания снимались с помощью мультиметра М-832Р. Эксперимент проводился в течение трех дней, в одно и то же время (13:00). Даты наблюдения подбирались таким образом, чтобы произвести замеры при различных условиях облачности и насыщенности атмосферы аэрозольными составляющими (низкая облачность, дымка либо туман). Результаты измерений представлены в таблице.

Дата измерения	Температура воздуха, °С	Состояние атмосферы	I_{r1} , мА	I_{r2} , мА	I_c , мА	$I_{п}$, мА
07.03.13	-10	Пасмурно	124	75	35	15
12.03.13	-8	Ясно	311	272	199	52
13.03.13	-5	Дымка	146	97	56	23

Из результатов для горизонтально расположенного модуля следует, что в моменты, когда прямое солнечное излучение незначительно (туманный или пасмурный день), значение вырабатываемого тока в 2—2,5 раза меньше, чем при безоблачном небе. При этом зависимость значения вырабатываемого тока от состояния атмосферы не столь существенна.

За счет только отраженного от поверхности излучения фотопреобразователи способны генерировать ток, в зависимости от интенсивности инсоляции разница может быть существенной (64 % от значения тока, генерируемого прямым солнечным светом, в ясную погоду, и 28—38 % — в пасмурную погоду и туман). В зависимости от степени отражения излучения значения тока также меняются: когда отраженный свет образуется за счет прямого излучения, наличие снежного покрова способствует увеличению тока в 3,83 раза по сравнению с темной поверхностью; когда отраженный свет образуется за счет рассеянного, происходит увеличение в 2,3—2,4 раза. При этом разница между вырабатываемым током при различных типах поверхности в случае рассеянного освещения составляет 53—60 %. Необходимо отметить, что, согласно работе [6], альbedo снежной поверхности в облачную погоду превышает альbedo в ясную погоду примерно на 3—5 %.

Наличие тонкого слоя снега на поверхности монокристаллических фотопреобразователей приводит к снижению производительности: на 13 % при ясной погоде и на 34 и 40 % при наличии аэрозолей и сильной облачности. Выявленные тенденции коррелируют с данными работы [7].

Обобщая полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

— снежный покров способствует увеличению вырабатываемого фотоэлектрическим модулем из монокристаллического кремния тока до 7,3 %; в случае использования систем автоматического наведения на Солнце данная величина, по всей видимости, будет больше;

— отраженное от снежного покрова излучение и его влияние на производительность фотоэлектрического модуля в значительной степени зависят от наличия облачности и аэрозолей в атмосфере;

— запорошенность поверхности фотоэлемента может снизить его производительность на 13 % в ясную погоду, и на 40 % — в пасмурную.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Саврасов Ф. В. Применение возобновляемых источников энергии для питания измерительной аппаратуры и интеллектуальных датчиков // Информационно-измерительная техника и технологии: Матер. IV науч.-практ. конф. Томск, 2013. С. 216—220.
2. Хромов С. П., Петросяну М. А. Метеорология и климатология. М.: Изд-во МГУ, 2006. 582 с.
3. Andrews R. W., Pearce J. M. Prediction of energy effects on photovoltaic systems due to snowfall events // 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conf. (PVSC), 2012. P. 3386—3391.
4. Becker G., Schiebelsberger B., Weber W., Vodermayr C., Zehner M., Kummerle G. An Approach to the Impact of Snow on the Yield of Grid Connected PV Systems // 21th European Photovoltaic Solar Energy Conf. Dresden, Germany, 2006. P. 2732—2735.
5. Лукутин Б. В. Возобновляемые источники электроэнергии. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 187 с.
6. Wang X., Zender C. S. Arctic and Antarctic diurnal and seasonal variations of snow albedo from multiyear Baseline Surface Radiation Network measurements // J. of Geophysical Research. 2011. Vol. 116, Is. F3. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2010JF001864>.
7. Andrews R. W., Pollard A., Pearce J. M. The effects of snowfall on solar photovoltaic performance // Solar Energy. 2013. Vol. 92. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.02.014>.

Сведения об авторе

Федор Витальевич Саврасов — канд. техн. наук; Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Институт кибернетики, кафедра информатики и проектирования систем; E-mail: savrasov@tpu.ru

Рекомендована кафедрой информатики и проектирования систем

Поступила в редакцию 06.05.15 г.

Ссылка для цитирования: Саврасов Ф. В. Исследование влияния снежного покрова на производительность фотоэлектрического модуля // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 639—644.

THE EFFECT OF SNOW COVERING ON PHOTOVOLTAIC SOLAR CELL EFFICIENCY

F. V. Savrasov

National Research Tomsk Polytechnic University, Cybernetic Institute, 634034, Tomsk, Russia
E-mail: savrasov@tpu.ru

The suggestion that output power of a PV solar module may increase due to ambient radiation reflected by a snow covering is tested experimentally. The current generated by the additional radiation from underlying snow surface is determined. Experiments are performed to estimate the effect of snow on the module surface on the solar cell performance.

Keywords: photovoltaic module, snow cover, reflected radiation.

Data on author

Fedor V. Savrasov

— PhD; National Research Tomsk Polytechnic University, Cybernetic Institute, Department of Informatics and System Design;
E-mail: savrasov@tpu.ru

Reference for citation: Savrasov F. V. The effect of snow covering on photovoltaic solar cell efficiency // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 8. P. 639—644 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-639-644

ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

УДК 681.5.11
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-645-652

СИНТЕЗ СКОРОСТНОЙ ПОДСИСТЕМЫ ДВУХДВИГАТЕЛЬНОГО СЛЕДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ТЕЛЕСКОПА С ТРЕХМАССОВЫМ МЕХАНИЗМОМ ИСПОЛНИТЕЛЬНОЙ ОСИ

В. А. ТОЛМАЧЕВ, М. В. НИКИТИНА, М. Е. КОНОНОВА

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: nikitina@ets.ifmo.ru*

Предложены методика синтеза скоростной подсистемы четырехконтурной системы регулирования угла двухдвигательного следящего электропривода угломестной оси двухосного телескопа, а также методика параметрического синтеза этой системы для случая, когда исполнительная ось может быть представлена неразветвленной трехмассовой математической моделью. Представлена векторно-матричная математическая модель скоростной подсистемы, позволяющая выполнить анализ протекающих в ней динамических процессов. Проведен сравнительный анализ переходных характеристик двухдвигательной и однодвигательной скоростных подсистем, синтезированных с использованием предложенных методик и математической модели. Результаты моделирования показали, что в двухдвигательной скоростной подсистеме может быть реализована вдвое большая, по сравнению с однодвигательной, полоса пропускания частот, определяющая ее быстродействие. Это достигается как более высокой резонансной частотой механизма, так и вдвое меньшим коэффициентом соотношения масс, определяющими параметры регуляторов. Второй фактор является наиболее существенным, так как позволяет повысить быстродействие вдвое даже при близких значениях резонансных частот трехмассового механизма.

Ключевые слова: *следящий электропривод, скоростная подсистема, исполнительная ось, трехмассовый механизм, структурное решение, математическая модель, методика синтеза, сравнительный анализ.*

Введение. К актуальным задачам, возникающим при создании следящих электроприводов комплексов высокоточных оптических измерений, относятся обеспечение широкого диапазона (до 18 000) скоростей слежения при малых значениях среднеквадратичных ошибок (1—2"); обеспечение плавного движения оптической оси комплекса при инфранизких скоростях слежения (до единиц угловых секунд за секунду) в условиях жесткости конструкции осей опорно-поворотного устройства (ОПУ) [1, 2].

В работе [1] предложен вариант построения систем управления безредукторных электроприводов с применением бесконтактных высокомоментных вентильных электродвигателей и прецизионных цифровых датчиков координат с разрешающей способностью по углу менее сотых долей угловой секунды.

В решении подобных задач важную роль играет конструктивное исполнение всех элементов измерительного телескопа, и в первую очередь — осей его опорно-поворотного устройства. Угловые частоты резонанса механизма оси, вызванного крутильными деформациями,

в конечном итоге определяют полосу пропускания частот системы управления и, как следствие, ее динамическую точность.

В большинстве случаев ОПУ оптических комплексов являются двухосными и строятся по альт-азимутальному принципу [1]. Традиционно используемые безредукторные следящие электроприводы осей ОПУ являются однодвигательными. Конструкция азимутальных осей двухосных ОПУ, как правило, не позволяет использовать безредукторные двухдвигательные приводы, однако при построении угломестных осей такое решение вполне реализуемо.

Выигрыш по массогабаритным показателям обеспечивает установка на обеих полуосях вилки телескопа двигателей меньшей мощности. Однако при этом должны быть обеспечены требуемые динамические качества системы слежения.

Разработка методик синтеза и сравнительный анализ динамических характеристик однодвигательных и двухдвигательных следящих электроприводов телескопов с трехмассовыми механизмами исполнительных осей и являются задачами настоящей работы.

При построении систем управления электроприводов осей широко применяется четырехконтурная система регулирования угла поворота со структурной схемой, представленной на рис. 1 [2].

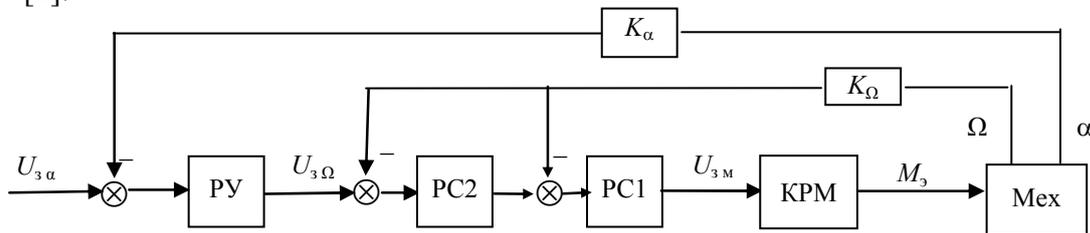


Рис. 1

Система управления содержит основной контур регулирования угла с ПИ-регулятором (ПУ) и подчиненную трехконтурную скоростную подсистему (СПС) с внутренним контуром регулирования электромагнитного момента (КРМ) и двумя внешними контурами регулирования скорости с И-регулятором PC1 и П-регулятором PC2, замкнутыми по сигналу датчика скорости двигателя с коэффициентом передачи K_Ω [3]. На входе основного контура напряжение $U_{3\alpha}$, пропорциональное заданному значению угла поворота входного конца исполнительной оси ОПУ, становится равным напряжению датчика угла с коэффициентом передачи K_α . Выходной сигнал ПУ $U_{3\Omega}$ является сигналом задания для внешнего контура регулирования скорости первой массы Ω_1 . Выходной сигнал PC1 U_{3M} является сигналом задания для КРМ.

Методика параметрического синтеза системы управления с механизмом (Мех), представляемым двухмассовой моделью, приведена в работе [4]. Такой подход может быть использован и при синтезе систем управления следящих электроприводов с трехмассовыми исполнительными осями, если их модели будут приведены к эквивалентным двухмассовым, параметрами которых являются эквивалентные моменты инерции первой и второй масс ($J_{1э}, J_{2э}$) и эквивалентный коэффициент жесткости упругой связи ($C_{12э}$).

Методика синтеза трехконтурной скоростной подсистемы с двухмассовым механизмом исполнительной оси. В работе [5] предложена процедура построения обобщенной энергетической подсистемы (ЭПС) на основе трехфазных синхронных электромеханических преобразователей (ЭМП) и трехфазного транзисторного инвертора, а также унифицированного контура регулирования электромагнитного момента с эквивалентной передаточной функцией в виде апериодического звена с коэффициентом передачи $K_{Mэ}$ и постоянной времени $T_{Mэ}$:

$$W_M(p) = \frac{M_э(p)}{U_{3M}(p)} = \frac{1/K_{Mэ}}{T_{Mэ}p + 1}. \quad (1)$$

Эквивалентная постоянная времени замкнутого контура регулирования момента $T_{Mэ}$ определяется периодом коммутации силовых ключей инвертора T_k , формирующего фазные

напряжения двигателя, она не может быть меньше $T_{мэ}=2T_k$ [6]. Далее примем $T_{мэ}=400$ мкс, что соответствует частоте коммутации силовых ключей инвертора напряжения 10 кГц.

Для возможности использования известной [4] методики синтеза однодвигательной скоростной подсистемы следящего электропривода со структурой, представленной на рис. 1, и двухмассовым механизмом необходимо знать коэффициент соотношения масс γ и угловую частоту механического резонанса ω_0 .

Внутренний контур регулирования скорости настраивается на технический оптимум из условия реализации полосы пропускания частот $2\omega_{0p}$, определяемой по формуле

$$\omega_{0p} < \omega_0 / \sqrt[4]{\gamma^3}, \quad (2)$$

где

$$\gamma = \frac{J_{1э} + J_{2э}}{J_{1э}}. \quad (3)$$

При этом коэффициент передачи $K_{п}$ РС2 рассчитывается по формуле

$$K_{п} = \frac{(J_{1э} + J_{2э})K_{мэ}}{2T_{\mu}K_{\Omega}}, \quad (4)$$

где T_{μ} — фиктивная некомпенсированная постоянная времени контура, при безынерционном датчике скорости этот параметр определяется как

$$T_{\mu} = 1/2\omega_{0p}. \quad (5)$$

Внешний контур регулирования скорости синтезируется из условия обеспечения настройки на технический оптимум, при которой передаточная функция его принимает вид

$$W_{\Omega}(p) = \frac{\Omega(p)}{U_{3\Omega}(p)} = \frac{1/K_{\Omega}}{8T_{\mu}^2 p^2 + 4T_{\mu} p + 1}. \quad (6)$$

Для настройки на технический оптимум значение постоянной времени интегрирования И-регулятора скорости РС1 должно составлять

$$T_{и} = 4T_{\mu}. \quad (7)$$

При этом полоса пропускания частот внешнего контура регулирования скорости равна ω_{0p} , а расчетное время реакции контура на скачок задающего воздействия — $12T_{\mu}$.

Передаточной функции (6) соответствует реакция контура на скачкообразное изменение задающего воздействия $U_{3\Omega}$:

$$\Omega(t) = \frac{U_{3\Omega}}{K_{\Omega}} \left[1 - e^{-\frac{t}{4T_{\mu}}} \left(\cos \frac{t}{4T_{\mu}} + \sin \frac{t}{4T_{\mu}} \right) \right]. \quad (8)$$

Математическая модель трехконтурной скоростной подсистемы с трехмассовым механизмом исполнительной оси. При выборе структурного решения будем ориентироваться на рекомендации, сформулированные в работе [6] на основе анализа механических переходных процессов в двухдвигательном трехмассовом механизме угломестной оси с симметричной конструкцией, — структурное решение должно обеспечивать равенство вращающих моментов в статическом и динамическом режимах работы системы.

Указанным рекомендациям удовлетворяет система со структурным решением скоростной подсистемы, представленным на рис. 2. Подсистема содержит трехмассовый механизм с неразветвленной схемой замещения, два контура регулирования электромагнитных моментов двигателей с эквивалентными передаточными функциями (1), два контура регулирования скорости (внутренний и внешний). И-регулятор внешнего контура регулирования скорости представлен на рисунке детализированной структурной схемой (ДСС).

Трехмассовый механизм характеризуется угловыми скоростями первой, второй и третьей масс $\Omega_1, \Omega_2, \Omega_3$, моментами упругих связей M_{12} и M_{23} , вращающимися моментами на полуосях M_1

и M_2 , крутильными жесткостями левого и правого валов оси C_{12} и C_{23} , суммарными моментами инерции левого и правого валов вместе с роторами двигателей J_1, J_3 , моментом инерции трубы телескопа J_2 . Возмущающими воздействиями на механизм являются моменты трения в опорах оси M_{c1} и M_{c3} и ветровой момент M_{c3} , действующий на трубу телескопа.

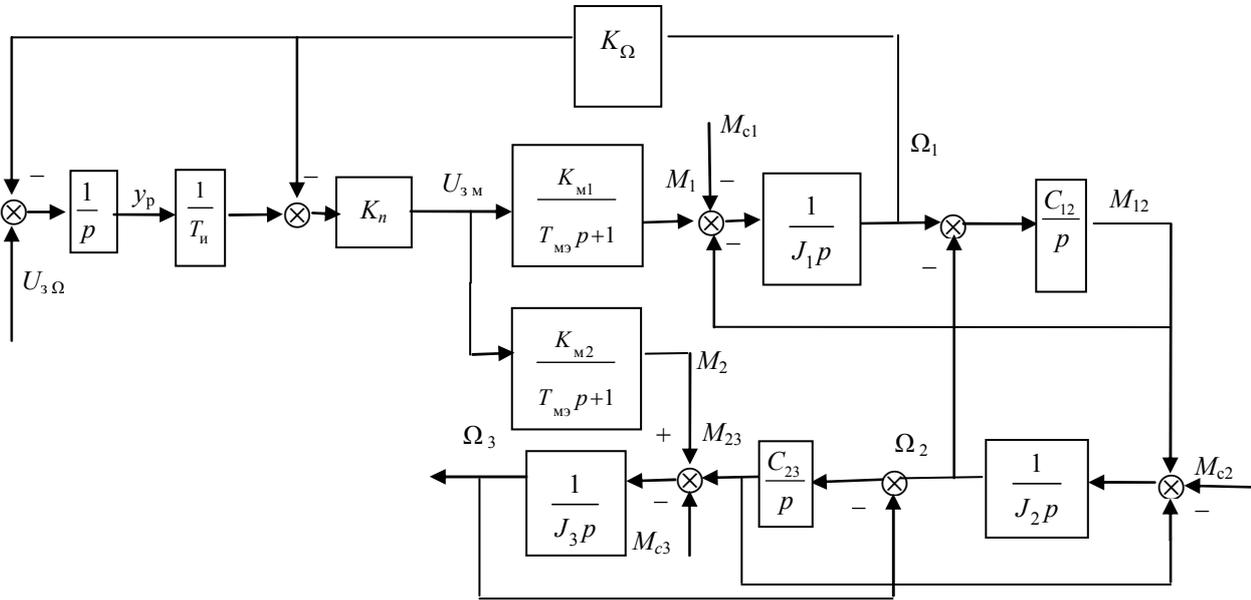


Рис. 2

Полагаем, что моменты инерции роторов двигателей пренебрежимо малы по сравнению с моментами инерции опор. Следует заметить, что это в полной мере относится к вентильным двигателям на основе синхронных машин с постоянными магнитами на роторе.

Векторно-матричная математическая модель подсистемы может быть представлена уравнением

$$dY/dt = AY + BU, \tag{9}$$

где $Y^T = [M_1 \ M_2 \ \Omega_1 \ M_{12} \ \Omega_2 \ M_{23} \ \Omega_3 \ y_p]$ — вектор состояния, элементом y_p которого является выходной сигнал интегратора ДСС РС2, $U^T = [U_{3\Omega} \ M_{c1} \ M_{c2} \ M_{c3}]$ — вектор управления, A — матрица системы

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_{MЭ}} & 0 & -\frac{K_{\Omega 1} K_{п} K_{M1}}{T_{MЭ}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{п} K_{M1}}{T_{MЭ} T_{и}} \\ 0 & -\frac{1}{T_{MЭ}} & -\frac{K_{\Omega 1} K_{п} K_{M2}}{T_{MЭ}} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{п} K_{M2}}{T_{MЭ} T_{и}} \\ \frac{1}{J_1} & 0 & 0 & -\frac{1}{J_1} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{12} & 0 & -C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_2} & 0 & -\frac{1}{J_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{23} & 0 & -C_{23} & 0 \\ 0 & \frac{1}{J_3} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{J_3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{\Omega 1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

B — (8×4) -матрица управления, ненулевыми элементами b_{ik} которой являются $b_{32} = -1/J_1$, $b_{53} = -1/J_2$, $b_{74} = -1/J_3$, $b_{81} = 1$.

Предложенная модель позволяет исследовать процессы в системе как с двухдвигательным, так и с однодвигательным механизмом исполнительной оси, для чего в программе расчета необходимо положить $K_{M2}=0$.

Примем следующие значения параметров механизма: $J_1=J_3=50$ кг·м², $J_2=400$ кг·м², $C_{12}=C_{23}=8 \cdot 10^6$ Н·м/рад, $K_{\Omega 1}=10$ В·с, $K_{M1}=K_{M2}=100$ Н·м/В, $T_{M3}=400$ мкс.

Синтез и моделирование однодвигательной скоростной подсистемы. Согласно рекомендациям [7], при синтезе систем управления с многомассовыми механизмами следует ориентироваться на низшую из резонансных частот, в рассматриваемом случае рассчитываемых по формулам [3]:

$$\omega_{p1} = \sqrt{\left(1 - \sqrt{1 - 4 \frac{b}{a^2}}\right) \frac{a}{2}}, \quad \omega_{p2} = \sqrt{\left(1 + \sqrt{1 - 4 \frac{b}{a^2}}\right) \frac{a}{2}}, \quad (10)$$

где

$$a = \frac{C_{12}J_3(J_1 + J_2) + C_{23}J_1(J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}, \quad b = \frac{C_{12}C_{23}(J_1 + J_2 + J_3)}{J_1J_2J_3}.$$

При принятых параметрах механизма по формулам (10) получим $f_{p1}=63,7$, $f_{p2}=71,2$ Гц. Параметрами эквивалентного двухмассового механизма при этом будут $J_{13}=J_1$, $J_{23}=J_2+J_3$, $C_{123}=C_{12}$. Далее по формуле (3) находим $\gamma=10$, по (2) и (5) — $T_{\mu}=0,007$ с, по (4) — $K_{\Pi}=35,75$ (при расчете K_{Π} следует положить $K_{M3}=K_{M1}$).

Результаты моделирования реакции однодвигательной системы с датчиком скорости, установленным на валу двигателя, на скачок задающего воздействия $U_{3\Omega}=0,01$ В, соответствующий заданному значению скорости вращения $0,001$ 1/с, представлены на рис. 3. Моделирование проводилось с использованием модели (9) при $K_{M2}=0$ и нулевых моментах нагрузки на массах.

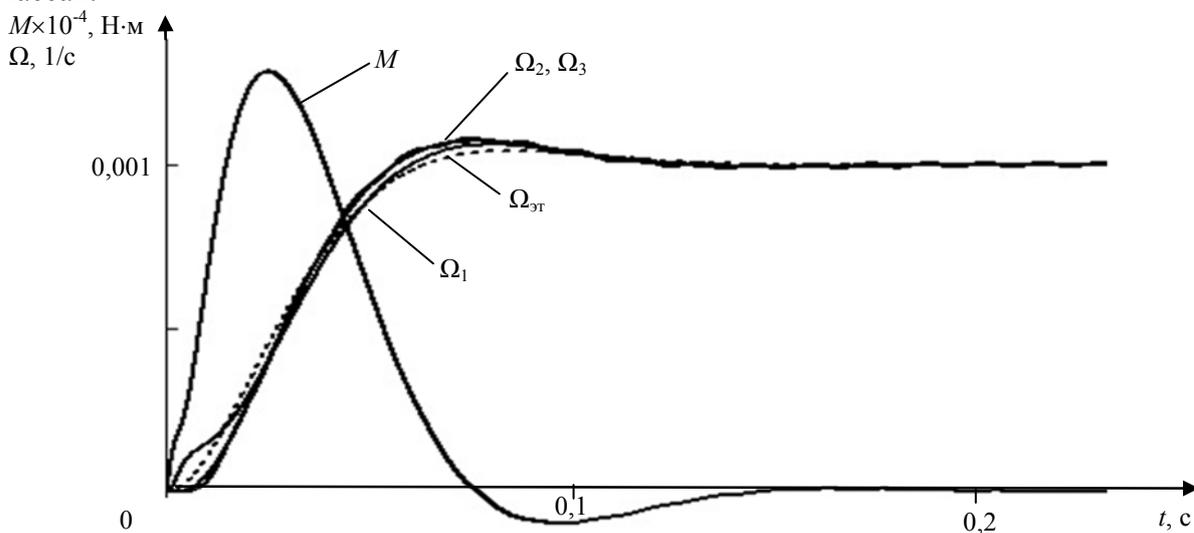


Рис. 3

Учет влияния моментов нагрузки на статические и динамические характеристики трехконтурной скоростной подсистемы с линейными алгоритмами управления остается за рамками настоящей работы и подлежит более детальному исследованию.

Синтез и моделирование двухдвигательной скоростной подсистемы. Будем полагать, что при использовании ЭМП даже с незначительно различающимися технологическими параметрами путем соответствующих настроек могут быть реализованы контуры регулирования момента с одинаковыми параметрами ($K_{M1}=K_{M2}=K_M$ и $T_{M31}=T_{M32}=T_{M3}$). Это гарантирует $M_1 = M_2$ в статическом и динамическом режимах работы привода при одинаковом сигнале задания U_{3M} на входах контуров регулирования момента. Полагается

также, что суммарный электромагнитный момент двух двигателей обеспечит требуемые максимальные скорости и ускорения исполнительной оси. В этом случае динамические характеристики однодвигательных и двухдвигательных приводов могут быть сопоставлены вне зависимости от возможного разброса параметров ЭМП.

В работе [6] показано, что двухдвигательный трехмассовый механизм симметричного типа с $M_1=M_2$ может быть представлен эквивалентной двухмассовой моделью с $J_{13}=J_1+J_3$, $J_2=J_2$, $C_{123}=C_{12}+C_{23}$ и наибольшей резонансной частотой трехмассового механизма ω_{p2} из рассчитываемых по формулам (10). При этом вращающий момент на входной оси вдвое превышает каждый из вращающих моментов трехмассовой модели, т.е. $M_3=M_1+M_2$, так что при расчете K_{Π} в формуле (4) следует положить $K_{M3}=2K_{M1}$. Далее по формуле (3) находим $\gamma=5$, по (2) и (5) — $T_{\mu}=0,00375$ с, по (4) — $K_{\Pi}=33,35$.

Результаты моделирования реакции двухдвигательной системы с указанными выше параметрами на скачок задающего воздействия $U_3 \Omega=0,01$ В представлены на рис. 4. Моделирование проводилось с использованием модели (9) при $K_{M1}=K_{M2}=100$ Н·м/В и нулевых моментах нагрузки.

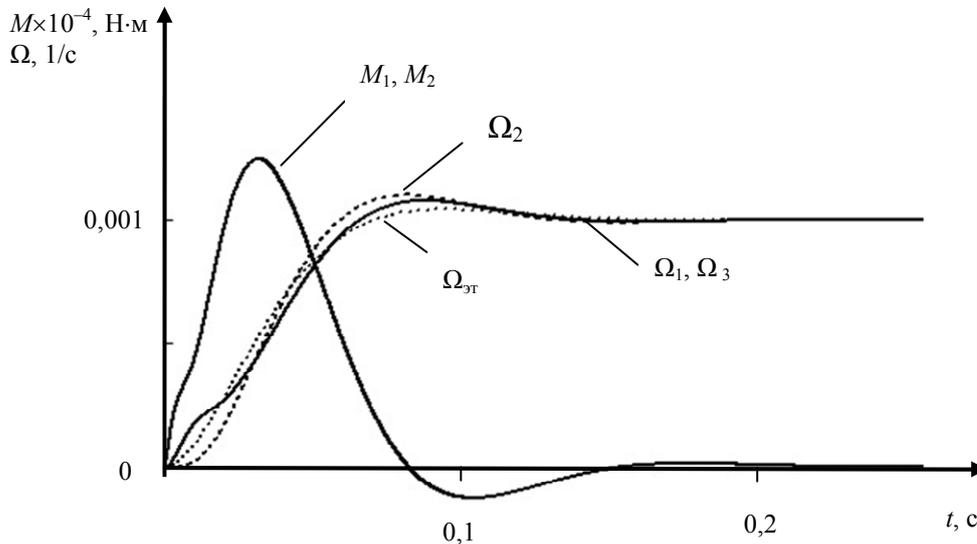


Рис. 4

Сравнение процессов, представленных на рис. 3 и 4, показывает, что:

- в обоих случаях кривые скоростей всех масс близки к эталонным, это подтверждает правомерность предложенных методик синтеза и корректность математических моделей;
- в двухдвигательной скоростной подсистеме с предложенным структурным решением может быть достигнуто практически вдвое большее быстродействие по сравнению с однодвигательной, при сохранении принятого критерия настройки;
- величина максимального суммарного электромагнитного момента двигателей, развиваемого в процессе отработки одного и того же задающего воздействия практически вдвое превышает значение максимального момента, развиваемого двигателем однодвигательной системы, что связано с необходимостью обеспечения вдвое больших мгновенных ускорений.

Заключение. В работе предложены математическая модель СПС следящего электропривода угломестной оси ОПУ телескопа с двумя двигателями и методика синтеза регуляторов контуров регулирования момента, скорости при заданных параметрах ЭМП с последовательной трехмассовой моделью механизма исполнительской оси.

Результаты моделирования в среде MathCad переходных процессов синтезируемой системы с использованием расчетных соотношений, полученных в работе, совпадают с эталонными кривыми, что подтверждает корректность предложенной методики.

Результаты моделирования показали, что в двухдвигательной скоростной подсистеме может быть реализована вдвое большая, по сравнению с однодвигательной подсистемой, полоса пропускания частот, определяющая ее быстродействие. Это достигается как более высокой резонансной частотой механизма, так и вдвое меньшим коэффициентом соотношения масс, определяющими параметры регуляторов. Второй фактор является наиболее существенным, так как позволяет повысить быстродействие вдвое даже при близких значениях резонансных частот трехмассового механизма.

Предложенные в работе математическая модель СПС и методика ее синтеза могут быть использованы при исследовании различных режимов работы следящего электропривода угломестной оси ОПУ телескопа, а также при проектировании и исследовании режимов работы структур с трехмассовыми моделями механизма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садовников М. А., Томасов В. С., Толмачев В. А. Прецизионный электропривод для оптических комплексов контроля космического пространства // Изв. вузов. Приборостроение. 2011. Т. 54, № 6. С. 81—86.
2. Васильев В. Н., Томасов В. С., Шаргородский В. Д., Садовников М. А. Состояние и перспективы развития прецизионных электроприводов комплексов высокоточных наблюдений // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 5—12.
3. Ключев В. И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.
4. Толмачев В. А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 68—72.
5. Толмачев В. А., Антипова И. В., Фомин С. Г. Математическая модель следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. 2007. Вып. 44. С. 142—146.
6. Толмачев В. А., Никитина М. В., Сергеева М. Е. Сравнительный анализ динамических свойств трехмассовых исполнительных осей с одним и двумя вращающимися моментами // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 6. С. 458—463.
7. Борцов Ю. А., Соколовский Г. Г. Автоматизированный электропривод с упругими связями. СПб: Энергоатомиздат, 1992. 288 с.

Сведения об авторах

- Валерий Александрович Толмачев** — канд. техн. наук, доцент; Университет ИТМО; кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;
E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru
- Мария Владимировна Никитина** — канд. техн. наук; Университет ИТМО; кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;
E-mail: nikitina@ets.ifmo.ru
- Мария Евгеньевна Кононова** — аспирант; Университет ИТМО; кафедра электротехники и прецизионных электромеханических систем;
E-mail: sergeeva_maria@ets.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
электротехники и прецизионных
электромеханических систем

Поступила в редакцию
12.05.15 г.

Ссылка для цитирования: Толмачев В. А., Никитина М. В., Кононова М. Е. Синтез скоростной подсистемы двухдвигательного следящего электропривода телескопа с трехмассовым механизмом исполнительной оси // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 645—652.

SYNTHESIS OF A SPEED SUBSYSTEM OF TWO-MOTOR SERVO DRIVE OF A TELESCOPE WITH THREE-MASS ACTUATING AXLE

V. A. Tolmachev, M. V. Nikitina, M. E. Kononova

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: nikitina@ets.ifmo.ru

The structural solution and speed subsystem synthesis method for 4-loop control system for angle of twin-motor servo drive of biaxial telescope elevation axle are presented. A parametric method of the system synthesis is developed for the case when the executive axle may be represented with a three-mass unbranched mathematical model. A vector-matrix mathematical model of speed subsystem suitable for the dynamic processes analysis is proposed. A comparative analysis of the transient characteristics of speed subsystems designed with the use of the described method and mathematical model is carried out for one- and two-motor servo drive of the telescope. Results of simulation demonstrate that with the two-motor speed, the frequency bandwidth determining its speed, may be twice as large as with the one-motor subsystem. The difference is achieved due to higher resonant frequency of the two-motor mechanism, and halved the mass ratio defining the regulators parameters. The second factor is the most important, as it allows to double the speed even with close values of the three-mass mechanism resonance frequencies.

KEYWORDS: servo drive, speed subsystem, actuating axle, three-mass mechanism, structural solution, mathematical model, method of synthesis, comparative analysis.

Data on authors

- Valery A. Tolmachev** — PhD, Associate Professor; ITMO University, Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems;
E-mail: tolmachev@ets.ifmo.ru
- Maria V. Nikitina** — PhD; ITMO University, Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems; E-mail: nikitina@ets.ifmo.ru
- Maria E. Kononova** — Post-Graduate Student; ITMO University, Department of Electrical Engineering and Precision Electromechanical Systems;
E-mail: sergeeva_maria@ets.ifmo.ru

Reference for citation: Tolmachev V. A., Nikitina M. V., Kononova M. E. Synthesis of a speed subsystem of two-motor servo drive of a telescope with three-mass actuating axle // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 8. P. 645—652 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-645-652

ИМПУЛЬСНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КОМПЛЕКСНОГО ПОЛОСОВОГО ФИЛЬТРА БАТТЕРВОРТА

С. И. ЗИАТДИНОВ

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
190000, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: kaf53@guap.ru

На основании теории вычетов в общем виде получены выражения для частотной передаточной функции комплексного полосового фильтра Баттерворта. Показано, что импульсная характеристика комплексного фильтра также является комплексной и содержит вещественную и мнимую составляющие, сдвинутые по фазе на 90° . Для преобразования вещественного фильтра низких частот в фильтр Баттерворта необходимо импульсную характеристику фильтра низких частот умножить на комплексный гармонический сигнал с заданной частотой. Предложена методика расчета вещественной и мнимой составляющих импульсной характеристики комплексного полосового фильтра Баттерворта различных порядков. Рассмотрены конкретные примеры.

Ключевые слова: комплексный полосовой фильтр, частотная передаточная функция, импульсная характеристика, полюсы.

При решении задач фильтрации полезного сигнала на фоне шумов, восстановления непрерывного сигнала по его периодическим отсчетам и т.д. используются фильтры нижних частот (ФНЧ). Среди ФНЧ можно выделить фильтры Баттерворта, обладающие гладкой амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) в зоне прозрачности и достаточно резким спадом коэффициента передачи за ее пределами.

Вместе с тем представляет интерес построение комплексного полосового фильтра Баттерворта, средняя частота АЧХ которого могла бы перестраиваться, принимая как положительные, так и отрицательные значения. Для исследования особенностей прохождения сигнала через полосовой фильтр необходимо знать его импульсную характеристику, нахождение которой и является целью настоящей работы.

В общем виде [1] частотная передаточная функция фильтра Баттерворта может быть представлена следующим образом:

$$W_s(p) = \frac{\left| \prod_{i=1}^s p_i \right|}{\prod_{i=1}^s (p - p_i)}, \quad (1)$$

где s — порядок фильтра; p_i — полюсы передаточной функции.

После несложных преобразований уравнения (1) представим выражение для частотной передаточной функции комплексного фильтра Баттерворта нечетного порядка:

$$W_s(p) = \frac{0,5\omega_{cp}^s}{\prod_{i=1}^{(s-1)/2} \left[(p - p_0)^2 + 2a_i\omega_{cp}(p - p_0) + \omega_{cp}^2 \right] (p - p_0 + \omega_{cp})}. \quad (2)$$

Для фильтра Баттерворта четного порядка передаточная функция имеет вид

$$W_s(p) = \frac{0,5\omega_{\text{cp}}^s}{\prod_{i=1}^{s/2} [(p-p_0)^2 + 2a_i\omega_{\text{cp}}(p-p_0) + \omega_{\text{cp}}^2]} \quad (3)$$

В соотношениях (2) и (3) $p = j\omega$; ω — круговая частота; ω_0 — средняя частота АЧХ фильтра; ω_{cp} — частота среза фильтра, отсчитываемая относительно средней частоты ω_0 ; $p_0 = j\omega_0$. При этом для фильтра четного порядка $a_i = \cos \pi(i-0,5)/s$, нечетного — $a_i = \cos \pi i / s$.

Импульсная характеристика как реакция фильтра на δ -функцию определяется следующим соотношением [2, 3]:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} W_s(p) e^{pt} dp = \sum_{i=1}^s \text{res}_i, \quad (4)$$

где $\sum_{i=1}^s \text{res}_i$ — сумма вычетов в подынтегральной функции выражения.

Представим подынтегральную функцию в виде

$$W_s(p) e^{pt} = P(p) / Q(p),$$

где $P(p) = \omega_0^s e^{pt}$, а

$$Q(p) = \prod_{i=1}^{(s-1)/2} [(p-p_0)^2 + 2a_i\omega_{\text{cp}}(p-p_0) + \omega_{\text{cp}}^2] (p-p_0 + \omega_{\text{cp}})$$

для фильтра нечетного порядка и

$$Q(p) = \prod_{i=1}^{s/2} [(p-p_0)^2 + 2a_i\omega_{\text{cp}}(p-p_0) + \omega_{\text{cp}}^2]$$

— для фильтра четного порядка.

Тогда вычеты функции $P(p) / Q(p)$ в точках $p = p_i$ определяются формулами

$$\text{res}_i = \frac{P(p)}{\left[\frac{dQ(p)}{dp} \right]} \text{ при } p = p_i. \quad (5)$$

При этом импульсная характеристика фильтра принимает вид

$$h(t) = \sum_{i=1}^s \frac{P(p)}{\left[\frac{dQ(p)}{dp} \right]} \text{ при } p = p_i. \quad (6)$$

Переходная характеристика фильтра как реакция на единичное входное воздействие [4] может быть найдена из выражения

$$g(t) = \int_0^t h(\tau) d\tau.$$

Фильтр Баттерворта первого порядка. Из соотношения (2) находим, что

$$W_1(p) = \frac{0,5\omega_{\text{cp}}}{(p-p_0) + \omega_{\text{cp}}}.$$

Эта частотная передаточная функция имеет один комплексный полюс $p_1 = p_0 - \omega_{\text{cp}} = j\omega_0 - \omega_{\text{cp}}$. Тогда $Q(p) = (p-p_0) + \omega_{\text{cp}}$, а $dQ(p) / dp = 1$.

В результате, согласно (6), импульсная характеристика фильтра Баттерворта первого порядка определяется выражением

$$h(t) = 0,5\omega_{\text{cp}} \left(e^{j\omega_0 t - \omega_{\text{cp}} t} + e^{j\omega_0 t - \omega_{\text{cp}} t} \right) = \omega_{\text{cp}} e^{-\omega_{\text{cp}} t} (\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t).$$

Таким образом, импульсная характеристика комплексного фильтра Баттерворта носит комплексный характер.

Фильтр Баттерворта второго порядка. Из выражения (3) находим частотную передаточную функцию рассматриваемого фильтра

$$W_2(p) = \frac{0,5\omega_{\text{cp}}^2}{(p - p_0)^2 + 2a_1\omega_{\text{cp}}(p - p_0) + \omega_{\text{cp}}^2},$$

где $a_1 = \cos(\pi/4) = 1/\sqrt{2}$.

При этом

$$Q(p) = (p - p_0)^2 + 2a_1\omega_{\text{cp}}(p - p_0) + \omega_{\text{cp}}^2 \text{ и } dQ(p)/dp = 2p + 2a_1\omega_{\text{cp}}.$$

Частотная передаточная функция $W_2(p)$ имеет два комплексных полюса

$$p_{1,2} = \left(-a_1 \pm j\sqrt{1 - a_1^2} \right) \omega_{\text{cp}} + j\omega_0.$$

После подстановки этих полюсов в выражение (5) получим

$$\text{res}_{1,2} = \omega_{\text{cp}} \frac{e^{\left(-a_1 \pm j\sqrt{1 - a_1^2} \right) \omega_{\text{cp}} t + j\omega_0 t}}{\pm 2j\sqrt{1 - a_1^2}}.$$

В результате импульсную характеристику фильтра Баттерворта второго порядка можно представить следующим образом:

$$h(t) = \text{res}_1 + \text{res}_2 = \sqrt{2}\omega_{\text{cp}} e^{-\frac{\omega_{\text{cp}}}{\sqrt{2}} t} \sin \frac{\omega_{\text{cp}}}{\sqrt{2}} t (\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t).$$

Фильтр Баттерворта третьего порядка. Для этого фильтра частотная передаточная функция имеет вид

$$W_3(p) = \frac{0,5\omega_{\text{cp}}^3}{\left[(p - p_0)^2 + 2a_1\omega_{\text{cp}}(p - p_0) + \omega_{\text{cp}}^2 \right] (p - p_0 + \omega_{\text{cp}})},$$

где $a_1 = \cos(\pi/3) = 0,5$. Тогда

$$Q(p) = \left[(p - p_0)^2 + 2a_1\omega_{\text{cp}}(p - p_0) + \omega_{\text{cp}}^2 \right] (p - p_0 + \omega_{\text{cp}}), \\ dQ(p)/dp = 3(p - p_0)^2 + 4\omega_{\text{cp}}(p - p_0) + 2\omega_{\text{cp}}^2.$$

Полюсы частотной передаточной функции фильтра можно представить следующим образом:

$$p_1 = j\omega_0 - \omega_{\text{cp}}; \quad p_{2,3} = -\frac{\omega_{\text{cp}}}{2} \pm \sqrt{\frac{\omega_{\text{cp}}^2}{4} - \omega_{\text{cp}}^2} + j\omega_0 = \frac{\omega_{\text{cp}}}{2} (-1 \pm j\sqrt{3}) + j\omega_0.$$

При этом вычеты в точках $p = p_{1,2,3}$ определяются выражениями

$$\text{res}_1 = \omega_{\text{cp}} e^{-\omega_{\text{cp}} t + j\omega_0 t}; \quad \text{res}_{2,3} = \omega_{\text{cp}} \frac{e^{-0,5\omega_{\text{cp}} t} e^{\pm j0,5\sqrt{3}\omega_{\text{cp}} t + j\omega_0 t}}{-1,5 \pm j0,5\sqrt{3}}.$$

В результате импульсная характеристика фильтра Баттерворта третьего порядка будет иметь вид

$$h(t) = \text{res}_1 + \text{res}_2 + \text{res}_3 = \\ = \omega_{\text{cp}} \left[e^{-\omega_{\text{cp}} t} + e^{-0,5\omega_{\text{cp}} t} \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \sin 0,5\sqrt{3}\omega_{\text{cp}} t - \cos 0,5\sqrt{3}\omega_{\text{cp}} t \right) \right] (\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t).$$

Фильтр Баттерворта четвертого порядка. Частотная передаточная функция для фильтра четвертого порядка имеет вид

$$W_4(p) = \frac{0,5\omega^4}{\left[(p-p_0)^2 + 2a_1\omega_{\text{cp}}(p-p_0) + \omega_{\text{cp}}^2 \right] \left[(p-p_0)^2 + 2a_2\omega_{\text{cp}}(p-p_0) + \omega_{\text{cp}}^2 \right]},$$

где $a_1 = \cos(\pi/8)$, $a_2 = \cos(3\pi/8)$.

Нетрудно показать, что функция $Q(p)$ в этом случае записывается следующим образом:

$$Q(p) = (p-p_0)^4 + b_3(p-p_0)^3 + b_2(p-p_0)^2 + b_1(p-p_0) + \omega_{\text{cp}}^4,$$

где $b_1 = 2(a_1 + a_2)\omega_{\text{cp}}^3$; $b_2 = 2(1 + 2a_1a_2)\omega_{\text{cp}}^2$; $b_3 = 2(a_1 + a_2)\omega_{\text{cp}}$.

При этом

$$dQ(p)/dp = 4(p-p_0)^3 + 3b_3(p-p_0)^2 + 2b_2(p-p_0) + b_1.$$

Полюсы частотной передаточной функции $W_4(p)$ определяются соотношениями

$$p_{1,2} = (-a_1 \pm j\sqrt{1-a_1^2})\omega_{\text{cp}} + j\omega_0, \quad p_{3,4} = (-a_2 \pm j\sqrt{1-a_2^2})\omega_{\text{cp}} + j\omega_0.$$

В результате вычеты функции $W_4(p)$ в точках $p = p_{1,2,3,4}$ можно найти из соотношений

$$\text{res}_{1,2} = 0,5\omega_{\text{cp}}^4 \frac{e^{-c_1 t \pm j c_2 + j \omega_0 t}}{d_1 \pm j k_1}; \quad \text{res}_{3,4} = 0,5\omega_{\text{cp}}^4 \frac{e^{-c_3 t \pm j c_4 + j \omega_0 t}}{d_2 \pm j k_2},$$

где $c_1 = -a_1\omega_{\text{cp}}$; $c_2 = \sqrt{1-a_1^2}\omega_{\text{cp}}$; $c_3 = -a_2\omega_{\text{cp}}$; $c_4 = \sqrt{1-a_2^2}\omega_{\text{cp}}$;

$$d_1 = 4c_1^3 - 12c_2^2c_1 + 3b_3c_1^2 - 3b_3c_2^2 + 2b_2c_1 + b_1;$$

$$k_1 = 12c_1^2c_2 - 4c_2^3 + 6b_3c_1c_2 + 2b_2c_2;$$

$$d_2 = 4c_3^3 - 12c_4^2c_3 + 3b_3c_3^2 - 3b_3c_4^2 + 2b_2c_3 + b_1;$$

$$k_2 = 12c_3^2c_4 - 4c_4^3 + 6b_3c_3c_4 + 2b_2c_4.$$

Тогда импульсная характеристика фильтра принимает вид

$$h(t) = \sum_{i=1}^8 \text{res}_i = \omega_{\text{cp}}^4 \left[(2d_1 \sin c_2 t + 2k_1 \cos c_2 t) + \right. \\ \left. + \frac{e^{c_3 t}}{d_2^2 + k_2^2} (2d_2 \sin c_4 t + 2k_2 \cos c_4 t) \right] (\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t).$$

Проанализировав полученные результаты, можно отметить, что импульсная характеристика комплексного фильтра также является комплексной. Для преобразования фильтра нижних частот в комплексный полосовой фильтр достаточно импульсную характеристику фильтра нижних частот умножить на $(\cos \omega_0 t + j \sin \omega_0 t)$. Рассмотренную методику получения импульсной характеристики легко распространить на комплексные полосовые фильтры Баттерворта более высоких порядков.

В качестве примера на рис. 1 приведены АЧХ комплексных фильтров Баттерворта первого, второго и четвертого порядков для случая $f_0 = \omega_0 / 2\pi = 15$ Гц; $f_{cp} = \omega_{cp} / 2\pi = 20$ Гц. На рис. 2 для такого случая приведены вещественная и мнимая составляющие импульсной характеристики фильтра Баттерворта второго порядка.

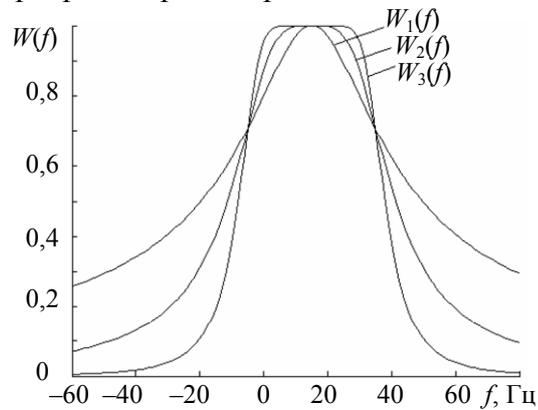


Рис. 1

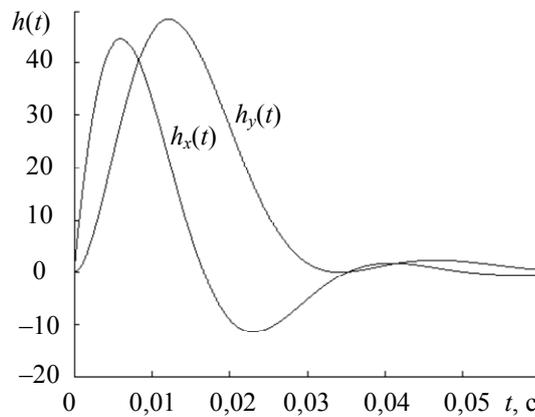


Рис. 2

Полученные теоретические результаты могут быть использованы при решении различных задач обработки сигналов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зиатдинов С. И., Гусев А. И., Елисеев А. А.* Цифровой фильтр Баттерворта с малым динамическим диапазоном значений весовых коэффициентов // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 9. С. 26—33.
2. *Зиатдинов С. И.* Импульсная и переходная характеристики системы автоматического регулирования с узкополосными сглаживающими цепями // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49, № 10. С. 30—32.
3. *Бесекерский В. А.* Цифровые автоматические системы. М.: Наука, 1976. 575 с.
4. *Воробьев С. Н.* Цифровая обработка сигналов. М.: Академия, 2013. 320 с.

Сведения об авторе

Сергей Ильич Зиатдинов — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения; E-mail: kaf53@guar.ru

Рекомендована кафедрой
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию
08.12.14 г.

Ссылка для цитирования: *Зиатдинов С. И.* Импульсная характеристика комплексного полосового фильтра Баттерворта // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 653—658.

PULSE CHARACTERISTIC OF BUTTERWORTH COMPLEX BANDPASS FILTER**S. I. Ziatdinov***Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
190000, Saint Petersburg, Russia**E-mail: kaf53@guap.ru*

General expressions for frequency transfer function of Butterworth complex bandpass filter are derived with the use of the residue theory. The pulse characteristic of a complex filter is shown to be a complex one, phase-shift between the real and imaginary components of the function equals 90° . A method is proposed for calculating the real and imaginary components of the pulse characteristic of a complex Butterworth bandpass filter of arbitrary order. Concrete examples are presented.

Keywords: complex bandpass filter, frequency transfer function, pulse characteristic, poles.

Data on author

Sergey I. Ziatdinov — Dr. Sci., Professor; Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation; E-mail: kaf53@guap.ru

Reference for citation: *Ziatdinov S. I. Pulse characteristic of Butterworth complex bandpass filter // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 8. P. 653—658 (in Russian).*

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-653-658

ФУНКЦИОНАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ И ВЫБОР ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ МЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

В. М. МЕДУНЕЦКИЙ¹, В. В. НИКОЛАЕВ²

¹Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: vm57med@yandex.ru

²ОАО „Системы управления и приборы“, 194156, Санкт-Петербург, Россия

Рассматриваются вопросы функционального анализа, сопоставления и выбора конструктивных технических решений механической системы на примере конструкции автоматического захвата для перегрузки элементов системы управления и защиты ядерного реактора (кластера тепловыделяющей сборки). Предложена методика, основанная на методе экспертных оценок, согласно которой выполнен функциональный анализ используемого в атомной промышленности захвата кластера, выявлены особенности и недостатки его конструкции. Предложено новое конструктивное решение, которое обеспечивает более высокий уровень надежности рассматриваемой системы. Сопоставлены два технических решения для оценки уровня качества рассматриваемых механических устройств.

Ключевые слова: методы сопоставления технических решений, метод экспертных оценок, исполнительные устройства, автоматический захват, кластер тепловыделяющей сборки.

Во многих областях техники достаточно широко используются исполнительные механизмы и устройства, совмещенные с приборами. Автоматические, управляющие, исполнительные устройства и механизмы совместно с измерительными приборами образуют техническую базу автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП). Диапазон современных исполнительных устройств необычайно широк: от микроэлектромеханических систем (МЭМС) [1] и исполнительных устройств для микроперемещений [2] до промышленных робототехнических систем [3], в частности, специализированных подъемно-транспортных систем атомных станций [4].

В применении исполнительных устройств важную роль играет надежность технической системы, которая складывается из безотказности, долговечности, сохраняемости и ремонтпригодности [5]. Во многих случаях на стадиях проектирования механических систем особое внимание уделяется показателям безотказности — вероятности безотказной работы $P(t)$, средней наработке до отказа $T_{ср}$, средней наработке на отказ T_0 и т.д. [6], которые определяются конструкцией и параметрами разрабатываемого устройства. В связи с этим перед разработчиком часто стоит задача выбора из ряда возможных технических решений проектируемого узла или устройства решения, обладающего требуемым сочетанием характеристик, которые в полной мере соответствуют поставленной задаче и всей совокупности второстепенных требований и ограничений.

Задачу оценки или сопоставления двух и более возможных технических решений, с достаточной степенью достоверности, можно решить с использованием моделирования.

При этом возникает необходимость создания самой модели исследуемых объектов, ее верификации и анализа результатов. К преимуществам моделирования можно отнести, как правило, высокую точность результата и возможность получения численных характеристик, к недостаткам — определенную степень приближения к реальным условиям.

В задачах оценки или сопоставления двух и более возможных решений к альтернативе моделирования можно отнести методы получения оценки на основе профессиональной интуиции и опыта специалистов — экспертов. Методы экспертных оценок получили определенное распространение в менеджменте, они также, хотя и достаточно редко, используются в некоторых областях техники. К преимуществам метода экспертных оценок необходимо отнести гибкость, относительную простоту реализации и достаточно высокую результативность при должной квалификации экспертов, к недостаткам — зависимость результата от квалификации и практического опыта экспертов. Тем не менее, несмотря на характерные для такого подхода ограничения, можно утверждать, что получение адекватной оценки на основе профессиональной интуиции и компетентности специалистов является исходным методом, который целесообразно использовать в инженерной практике.

Необходимо подчеркнуть, что предложенная методика позволяет выбрать оптимальное техническое решение для конкретной технической задачи на основе метода экспертных оценок. Предлагаемая методика была рассмотрена и апробирована на конкретной задаче проектирования нового автоматического устройства: захвата кластера, сопряженного с приборной системой управления машиной для перегрузки элементов (кластеров) и защиты ядерного реактора на АЭС. Захват кластера (ЗК) — механический, с автоматическим управлением [7], обладающий двумя функциональными состояниями; он работает по четырехтактному циклу и обеспечивает операции сцепления и расцепления с кластерами под слоем воды.

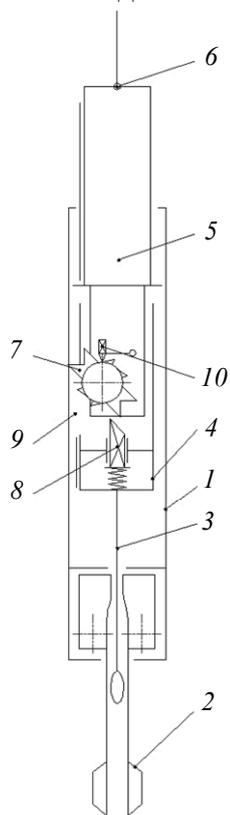


Рис. 1

Принципиальная схема захвата кластера представлена на рис. 1. Захватывающими элементами в конструкции захвата кластера являются две клещевины 2, обеспечивающие сцепление с внутренней проточкой траверсы кластера. Клещевины раздвигаются, поворачиваясь вокруг своих осей, за счет взаимодействия со штоком 3, который осуществляет возвратно-поступательное движение. Шток закреплен в гнезде стакана 4, который, как и ползун 5, смонтирован в корпусе 1 с возможностью осевого перемещения. Четырехлучевая звездочка 7, установленная на оси, поворачивается за счет подпружиненного управляющего упора 8 и позволяет сцепляться и расцепляться между собой двум подвижным элементам — стакану 4 и ползуну 5. Поворот звездочки 7 всегда осуществляется только в одну сторону за счет последовательного взаимодействия с упором 8 и окном 9, выполненным в стакане 4. Вращение звездочки в обратном направлении исключает фиксатор 10. В зависимости от положения звездочки 7 относительно ползуна 5 стакан 4 вместе со штоком 3 может занимать либо крайнее верхнее положение, соответствующее открытому состоянию захвата, либо крайнее нижнее, соответствующее закрытому состоянию. Подобные схемы реализации автоматических захватов хорошо известны в технике [4, 7].

Для оценки безотказности как наиболее значимого показателя надежности элемента, важного для безопасности транспортно-технологических операций, можно рассмотреть имеющуюся конструкцию захвата кластера по предлагаемой методике, которая заключается в следующем. Производится условное разбиение по функциональным признакам устройства на составные части (рис. 2). Далее выявляются элементы и их взаимосвязи, которые обеспечи-

вают выполнение требуемых функций каждого блока изделия, и определяется совокупность признаков, по которым осуществляется оценка экспертами.

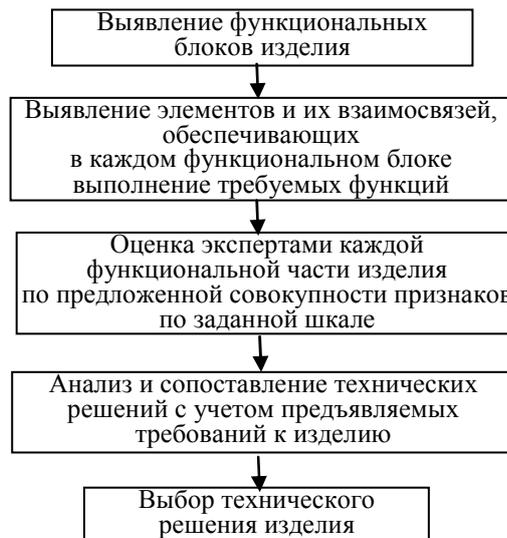


Рис. 2

Рассмотрим функциональную схему конструкции захвата кластера (рис. 3). В первом функциональном блоке захвата кластера управляющая команда системы управления поступает на накопитель энергии захвата кластера. В качестве накопителя энергии используется масса ползуна 5 (см. рис. 1), который за счет собственного веса обеспечивает смену состояния захвата при его посадке на траверсу кластера. Второй функциональный блок, который обеспечивает смену состояния захвата кластера, содержит стакан 4, звездочку 7, упор 8, фиксатор 10 и также ползун 5. Третий функциональный блок, отвечающий за управление захватываемыми элементами клещевины 2, представлен штоком 3 и стаканом 4.

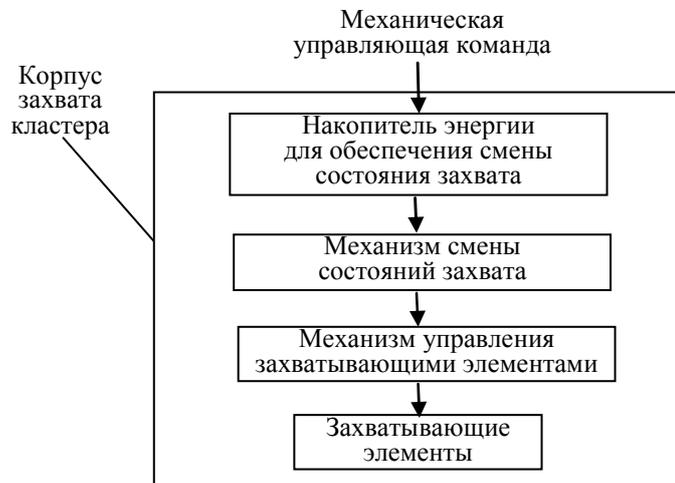


Рис. 3

С точки зрения безотказности работы рассматриваемой конструкции ключевым является механизм смены состояния захвата кластера.

В рассматриваемом устройстве смену состояния захвата обеспечивает сцепление-расцепление двух подвижных узлов. Функциональный анализ показал, что надежность функционирования устройства определяется гарантированным поворотом звездочки 7. Использование в устройстве смены состояний звездочки (см. рис. 1) существенно повышает чувствительность механизма смены состояний захвата кластера к загрязнению и соответственно изменению коэффициента трения скольжения подвижных деталей, что приводит к снижению безотказности работы устройства в целом.

Проведенный функциональный анализ исходной конструкции захвата кластера позволил выявить „слабые места“ и показал возможность выполнения захвата кластера по другой конструктивной схеме, которая позволит повысить уровень надежности этой механической системы. В результате была предложена конструкция с измененной схемой построения захвата кластера, которая имеет более высокий уровень безотказности работы (рис. 4). Смена состояний захвата кластера осуществляется за счет одностороннего вращения ползуна 4, закрепленного посредством штока 9 на утяжелителе 5, вокруг продольной оси при возвратно-поступательном движении утяжелителя относительно корпуса 1 в процессе посадки на траверсу кластера и последующего подъема. В каждом цикле возвратно-поступательного движения происходит поворот ползуна и связанной с ним посредством штока 3 поворотной втулки 2 на 90°. Одностороннее вращение ползуна 4 обеспечивается за счет взаимодействия с пальцами 8 направляющих пазов 7, имеющих специальную форму.

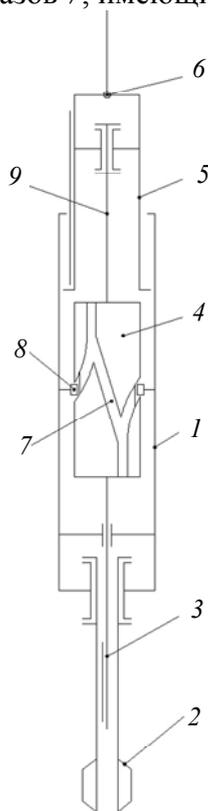


Рис. 4

Таким образом, по предложенной методике на основании функционального анализа и сопоставления двух технических решений определено, что модифицированная [8] конструкция захвата кластера обладает более высоким уровнем надежности, это подтверждает целесообразность использования методики на этапах проектирования систем, обеспечивающих безопасность транспортно-технологических операций.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колтаков Ф. Ф., Борзяк Н. Г., Кортунюв В. И. Микроэлектромеханические устройства в радиотехнике и системах телекоммуникаций. Харьков: Нац. аэрокосм. ун-т „Харьк. авиац. ин-т“, 2006. 82 с.
2. Бобцов А. А., Бойков В. И., Быстров С. В., Григорьев В. В. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений. СПб: СПбГУ ИТМО, 2011. 131 с.
3. Исполнительные устройства мехатронных систем/роботов [Электронный ресурс]: <http://ru.wikiversity.org/wiki/Исполнительные_устройства_мехатронных_систем/роботов>.

4. Панасенко Н. Н., Божко С. Г. Сейсмостойкие подъемно-транспортные машины атомных станций. Красноярск: Изд-во Краснояр. ун-та, 1987. 208 с.
5. Матвеевский В. Р. Надежность технических систем. М.: Московский гос. ин-т электроники и математики, 2002. 113 с.
6. Показатели надежности [Электронный ресурс]: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Показатели_надежности>.
7. Вайнсон А. А., Андреев А. Ф. Крановые грузозахватные устройства: Справочник. М.: Машиностроение, 1982. 304 с.
8. Пат. 2011.000652 РФ. Захват кластера тепловыделяющих сборок реактора / В. В. Николаев, Е. В. Ерасов. 29.03.2012.

Сведения об авторах

- Виктор Михайлович Медунецкий** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра технологии приборостроения; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Вячеслав Викторович Николаев** — ОАО „Системы управления и приборы“; главный конструктор; E-mail: mak5@inbox.ru

Рекомендована кафедрой
технологии приборостроения

Поступила в редакцию
22.01.15 г.

Ссылка для цитирования: Медунецкий В. М., Николаев В. В. Функциональный анализ и выбор технических решений механических систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 659—663.

**FUNCTIONAL ANALYSIS AND SELECTION OF ENGINEERING SOLUTIONS
FOR MECHANICAL SYSTEMS****V. M. Medunetskiy¹, V. V. Nikolaev²**

¹ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia
E-mail: vm57med@yandex.ru

²JSC Control Systems and Instruments, 194156, Saint Petersburg, Russia

The problems of comparison and selection of engineering design solutions for a mechanical system are analyzed by the example of automatic gripper for handling components of control and protection system of a nuclear reactor (cluster of fuel assembly). Based on the method of expert evaluations proposed by the authors, analysis of the existing (used in the nuclear industry) automatic gripper functioning is carried out, peculiarities and limitations of its design are revealed. A new design for automatic gripper is proposed to provide a higher level of reliability of the system in question. A comparison of two engineering solutions for evaluation of the mechanical device quality is performed.

Keywords: methods of comparison of engineering solutions, methods of expert estimates, actuators, automatic gripper, fuel assembly cluster.

Data on authors

- Viktor M. Medunetskiy** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Instrumentation Technologies; E-mail: vm57med@yandex.ru
- Vyacheslav V. Nikolaev** — JSC Control Systems and Instruments; Chief Designer; E-mail: mak5@inbox.ru

Reference for citation: Medunetskiy V. M., Nikolaev V. V. Functional analysis and selection of engineering solutions for mechanical systems // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 8. P. 659—663 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-659-663

ТЕРМАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ГАЗА И РОЛЬ ЭФФЕКТА НАСЫЩЕНИЯ МЕЖЗОННОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ ФЕМТОСЕКУНДНОГО ЛАЗЕРНОГО ИМПУЛЬСА НА ПОЛУПРОВОДНИКИ И ДИЭЛЕКТРИКИ

Д. С. Поляков, Е. Б. Яковлев

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: polyakovdmitry1988@gmail.com*

Проанализирована эволюция функции распределения фотовозбужденных носителей по энергии при воздействии на полупроводниковые и диэлектрические материалы ультракороткого лазерного импульса. Анализ выполнен на основе кинетического уравнения Больцмана для фотовозбужденных носителей с учетом процессов межзонного поглощения, внутризонного поглощения и релаксации за счет столкновений. Приведены оценки времени термализации фотовозбужденных электронов. Исследовано влияние эффекта насыщения межзонного поглощения на концентрацию свободных электронов. Представлены зависимости концентрации фотовозбужденных носителей от плотности энергии фемтосекундного импульса.

Ключевые слова: *фемтосекундный импульс, время термализации, насыщение межзонного поглощения, диэлектрик, полупроводник, воздействие лазерного излучения.*

Хорошо известно, что при воздействии мощных фемтосекундных импульсов на полупроводники и диэлектрики концентрация фотовозбужденных носителей (электронов и дырок) может достигать 10^{21} см^{-3} [1]. Наиболее широко используется теоретическое описание процесса нагрева полупроводников и диэлектриков в подобных условиях на основе совместного решения уравнения для концентрации неравновесных носителей, учитывающего процессы ионизации, рекомбинации, диффузии, эмиссии, и системы уравнений двухтемпературной модели (см., например, [2, 3]). При этом полагается, что функция распределения носителей по энергии является локально-равновесной. Для обоснования подобного допущения необходимо проследить эволюцию этой функции при облучении фемтосекундным импульсом, используя кинетические уравнения. Для адекватной оценки влияния эффекта насыщения межзонного поглощения на пространственно-временное распределение фотовозбужденной электрон-дырочной плазмы при воздействии ультракороткого лазерного импульса необходимо детально знать эволюцию функции распределения носителей вблизи экстремумов зон. Этот эффект экспериментально наблюдался при воздействии миллисекундных импульсов на кремний [4], для фемтосекундных воздействий его роль остается не выясненной.

Целью настоящей работы является оценка времени установления локального равновесия (времени термализации) в электронной и дырочной подсистеме полупроводника и диэлектрика, облучаемого фемтосекундным лазерным импульсом, а также определение влияния эффекта насыщения межзонного поглощения на концентрацию фотовозбужденных носителей.

Поглощение излучения (в том числе многофотонное) в полупроводниках и диэлектриках происходит при межзонных переходах, что приводит к генерации свободных носителей, по мере роста концентрации которых внутризонное поглощение (поглощение на свободных носителях) становится существенным. Поэтому нагреваемый ультракоротким лазерным импульсом полупроводник в некотором приближении можно представить в виде трех взаимодействующих подсистем: газа электронов, газа дырок, газа фононов (решеточная подсистема). При этом электроны и дырки поглощают излучение, их распределение по энергиям может быть неравновесным, а концентрация может существенно меняться в процессе воздействия импульса.

В настоящей работе рассмотрена простейшая зонная структура полупроводника или диэлектрика со сферическими изоэнергетическими поверхностями для электронов и дырок, характеризующаяся квадратичным законом дисперсии. Описан процесс взаимодействия фемтосекундного импульса с материалом на временном масштабе порядка длительности импульса (~100 фс). В этом случае можно пренебречь процессами рекомбинации носителей (кроме вынужденной излучательной рекомбинации), а также взаимодействием носителей с решеткой. Система уравнений, описывающая изменение функций распределения электронов и дырок при воздействии фемтосекундного лазерного импульса, будет иметь вид:

$$\left. \begin{aligned} \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right) &= \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{\text{abs}} + \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{fe\text{abs}} + \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{e-e} + \left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{e-h}, \\ \left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right) &= \left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{\text{abs}} + \left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{fh\text{abs}} + \left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{h-h} + \left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{h-e}, \end{aligned} \right\}$$

где f_e, f_h — функции распределения электронов и дырок соответственно, слагаемые $\left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{\text{abs}}$ и

$\left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{\text{abs}}$ описывают генерацию электрон-дырочных пар при межзонном поглощении квантов

излучения, $\left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{fe\text{abs}}$ и $\left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{fh\text{abs}}$ — поглощение на свободных носителях, $\left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{e-e}$ и

$\left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{h-h}$ — столкновения между носителями одного типа, слагаемые $\left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{e-h}$ и $\left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{h-e}$

описывают столкновения носителей разных типов.

Изменение функции распределения электронов при межзонном поглощении описывает следующее выражение:

$$\left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{\text{abs}} = \sum_n \int \left(w_n(\mathbf{p}_h, \mathbf{p}_e) (1-f_e)(1-f_h) - w_n(\mathbf{p}_e, \mathbf{p}_h) f_e f_h \right) \frac{2d\mathbf{p}_h}{(2\pi\hbar)^3}, \quad (1)$$

где $w_n(\mathbf{p}_h, \mathbf{p}_e)$ — вероятность генерации в единицу времени электрона с импульсом \mathbf{p}_e и дырки с импульсом \mathbf{p}_h при n -фотонном межзонном поглощении, \hbar — постоянная Планка. В выражении (1) наряду с генерацией свободных носителей при межзонном поглощении учтена возможность обратного процесса — вынужденной излучательной рекомбинации (второе слагаемое в подынтегральном выражении). Значения $w_n(\mathbf{p}_h, \mathbf{p}_e)$ определяются исходя из имеющихся экспериментальных данных. При типичных соотношениях ширины запрещенной зоны и энергии кванта в полупроводниках имеет место линейное и двухфотонное поглощение либо только двухфотонное, диэлектрикам свойственно многоквантовое поглощение.

Взаимодействие носителей описывается с помощью экранированного кулоновского потенциала. Выражения для слагаемых $\left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{e-e}$, $\left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{h-h}$, $\left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{e-h}$, $\left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{h-e}$, $\left(\frac{\partial f_e}{\partial t}\right)_{feabs}$ и

$\left(\frac{\partial f_h}{\partial t}\right)_{fhabs}$ аналогичны использованным в работе [5] при описании электрон-электронных столкновений и поглощения на свободных носителях в металлах.

На рис. 1, а, б показана эволюция функции распределения полупроводника (кремний: ширина запрещенной зоны $E_g = 1,1$ эВ; эффективная масса электрона $m_e = 1,08m_0$, m_0 — эффективная масса свободного электрона; эффективная масса дырки $m_h = 0,6m_0$ [6] при облучении импульсом длительностью $t_p = 120$ фс, поглощенная плотность энергии $Q_a = 1$ Дж/см², длина волны 800 нм (пунктир — равновесная, сплошная кривая — рассчитанная функция распределения). Как видно из рис. 1, а, распределение мало отличается от равновесного после 15-й фемтосекунды. Поведение функции распределения для дырок аналогично. Значение функции распределения электронов и дырок вблизи экстремумов зон значительно больше нуля, соответственно эффект насыщения межзонного поглощения играет заметную роль.

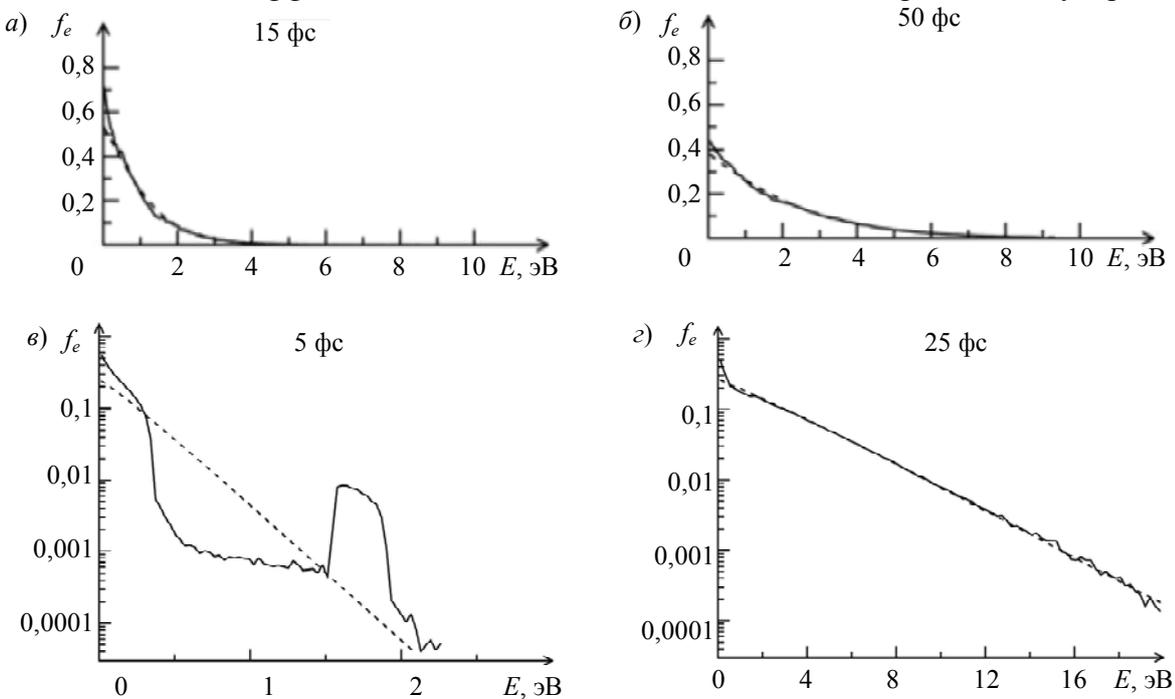


Рис. 1

На рис. 1, в, г приведены аналогичные результаты для диэлектрика (MgO, $m_e = m_h = m_0$, $E_g = 7,5$ эВ) при $t_p \sim 80$ фс и $Q_a = 14$ Дж/см². Как видно из рис. 1, г, функция распределения в целом достаточно близка к равновесной к 25-й фемтосекунде, однако в области низких энергий рассчитанная функция распределения электронов примерно в 2,5 раза больше равновесной. Соответственно нетермализованные электроны, сгенерированные у дна зоны проводимости, способствуют усилению роли эффекта насыщения поглощения.

На рис. 2, а зависимость максимальной концентрации электрон-дырочной плазмы от плотности энергии, рассчитанная с учетом эффекта насыщения межзонного поглощения, сравнивается с зависимостью, полученной в эксперименте [7] при $t_p = 250$ фс и $\lambda = 1200$ нм для кремния (точки — данные эксперимента, сплошная кривая — расчет, пунктир — расчет без учета насыщения межзонного поглощения). На экспериментальной кривой значения концентрации электронов в области $Q_a > 50$ мДж/см² меньше значений, рассчитанных в соответствии с параболической зависимостью, характерной для двухфотонного поглощения. Из рис. 2, а

видно, что заметные отклонения рассчитанной зависимости от параболической также начинают проявляться в области $Q_a \sim 50\text{--}60$ мДж/см². Таким образом, наблюдаемое в эксперименте отклонение может быть связано с эффектом насыщения межзонного поглощения.

На рис. 2, б приведена рассчитанная зависимость максимальной концентрации электронов для широкого диапазона поглощенных плотностей энергий (точки — расчет, сплошная кривая — параболическая зависимость, полученная без учета насыщения поглощения). Как видно, имеет место насыщение роста концентрации. В то же время подавление фотоиндуцированных переходов, вызванное заполнением электронами дна зоны проводимости и одновременно идущим обеднением валентной зоны, не приводит к полному прекращению роста концентрации с повышением плотности энергии. Как видно из рис. 2, б, при $Q_a \sim 1$ Дж/см² концентрация электрон-дырочной плазмы $\approx 4 \cdot 10^{21}$ см⁻³, что согласуется с представлениями о поляритонном механизме структурирования поверхности кремния [8].

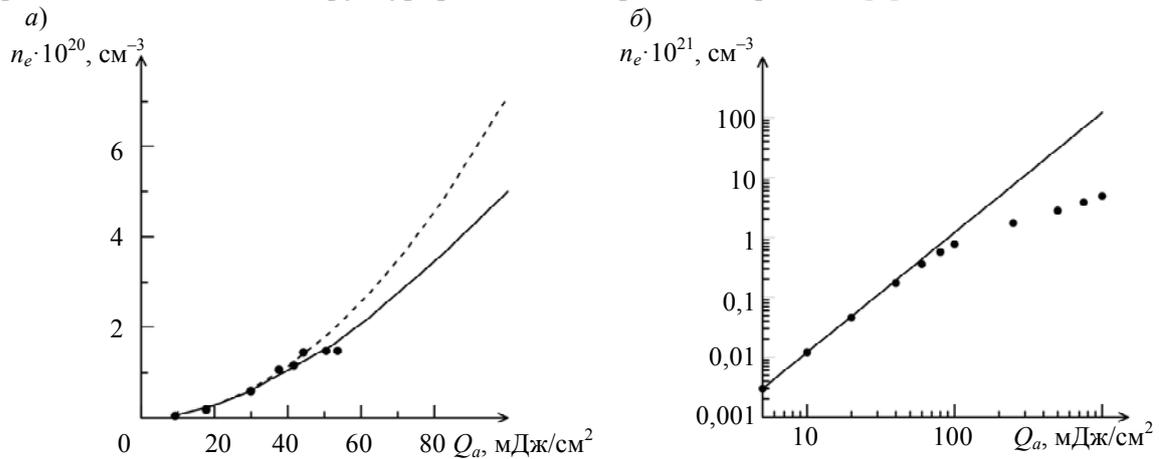


Рис. 2

На рис. 3 приведена зависимость максимальной концентрации свободных электронов в MgO от плотности энергии импульса на длине волны 800 нм (точки — расчет по предложенной в работе модели, треугольники — расчет с учетом насыщения поглощения, но без учета неравновесности распределения электронов, сплошная кривая — расчет без учета насыщения поглощения). На этой длине волны для оксида магния характерно пятифотонное поглощение, при этом превышение энергии фотовозбужденного электрона над дном зоны проводимости относительно невелико: $(5n\hbar\omega - E_g) \sim 0,3$ эВ (ω — частота излучения). В этом случае также наблюдается заметное отклонение от простого степенного закона ($n_e \sim Q_a^5$, сплошная кривая), учет роли нетермализованных электронов при описании насыщения межзонного поглощения приводит к уменьшению концентрации свободных электронов примерно в два раза при $Q_a \sim 20$ Дж/см².

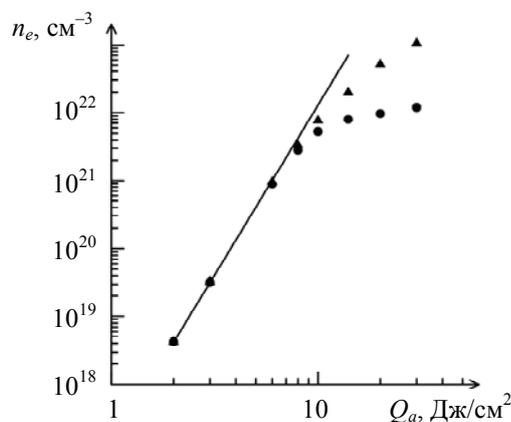


Рис. 3

Отметим, что насыщение роста концентрации свободных электронов в MgO экспериментально наблюдалось в работе [9]. Экспериментальные данные [9] качественно соответствуют выполненным расчетам (рис. 3), однако измеренные значения концентрации в [9] на порядок ниже полученных в настоящей работе. По-видимому, это может быть связано с тем, что в [9] измерялось усредненное значение концентрации, в то время как в настоящей работе определялось максимальное значение.

В работе показано, что время термализации свободных носителей полупроводника при облучении фемтосекундным лазерным импульсом $\approx 10\text{--}20$ фс. Эффект насыщения межзонного поглощения оказывает существенное влияние на концентрацию фотовозбужденной электрон-дырочной плазмы в полупроводниках и диэлектриках, причем при облучении диэлектрика в условиях, когда величина $(n\hbar\omega - E_g)$ мала, необходимо учитывать неравновесность распределения носителей.

Работа выполнена при государственной финансовой поддержке ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01), поддержана грантами РФФИ 13-02-00971 а, 13-02-00033 и грантом президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-1364.2014.2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sokolowski-Tinten K., von der Linde D. Generation of dense electron-hole plasmas in silicon // Phys. Rev. 2000. Vol. 61. P. 2643—2650.
2. Булгакова Н. М., Стоян Р., Розенфельд А. Лазерно-индуцированная модификация прозрачных кристаллов и стекол // Квантовая электроника. 2010. Т. 41, № 11. С. 966—985.
3. Дюкин Р. В., Марциновский Г. А., Шандыбина Г. Д., Яковлев Е. Б. Электрофизические явления при фемтосекундных лазерных воздействиях лазерного излучения на полупроводники // Оптический журнал. 2011. Т. 78, № 2. С. 8—13.
4. Либенсон М. Н. Лазерно-индуцированные оптические и термические процессы в конденсированных средах и их взаимное влияние. СПб: Наука, 2007. 423 с.
5. Поляков Д. С., Яковлев Е. Б. Релаксация возбуждения в электронной подсистеме металла при облучении ультракороткими лазерными импульсами // Оптический журнал. 2014. Т. 81, № 1. С. 32—37.
6. Акципетров О. А., Баранова И. М., Евтюхов К. Н. Нелинейная оптика кремния и кремниевых наноструктур. М.: Физматлит, 2012. 544 с.
7. Кононенко В. В., Заведеев В. В., Латушко М. И., Пашинин В. П., Конов В. И., Дианов Е. М. Возбуждение электронной подсистемы кремния с помощью фемтосекундного лазерного облучения // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 10. С. 925—930.
8. Марциновский Г. А., Шандыбина Г. Д., Смирнов Д. С., Заботнов С. В., Головань Л. А., Тимошенко В. Ю., Кашкаров П. К. Ультракороткие возбуждения поверхностных поляритонов и волноводных мод в полупроводниках // Оптика и спектроскопия. 2008. Т. 105, № 1. С. 75—81.
9. Quere F., Guizard S., Martin P., Petite G., Gobert O., Meynadier P., Perdrix M. Ultrafast carrier dynamics in laser-excited materials: subpicoseconds optical studies // Applied Physics B. 1999. Vol. 68. P. 459—463.

Сведения об авторах

- Дмитрий Сергеевич Поляков** — Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и лазерной техники; инженер; E-mail: polyakovdmitry1988@gmail.com
- Евгений Борисович Яковлев** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО; кафедра лазерных технологий и лазерной техники; E-mail: yak@lastech.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой
лазерных технологий и лазерной техники

Поступила в редакцию
03.05.15 г.

Ссылка для цитирования: Поляков Д. С., Яковлев Е. Б. Термализация электронного газа и роль эффекта насыщения межзонного поглощения при воздействии фемтосекундного лазерного импульса на полупроводники и диэлектрики // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 664—669.

THERMALISATION OF ELECTRON GAS AND THE ROLE OF SATURATION OF INTERBAND ABSORPTION UNDER THE ACTION OF FEMTOSECOND LASER PULSE IN SEMICONDUCTORS AND DIELECTRICS**D. S. Polyakov, E. B. Yakovlev***ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia**E-mail: polyakovdmitry1988@gmail.com*

Evolution of energy distribution function for photo-excited charge carriers in a semiconductor and dielectric under the action of femtosecond laser pulse is analyzed. The consideration is based on Boltzmann kinetic equation for the carriers with due regard for the effects of interzone absorption as well as intra-zone absorption and collision relaxation. Thermalisation time for photo-excited electrons is estimated. The influence of saturation of interband absorption on concentration of free electrons is studied. Dependence of concentration of photo-excited electrons on energy density in incident femtosecond laser radiation.

Keywords: femtosecond pulse, thermalisation time, saturation of interband absorption, dielectric, semiconductor, laser radiation action.

Data on authors

Dmitry S. Polyakov — ITMO University, Department of Laser Technologies and Instrumentation; Engineer; E-mail: polyakovdmitry1988@gmail.com

Eugeny B. Yakovlev — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of Laser Technologies and Instrumentation; E-mail: yak@lastech.ifmo.ru

Reference for citation: Polyakov D. S., Yakovlev E. B. Thermalisation of electron gas and the role of saturation of interband absorption under the action of femtosecond laser pulse in semiconductors and dielectrics // *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie*. 2015. Vol. 58, N 8. P. 664—669 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-664-669

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 681.3.069, 681.324
DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-670-673

ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ КАДРОВ В ОБЛАСТИ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ МЕЖДУНАРОДНЫХ МАГИСТЕРСКИХ ПРОГРАММ ДВОЙНОГО ДИПЛОМА

А. З. БИЛЯТДИНОВА, А. В. БУХАНОВСКИЙ

*Университет ИТМО, 197101, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: bilyatdinova@mail.ifmo.ru*

На примере международных магистерских программ двойного диплома Университета ИТМО (Россия) и Университета г. Амстердам (Нидерланды) рассмотрена специфика мультидисциплинарной образовательной среды в области компьютерного моделирования, стимулирующей непрерывное обучение и обеспечивающей развитие творческих способностей и межкультурных компетенций студентов. Методика обучения основывается на диверсификации глобальной академической и профессиональной активности студентов магистратуры путем их погружения в групповые мультидисциплинарные научно-исследовательские проекты. Освоенные в процессе обучения профессиональные, общекультурные, а также производственно-технологические компетенции позволят выпускникам эффективно использовать вычислительные системы различной архитектуры и разнообразные технологии программирования, а также способствовать формированию общей креативности выпускника.

Ключевые слова: суперкомпьютерное моделирование, международные магистерские программы, учебный план, двойной диплом, компетенции, среда обучения.

Математическое моделирование является мощной диффузной технологией развития различных предметных областей, играющей ключевую роль при решении меж- и мультидисциплинарных задач [1, 2]. Вследствие многообразия решаемых задач специалисты в сфере математического моделирования должны уметь переносить и агрегировать знания из различных предметных областей. В настоящей статье обсуждаются вопросы формирования образовательной среды в области суперкомпьютерного моделирования на примере магистерских программ двойного диплома Университета ИТМО (Россия) и Университета г. Амстердам (Нидерланды) [3]: „Суперкомпьютерные технологии в междисциплинарных исследованиях“, „Суперкомпьютерные технологии в исследовании процессов большого города“, а также „Экстренные вычисления и обработка сверхбольших объемов данных“.

Программы являются уникальными по тематике и принципам построения учебных планов не только для российского, но и мирового высшего образования. Отличительная особенность программ — стимулирование глобальной академической и профессиональной активности магистрантов путем их погружения в научно-исследовательские проекты под руководством ведущих российских и зарубежных ученых. Исходя из специфики научных исследований студенты могут формировать индивидуальную образовательную траекторию, используя учебные модули всех трех программ.

В основу образовательной среды программ двойного диплома положена компетентностная модель выпускника, которая основывается на обобщенном жизненном цикле самого объекта исследования - математической модели конкретного явления с учетом специфики ее трансформации в различных предметных областях. Выпускник должен быть готов к работе в „мультидисциплинарной команде“, ориентированной на решение предметно-ориентированных задач математического моделирования „под ключ“ (от формирования технических требований к объекту разработки — до создания отчуждаемого программного продукта, выполнения массовых расчетов и интерпретации их результатов). Выпускник должен уметь формализовать постановку задачи на основе содержательных требований специалистов-предметников, определить класс математической модели и исследовать варианты ее использования, адаптировать (а часто — разработать) метод ее численной реализации; исходя из математического описания задачи — разработать алгоритм ее решения, учитывающий особенности предметной области, специфику данных и характеристики вычислительной инфраструктуры, которую предполагается использовать. Кроме того, к таким профессиональным компетенциям относятся разработка программ, реализующих алгоритм (в том числе на основе выбора и адаптации уже существующих решений), валидация и верификация моделей, сбор и подготовка данных для использования в модели, а также визуализация и интерпретация содержательных результатов моделирования, с возможностью выдачи практических рекомендаций специалистам-предметникам. Для обеспечения профессиональных компетенций студентам предлагаются как общенаучные курсы „выравнивающего“ характера („Непрерывные математические модели“, „Дискретные математические модели“, „Вероятностные математические модели“), так и курсы по актуальным направлениям развития математического моделирования и науки о вычислениях („Машинное обучение“, „Многомерный статистический анализ“, „Моделирование сложных систем“).

Несмотря на прозрачность структуры жизненного цикла обобщенной модели ряд его элементов обладает сильной вариативностью в силу различия методических подходов, используемых в разных предметных областях. Как следствие, обеспечение необходимых компетенций требует учета особенностей различных предметных областей с акцентом на различие применяемых подходов, методов и моделей. Не всегда возможно обеспечить стандартизирующий и диверсифицирующий компоненты образовательной среды специалистами одного университета, и это является косвенным преимуществом программ двойного диплома. Преподаватели Университета ИТМО и Университета г. Амстердам предлагают элективные курсы по применению математического моделирования в прорывных предметных областях (например, „Биоинформатика“, „Геоинформатика“, „Моделирование и анализ социальных сетей“). Для детального освоения необходимых компетенций студенты вовлекаются в различные научно-исследовательские проекты: от морских интеллектуальных технологий, технологий моделирования коллективного поведения, поддержки исполнения многомасштабных композитных приложений, системы виртуальной реальности и научной визуализации, моделирования и оптимизации процессов большого города, моделирования экстремальных природных и социально-политических процессов до применения облачных технологий в образовании.

Программа подготовки ориентирована на разработку и применение суперкомпьютерных технологий. Потому отдельного внимания в рамках развития образовательной среды требуют производственно-технологические компетенции, связанные с эффективным использованием вычислительных систем различной архитектуры и разнообразных технологий программирования и работы с данными. Обучаемые приобретают навыки работы с параллельными и распределенными вычислительными системами, Грид-средами и системами облачных вычислений в различных вариантах использования, а также с технологиями параллельного программирования, моделями и методами высокопроизводительных вычислений. Кроме того,

в программах предусмотрены курсы, связанные с освоением ряда компьютерных технологий („Научная визуализация и виртуальная реальность“, „Технологии eScience“, „Технологии Big Data“). Обучение конкретным технологиям программирования производится исходя из специфики проектной деятельности студентов.

Образовательная среда также покрывает ряд компетенций, в целом обеспечивающих конкурентоспособность выпускников магистратуры на международном рынке труда: коллективная работа, в том числе в интернациональных группах; адаптация к условиям креативной экономики, например, при переезде в другую страну; управление внутренней мотивацией, включая самоидентификацию (например, управление временем). В частности, для развития таких навыков факультативно предлагается ряд предметов на английском языке (Academic English, Scientific Writing), на которых в игровой форме отрабатываются различные моменты профессиональной деятельности в международном коллективе.

Контроль профессиональных компетенций обучаемых проводится не только в рамках штатной учебной деятельности, но и на:

- Международной школе молодых ученых в области компьютерного моделирования [4];
- Школе-практикуме молодых ученых и специалистов „Технологии высокопроизводительных вычислений и компьютерного моделирования“ [5].

В рамках этих мероприятий студенты выполняют мотивационный проект — разрабатывают групповую заявку на грант для решения актуальных задач суперкомпьютерного моделирования сложных систем. С этой целью формируется группа студентов и аспирантов российских и зарубежных вузов. Так, в Международной школе молодых ученых в области компьютерного моделирования (25 июня—4 июля 2015 г., Афины, Греция) приняло участие более 50 человек, из них 14 магистров и аспирантов Университета ИТМО, 10 представителей вузов РФ и 28 зарубежных студентов программ магистратуры и аспирантуры (из University of Crete, National Technical University of Athens, University of Athens, Swiss Federal Institute of Technology, National Center for Scientific Research “Demokritos”). В течение 9 дней работы школы участники групп, включающих представителей разных профессий из разных стран, должны были предложить гипотезу (к примеру, о способе улучшения городской инфраструктуры), которая подтверждается посредством компьютерного (вычислительного) эксперимента, и сформировать каркас заявки, аналогичной по базовым требованиям к европейским проектам (HORIZON'2020). Анализ результатов групповой работы показал, что обучаемые по совместным программам в 60 % занимали лидирующие позиции. При этом опыт проведения групповых мотивационных проектов показал, что мультидисциплинарное исследование становится эффективным, только когда участники способны покинуть свои зоны комфорта (эмоциональные, социальные, профессиональные) и воспринимать других членов группы как комплементарных партнеров, а не конкурентов со сходными навыками и возможностями.

Таким образом, созданная на базе кафедры высокопроизводительных вычислений Университета ИТМО образовательная среда призвана обеспечить диверсификацию научно-образовательной деятельности магистров, формирование персональных компетенций выпускников в области естественных и точных наук и сформировать *уникальное* сочетание мотивационных, интеллектуальных, эстетических, коммуникативных параметров и творческого начала выпускника.

Результаты трех лет существования программ (два успешных выпуска с выдачей двух дипломов, пятикратное увеличение востребованности программ у абитуриентов) демонстрируют непротиворечивость научно-методических решений, заложенных в ее основе. Направления дальнейших исследований лежат в описании общих принципов, создании и развертывании системы, предоставляющей инструменты управления знаниями для совместной работы студентов, преподавателей и исследователей в мультидисциплинарной среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Tait J. and Lyall C.* Short Guide to Developing Interdisciplinary Research. Edinburgh, 2007.
2. *Wiesmann U., Biber-Klemm S., Grossenbacher-Mansuy W., Hirsch Hadorn G., Hoffmann-Riem H., Joye D., Pohl C., Zemp E.* Enhancing Transdisciplinary Research: A Synthesis in Fifteen Propositions // Handbook of Transdisciplinary Research. Netherlands: Springer, 2008. P. 433—441.
3. *Dukhanov A. V., Krzhizhanovskaya V. V., Bilyatdinova A. Z., Boukhanovsky A. V., Sloot P. M.* Double-Degree Master's Program in Computational Science: Experiences of ITMO University and University of Amsterdam // Procedia Computer Science. 2014. Vol. 29. P. 1433—145
4. [Электронный ресурс]: <<http://ysc.escience.ifmo.ru>>.
5. [Электронный ресурс]: <<http://school.escience.ifmo.ru>>.

Сведения об авторах

- Анна Закировна Биятдинова** — Университет ИТМО, кафедра высокопроизводительных вычислений; преподаватель; E-mail: bilyatdinova@mail.ifmo.ru
- Александр Валерьевич Бухановский** — д-р техн. наук, профессор; Университет ИТМО, кафедра высокопроизводительных вычислений; заведующий кафедрой; E-mail: avb_mail@mail.ru

Рекомендована кафедрой
высокопроизводительных вычислений

Поступила в редакцию
05.07.15 г.

Ссылка для цитирования: *Биятдинова А. З., Бухановский А. В.* Особенности подготовки кадров в области суперкомпьютерного моделирования на основе международных магистерских программ двойного диплома // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 8. С. 670—673.

**TRAINING IN THE FIELD OF SUPERCOMPUTER SIMULATIONS:
INTERNATIONAL MASTER'S DOUBLE DEGREE PROGRAMS**

A. Z. Bilyatdinova, A. V. Boukhanovsky

ITMO University, 197101, Saint Petersburg, Russia

E-mail: bilyatdinova@mail.ifmo.ru

This article discusses implementation of a multi-disciplinary educational environment in the field of computer simulation as a tool to create conditions and to stimulate lifelong learning, creativity and intercultural competencies of future graduates of international double degree Master's programs of ITMO University, Russia and University of Amsterdam, the Netherlands. Teaching methods are based on the diversification of global academic and professional activities of master students by their immersion in group multidisciplinary research projects. Environment's structure consists of the model of desired competencies of our graduates, which in turn is based on a generalized life cycle of the object of development, e.g. a mathematical model and its specifics in various subject areas. Along with professional and general cultural competencies, special attention is paid to the development of technological competencies for the efficient use of computing systems of different architecture and a variety of programming technologies, as well to the formation of creativity of the graduate.

Keywords: supercomputer modeling, international master's programs, curriculum, double diploma, competencies, learning environment.

Data on authors

- Anna Z. Bilyatdinova** — ITMO University, Department of High Performance Computing; Assistant professor; E-mail: bilyatdinova@mail.ifmo.ru
- Alexander V. Boukhanovsky** — Dr. Sci., Professor; ITMO University, Department of High Performance Computing; Head of the Department; E-mail: avb_mail@mail.ru

Reference for citation: *Bilyatdinova A. Z., Boukhanovsky A. V.* Training In the field of supercomputer simulations: International Master's double degree programs // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroyeniye. 2015. Vol. 58, N 8. P. 670—673 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-8-670-673