

## СОДЕРЖАНИЕ

### ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

- Сольницыев Р. И., Коршунов Г. И. Математические модели систем управления „природа—техногеника“ ..... 5
- Дворников С. В., Казаков Е. В., Устинов А. А., Чихонадских А. П. Выбор модели секвентного сигнала для системы связи..... 11
- Смагин В. А., Парамонов И. Ю. Оценивание количества информационной работы вычислительной сети..... 16

### ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

- Зиатдинов С. И. Компенсация задержки сигнала в цифровых сглаживающих фильтрах..... 21
- Конников И. А. Расчет перекрестных помех в электронных модулях..... 26
- Чжан А. В., Патрин Г. С., Задворный А. Г., Середкин В. А. Применение оптоэлектронных устройств для наблюдения доменных структур в ферромагнитных материалах ..... 30

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Ключиков И. А. Измерение средней частоты сигналов в акустооптических спектроанализаторах с пространственно-неинвариантной аппаратной функцией..... 33
- Доронин И. С., Окишев К. Н., Карпец Ю. М., Киреева Н. М. Функция автокорреляции рассеянного излучения при измерении размера наночастиц по схеме нарушенного полного внутреннего отражения ..... 38
- Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т. Применение двухчастотного излучения для реализации принципов гетеродинной голографической интерферометрии с одним опорным пучком ..... 43
- Калинов Г. А., Лысаков А. В., Римлянд В. И. Автоматизированная система сбора гидрологической информации ..... 46
- Васильев А. С., Краснящих А. В., Коротаев В. В., Лашманов О. Ю., Лысенко Д. Ю., Ненарокомов О. Н., Широков А. С., Ярышев С. Н. Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений ..... 50

### НОВЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

- Грязев М. В., Кухарь В. Д., Распопов В. Я. Подготовка специалистов по авионике в Тульском государственном университете..... 56

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

<b>Бобцов А. А., Пыркин А. А.</b> Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для нелинейной системы с запаздыванием в управлении .....	60
<b>Фаронов М. В., Пыркин А. А., Фуртат И. Б., Колюбин С. А., Суров М. О., Ведяков А. А.</b> Робастное управление мобильными роботами с использованием технического зрения.....	63
<b>Алёхин А. А., Горбунова Е. В., Чертов А. Н., Шитов Д. Д.</b> Об описании объектов анализа для оптико-электронных систем цветовой идентификации.....	65
<b>Загарских А. С., Безгодов А. А., Иванов С. В., Бухановский А. В.</b> Инструментальная технологическая среда для организации виртуальных полигонов на основе облачных вычислений .....	67
<b>Хоружников С. Э., Зудилова Т. В., Осипов Н. А., Прыгун В. В.</b> Использование облачных технологий в учебном процессе.....	70
<b>Карбовский В. А.</b> Интеллектуальная система активного мониторинга ресурсов облачной среды .....	72
<b>Охтилев М. Ю., Зеленцов В. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В.</b> Концепция проактивного управления сложными техническими объектами и технологии ее реализации.....	73
SUMMARY ( <i>перевод Ю. И. Копилевича</i> ).....	76
УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ в 2012 г. ....	84

## CONTENTS

### INFORMATION TECHNOLOGIES AND SYSTEMS

- Solnitsev R. I., Korshunov G. I.** Mathematical Models of “Nature—Technogenics” Control Systems ..... 5
- Dvornikov S. V., Kazakov E. V., Ustinov A. A., Chikhonadskikh A. P.** Justification of Sequential Signal Model for Communication System ..... 11
- Smagin V. A., Paramonov I. Yu.** Assessment of Information Work Quantity in Computer Network ..... 16

### ELECTRONIC AND ELECTROMAGNETIC DEVICES

- Ziatdinov S. I.** Compensating for Signal Delay in Digital Smoothing Filters ..... 21
- Konnikov I. A.** Evaluation of Crosstalk in Electronic Unit ..... 26
- Zhang A. V., Patrino G. S., Zadvornyy A. G., Seredkin V. A.** Application of Optoelectronic Devices for Observation of Domain Structures in Ferromagnetic Materials ..... 30

### OPTICAL AND OPTO-ELECTRONIC INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Klyuchikov I. A.** Measurement of Average Frequency of Signal in Acousto-Optical Spectroanalyzer with Spatial Non-Invariant Response ..... 33
- Doronin I. S., Okishev K. N., Karpets Yu. M., Kireeva N. M.** Autocorrelation Function of Scattered Radiation in Attenuated Total Reflection Scheme for Nanoparticle Size Measurement ..... 38
- Majorov E. E., Prokopenko V. T.** The Use of Two-Frequency Radiation to Implement the Principles of Heterodyne Holographic Interferometry with a Single Reference Beam.... 43
- Kalinov G. A., Lysakov A. V., Rimlyand V. I.** Automated System for Hydrological Data Gathering ..... 46
- Vasiliev A. S., Krasnyashchikh A. V., Korotaev V. V., Lashmanov O. Yu., Lysenko D. Yu., Nenarokomov O. N., Shirokov A. S., Yaryshev S. N.** Unmanned Aerial Vehicle Computer System for Wildfire Detection by Image Superimposing ..... 50

### NEW EDUCATIONAL TECHNOLOGIES

- Gryazev M. V., Kukhar V. D., Raspopov V. Ya.** Training of Avionics Specialists at Tula State University ..... 56

### BRIEF NOTES

- Bobtsov A. A., Pyrkin A. A.** Rejection Algorithm for Unknown Sinusoidal Disturbance in Nonlinear System with Input Delay ..... 60
- Faronov M. V., Pyrkin A. A., Furtat I. B., Kolubin S. A., Surov M. O., Vedyakov A. A.** Robust Control of Mobile Robots with the Use of Technical Vision ..... 63

<b>Alyokhin A. A., Gorbunova E. V., Chertov A. N., Shitov D. D.</b> Objects Description for Optoelectronic Systems of Color Analysis .....	65
<b>Zagarskikh A. S., Bezgodov A. A., Ivanov S. V., Boukhanovsky A. V.</b> Instrumental Technological Medium for Organization of Virtual Testing Ground on the Base of Cloud Computing.....	67
<b>Khoruzhnikov S. E., Zudilova T. V., Osipov N. A., Prygun V. V.</b> Cloud Technologies for Training Courses .....	70
<b>Kabrovsky V. A.</b> Intellectual System for Active Monitoring of Cloud Environment Resources .....	72
<b>Okhtilev M. Yu., Zelentsov V. A., Potryasaev S. A., Sokolov B. V.</b> Complex Technical Objects Proactive Control Conception and Its Implementation Technologies .....	73
SUMMARY .....	76
THE LIST of ARTICLES PUBLISHED in 2012 .....	84

*Editor-in-Chief E. B. Yakovlev*

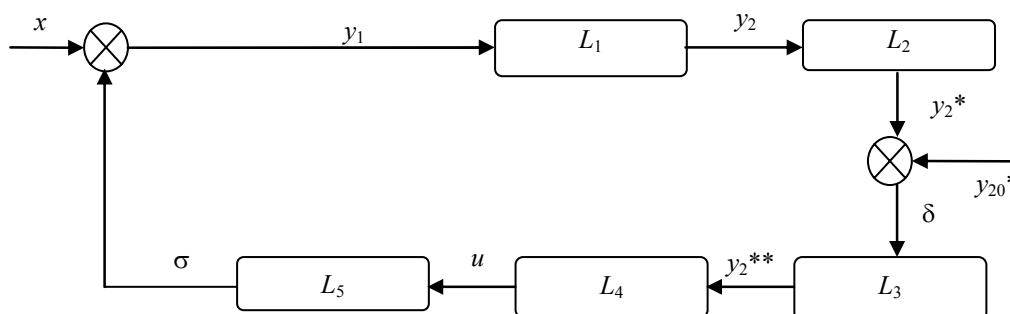
Р. И. Сольнищев, Г. И. Коршунов

## МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ „ПРИРОДА—ТЕХНОГЕНИКА“

Рассматривается система управления „природа—техногеника“, позволяющая снижать концентрацию загрязняющих веществ (ЗВ) в окружающей среде. Представлены математические модели объекта управления как распределенной в пространстве системы. Предлагаемые модели, являющиеся обобщением одномерного случая, описывают пространственное движение потоков ЗВ.

**Ключевые слова:** системы управления, математические модели, пространственный перенос загрязнений.

В работе [1] предложена концепция создания замкнутых систем управления „природа—техногеника“ (ЗСУПТ) для широкого класса объектов (ТЭЦ промышленных предприятий), в которых требуется снижение концентрации загрязняющих веществ (ЗВ) техногенного характера. Концепция создания ЗСУПТ основана на минимизации „человеческого фактора“, обеспечении неразрывности цепочки „мониторинг—очистка“, сокращении потерь информации. Использование разработанного класса систем позволяет снизить экономические издержки, а также учесть упущенную выгоду [2]. Для оценки характеристик ЗСУПТ как систем автоматического управления (САУ) для одиночного источника ЗВ рассматриваются математические модели ЗСУПТ, основанные на анализе и детализации операторов отдельных звеньев ЗСУПТ [3] (см. рисунок).



На структурной схеме представлены операторы преобразования „вход—выход“:  $L_1$  — переноса ЗВ от источника до точки измерения параметра,  $L_2$  — измерительного устройства,  $L_3$  — устройства преобразования,  $L_4$  — устройства управления,  $L_5$  — очистного агрегата с исполнительным устройством,  $x$  — возмущающее воздействие,  $y_1$  — рассогласование,  $y_2$  — измеряемая величина концентрации ЗВ,  $y_2^*$  — результат измерения параметра,  $y_{20}^*$  — его допустимая величина,  $\delta$  — величина отклонения,  $y_2^{**}$  — преобразованный сигнал,  $u$  — сигнал управления,  $\sigma$  — сигнал компенсации возмущения.

Если операторы  $L_2$ — $L_5$ , преобразующие входные сигналы в выходные, точно описаны линейными, нелинейными и вероятностными моделями с сосредоточенными параметрами [2, 3], то построение моделей, реализующих оператор  $L_1$ , который отображает распределенный объект управления в процессах переноса ЗВ в воздухе, воде, почве, связано со значительными трудностями. Для описания этих процессов используется модель баланса между скоростью изменения значения концентрации ЗВ, составляющими этой скорости от конвекции, диффузии, мощности источника ЗВ и параметров их отвода природными и техногенными средствами. Известные модели такого баланса не позволяют строить математические модели „вход—выход“, необходимые для последующего анализа и синтеза ЗСУПТ при пространственном переносе ЗВ. В статье [3] такая задача решена для одномерного случая, в настоящей работе она решается для математических моделей объекта управления в ЗСУПТ в трехмерном пространстве.

Применительно к теории САУ модели баланса представляются математическими моделями звеньев системы управления, являющихся объектом управления [4]. В рассматриваемом случае такие звенья позволяют привести математические модели с распределенными параметрами к форме „вход—выход“, необходимой для решения классических задач анализа, синтеза и расчета САУ.

Используя предлагаемые в настоящей работе модели, можно оценить характеристики потоков ЗВ (от места их возникновения до точки измерения) и при решении обратной задачи.

При формализации процессов переноса обычно вводят следующие переменные [5, 6]: 1)  $C$  — концентрация  $i$ -го ЗВ,  $[кг/м^3]$ , она является скалярной функцией от пространственных координат и времени  $C(x, y, z, t)$ , причем  $x = x(t)$ ,  $y = y(t)$ ,  $z = z(t)$ ; 2)  $\mathbf{J}(x, y, z)$  — вектор-функция потока ЗВ,  $[кг/с]$ ; 3)  $\mathbf{j} = C\mathbf{V}$  — плотность потока,  $[кг/м^2 \cdot с]$ ,  $\mathbf{V}(x, y, z)$  — скорость потока; 4)  $Q(x, y, z, t)$  — масса выброса (сброса) ЗВ,  $[кг]$ .

При выводе математических моделей переноса веществ в разных средах обычно применяют

— закон Фика

$$\mathbf{j} = -D \operatorname{grad} C, \quad (1)$$

где  $D$  — тензор, представленный коэффициентами диффузии,  $[м^2/с]$ ,

— закон сохранения

$$\operatorname{div} \mathbf{j} = -\frac{d\rho}{dt}, \quad (2)$$

где  $\rho$  — плотность вещества. В практических приложениях вместо плотности  $\rho$  используют концентрацию (обычно понятие плотности используется для однородных сред, а понятие концентрации — для смесей).

Уравнения переноса на основе (1), (2) можно получить следующим образом. Рассмотрим полный дифференциал от функции  $C(x, y, z, t)$  в виде:

$$\frac{dC(x, y, z, t)}{dt} = \frac{\partial C}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial C}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial C}{\partial z} \frac{dz}{dt} + \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (3)$$

Здесь  $x(t)$ ,  $y(t)$ ,  $z(t)$  — временные функции переноса ЗВ в пространстве. Следовательно, при

условии несжимаемости вещества ЗВ в потоке  $V(t) = \left( \frac{dx(t)}{dt}, \frac{dy(t)}{dt}, \frac{dz(t)}{dt} \right)$  или

$V = (V_x, V_y, V_z)$ . Условие несжимаемости удовлетворяется для ЗСУПТ в рассматриваемой постановке задачи [1—3].

Тогда уравнение (3) можно представить в виде:

$$\frac{dC}{dt} = \frac{\partial C}{\partial x} V_x + \frac{\partial C}{\partial y} V_y + \frac{\partial C}{\partial z} V_z + \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (4)$$

В соответствии с законом сохранения  $\frac{dC}{dt} = -\text{div } \mathbf{j}$  и согласно (1),

$$\frac{dC}{dt} = -\text{div}(-D\text{grad}C). \quad (5)$$

Полагая поток изотропным, а коэффициенты диффузии  $D_x, D_y, D_z$  в направлениях  $x, y, z$  постоянными, из уравнений (4), (5) найдем:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C}{\partial x} V_x + \frac{\partial C}{\partial y} V_y + \frac{\partial C}{\partial z} V_z = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2}. \quad (6)$$

Представим обобщенное уравнение переноса для разных сред, в котором учтены интенсивность источника ЗВ и параметры нейтрализации веществ природными и техногенными средствами

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -V_x \frac{\partial C}{\partial x} - V_y \frac{\partial C}{\partial y} - V_z \frac{\partial C}{\partial z} + D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + K_1 Q - K_2 C. \quad (7)$$

Коэффициент  $K_1, \left[ \frac{1}{\text{м}^3 \cdot \text{с}} \right]$ , определяет степень преобразования потока вещества в ЗВ

(например, топлива для теплоэнергоснабжения — в диоксид серы) и зависит от вида вещества и характера преобразований (например, режима горения топлива). При возрастании интенсивности потока величина  $K_1$  возрастает и на отдельных участках может быть аппроксимирована линейной функцией. Для разных видов вещества (например, топлива) значения  $K_1$  заданы в работах [5, 6].

Коэффициент  $K_2, [1/\text{с}]$ , определяет степень поглощения ЗВ как техногенными, так и природными средствами. Значение „техногенной“ составляющей  $K_2$  определяется параметрами абсорбции, хемосорбции, адсорбции, термической нейтрализации и др. Для некоторых методов (например, абсорбции) зависимость  $K_2$  представляется аналитически, для других, например процессов хемосорбции и адсорбции, эмпирически. В работах [5, 6] приведены экспериментальные зависимости, представляющие монотонно возрастающую функцию. „Природная“ составляющая зависит от метеорологических, химических и других внешних параметров и учитывается на основе усредненных статистических данных. В настоящей работе коэффициенты  $K_1, K_2$  считаются постоянными величинами.

Уравнение (7) следует дополнить граничными и начальными условиями:

$$\begin{aligned} C(x_0, y_0, z_0, t) &= C_0(t_0), C(x, y, z, t_0) = \\ &= C_0(t), \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{x_0, y_0, z_0} = P_{10}(t), \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{x_0, y_0, z_0} = P_{20}(t), \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{x_0, y_0, z_0} = P_{30}(t), \\ V(x_0, y_0, z_0, t) &= V_0(t), \\ C(L, R, H, t) &= C_\infty(t), \text{ при } x = L, y = R, z = H, \\ V(L, R, H) &= V_\infty(t), \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x} \Big|_{L, R, H} = P_{1\infty}(t), \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial y} \Big|_{L, R, H} = \\ &= P_{2\infty}(t), \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial z} \Big|_{L, R, H} = P_{3\infty}(t). \end{aligned}$$

Далее его необходимо привести к виду „вход—выход“, удобному для моделирования, анализа и синтеза ЗСУПТ как САУ [3].

Общее дифференциальное уравнение в частных производных (ДУЧП) второго порядка имеет вид

$$F\left(q, x_1, x_2, \dots, x_n, \frac{\partial q}{\partial x_1}, \frac{\partial q}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial q}{\partial x_n}, \frac{\partial^2 q}{\partial x_1^2}, \frac{\partial^2 q}{\partial x_2^2}, \dots, \frac{\partial^2 q}{\partial x_i \partial x_k}, \dots, \frac{\partial^2 q}{\partial x_n^2}\right) = 0, \quad (8)$$

где  $q$  — искомая функция  $q(x_1, x_2, \dots, x_n)$ ;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — независимые переменные, а функ-

ция  $q$  задана в неявной форме. Обозначив  $\frac{\partial q}{\partial x_i} = P_i$ ,  $\frac{\partial^2 q}{\partial x_i \partial x_k} = P_{ik}$ , перепишем это уравнение:

$$F(q, x_1, x_2, \dots, x_n, P_1, P_2, \dots, P_n, P_{11}, P_{12}, \dots, P_{nn}) = 0. \quad (9)$$

В случае  $i = k$   $\frac{\partial^2 q}{\partial x_i^2} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \frac{\partial q}{\partial x_i} \right) = \frac{\partial P_i}{\partial x_i}$ ,  $P_{ik} = \frac{\partial P_i}{\partial x_i}$ , и получаем ДУЧП первого порядка по

отношению к функциям  $P_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ):

$$F\left(q, x_1, \dots, x_n, P_1, P_2, \dots, P_n, \frac{\partial P_1}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial P_n}{\partial x_n}\right) = 0. \quad (10)$$

Применив это преобразование к уравнению (7)

$$\frac{dC}{dt} + V_x \frac{\partial C}{\partial x} + V_y \frac{\partial C}{\partial y} + V_z \frac{\partial C}{\partial z} = D_x \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + D_y \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} + D_z \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} + K_1 Q - K_2 C, \quad (11)$$

получим

$$D_x \frac{\partial P_1}{\partial x} + D_y \frac{\partial P_2}{\partial y} + D_z \frac{\partial P_3}{\partial z} = V_x P_1 + V_y P_2 + V_z P_3 + P_4 + K_2 C - K_1 Q. \quad (12)$$

Попарно фиксируя  $(\bar{P}_3, \bar{P}_2)$ ,  $(\bar{P}_3, \bar{P}_1)$ ,  $(\bar{P}_1, \bar{P}_2)$ , получим систему уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial P_1}{\partial x} &= \frac{1}{D_x} (K_2 C + V_x P_1 + V_y P_2 + V_z P_3 + P_4 - K_1 Q), \\ \frac{\partial P_2}{\partial y} &= \frac{1}{D_y} (K_2 C + V_y P_2 + V_x P_1 + V_z P_3 + P_4 - K_1 Q), \\ \frac{\partial P_3}{\partial z} &= \frac{1}{D_z} (K_2 C + V_z P_3 + V_y P_2 + V_x P_1 + P_4 - K_1 Q). \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Представим эту систему в виде обыкновенных дифференциальных уравнений в симметрической форме (ОДУСФ) [7]. По переменной  $P_1$  имеем:

$$\frac{dP_1}{\frac{1}{D_x} (V_x P_1 + V_y P_2 + V_z P_3 + P_4 + K_2 C - K_1 Q)} = \frac{dx}{1}. \quad (14)$$

Аналогичным образом поступаем с двумя другими уравнениями системы (13).

С помощью таких уравнений характеристик [7] решение полевых задач, к которым и относится рассматриваемая здесь задача, сводится к интегрированию ОДУСФ. Найдем частные интегралы ОДУСФ, проинтегрировав (14):

$$a_1 [\ln(a_1 P_1 + b_1) - \ln(a_1 P_{10} + b_1)] = (x - x_0), \quad (15)$$

где

$$a_1 = \frac{V_x}{D_x}, \quad b_1 = \frac{1}{D_x} (K_2 C + V_y P_2 + V_z P_3 + P_4 - K_1 Q). \quad (16)$$



Применив операцию потенцирования к (15), получим

$$P_1 = \frac{1}{a_1} \left[ e^{a_1(x-x_0)} (a_1 P_{10} + b_1) - b_1 \right]. \quad (17)$$

Поскольку  $P_1 = \frac{\partial C(x, y, z, t)}{\partial x}$ , то получим еще одно ДУЧП первого порядка, но теперь по отношению к искомой функции  $C(x, y, z, t)$ :

$$\frac{\partial C}{\partial x} = e^{a_1(x-x_0)} P_{10} + b_1 \left( \frac{1}{a_1} e^{a_1(x-x_0)} - \frac{1}{a_1} \right). \quad (18)$$

Осуществив преобразование Лапласа к  $C(x, y, z, t)$ ,  $Q(x, y, z, t)$  как функциям  $t$ , найдем

$$\frac{\partial C(s, x, y, z)}{\partial x} = a_2 + C(s, x, y, z) \left( \frac{K_2}{D_x} + \frac{C_0}{D_x} \right) - \frac{K_1}{D_x} Q(s, x, y, z) + b_2, \quad (19)$$

где  $a_2 = e^{a_1(x-x_0)} P_{10}$ ,  $b_2 = \frac{V_y}{D_y} P_2 + \frac{V_z}{D_z} P_3$ ,  $s$  — оператор Лапласа.

Приведем это уравнение к симметрической форме

$$\frac{\partial C(x, y, z, s)}{\partial x} = \frac{dx}{1}, \quad (20)$$

$$C(x, y, z, s) \left( \frac{K_2}{D_x} + \frac{s}{D_x} \right) - \frac{K_1}{D_x} Q(x, y, z, s) + a_2 + b_2$$

тогда частный интеграл будет:

$$C(x, y, z, s) = \frac{1}{a_3} e^{(x-x_0)a_3} C_0(s) - \frac{b_3}{a_3} + \frac{b_3}{a_3} e^{(x-x_0)a_3}. \quad (21)$$

где  $a_3 = \frac{K_2}{D_x} + \frac{s}{D_x}$ ,  $b_3 = \frac{K_1}{D_x} Q(x, y, z, s) + a_2 + b_2$ .

Аналогичные соотношения получаются при интегрировании двух других уравнений системы (13).

Раскрыв  $a_3$ ,  $b_3$ ,  $a_2$ ,  $b_2$ ,  $a_1$ ,  $b_1$ , найдем

$$C(x, y, z, s) = C_0(s) e^{\left( \frac{K_2 + s}{D_x} \right) (x-x_0)} + \left[ \frac{V_y}{D_x} \bar{P}_2 + \frac{V_z}{D_x} \bar{P}_3 + e^{\frac{V_x}{D_x} (x-x_0)} P_{10} - \frac{K_1}{D_x} Q(x, y, z, s) \right] \times \left[ \frac{1}{\frac{K_2 + s}{D_x} + \frac{s}{D_x}} e^{\left( \frac{K_2 + s}{D_x} \right) (x-x_0)} - \frac{1}{\frac{K_2 + s}{D_x} + \frac{s}{D_x}} \right]. \quad (22)$$

В результате получим связи выходных функций, в данном случае  $C(x, y, z, s)$ , с входными  $C_0(s)$  параметрами и возмущающими воздействиями на объект управления ( $V_x, V_y, V_z, D_x, D_y, D_z, K_1, K_2, Q$ ). При этом может быть найдена модель объекта управления в форме „вход—выход“, что позволит получать оперативные оценки и прогноз концентраций ЗВ в рассматриваемом районе, в том числе трансграничных переносов.

Полученная обобщенная математическая модель может быть сведена к рассмотренным в работе [3] частным случаям. Например, рассматривая только конвекцию по координате  $x$ , из исходной системы (13) получим соотношение

$$\frac{\partial C(x, t)}{\partial t} + V_x \frac{\partial C(x, t)}{\partial x} = K_1 Q - K_2 C.$$

$$\text{Соответствующее ОДУСФ} \quad \frac{dt}{1} = \frac{dx}{V_x} = \frac{\partial C}{K_1 Q - K_2 C}$$

при

$$x|_{t=0} = x_0, C(0, x_0) = C_0, Q(0, x_0) = Q_0, 0 \leq t \leq T, C \Big|_{x=L} = C(L, T).$$

Из общего уравнения (22) найдем соответствующее уравнение „вход—выход“

$$C(L, T) = C_0 e^{-K_2 T} - \frac{K_1}{K_2} Q_0 (1 - e^{-K_2 T}). \quad (23)$$

Используя формулы (22), (23) и аналогичные им уравнения из системы (13), возможно проводить анализ, синтез и расчет ЗСУПТ как САУ, строить математические модели „вход—выход“ при пространственном движении ЗВ в процессах переноса, в том числе трансграничного, и выполнять перспективные и ретроспективные оценки концентрации ЗВ. Предложенные модели не содержат ограничений на вид среды (воздух, вода, почва), поэтому они могут быть адаптированы к многим частным приложениям при условии определения коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  для рассмотренных сред. Приведенные модели применимы также для известных случаев гауссова распределения параметров точечных источников ЗВ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Solnitsev R.* The instrumentation in human safety // ISA. South America region. Sao-Paolo, Brasil, 1995. Desembo. P. 412—415.
2. *Сольницев Р. И., Коришунов Г. И.* Инновационный проект „Замкнутая система управления природа—техногеника“ // Изв. ГУАП. 2011. № 1. С. 145—152.
3. *Сольницев Р. И.* Вопросы построения замкнутой системы управления „Природа—Техногеника“ // Изв. ЛЭТИ. 2009. № 7. С. 21—32.
4. Теория автоматического управления / Под ред. *В. В. Солодовникова*. М.: Машиностроение, 1967.
5. *Дульнев Г. Н.* Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. М.: Высш. школа, 1989.
6. *Белов С. В., Барбинов Ф. А., Козьянов А. Ф.* и др. Охрана окружающей среды. М.: Высш. школа, 1990.
7. *Смирнов В. И.* Курс высшей математики. М.—Л.: ГИТТЛ, 1951. Т. IV.

#### Сведения об авторах

- Ремир Иосифович Сольницев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра системного анализа и логистики; E-mail: remira70@mail.ru
- Геннадий Иванович Коришунов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, кафедра инноватики и управления качеством; E-mail: kgi@pantes.ru

Рекомендована кафедрой  
инноватики и управления качеством

Поступила в редакцию  
24.05.12 г.

С. В. ДВОРНИКОВ, Е. В. КАЗАКОВ, А. А. УСТИНОВ, А. П. ЧИХОНАДСКИХ

## ВЫБОР МОДЕЛИ СЕКВЕНТНОГО СИГНАЛА ДЛЯ СИСТЕМЫ СВЯЗИ

Представлены результаты исследования моделей секвентных сигналов, сформированных на основе сверхкратковременных импульсов, для использования в системах связи. Определены параметры, обеспечивающие наилучшее распределение плотности спектральной энергии. Обоснован выбор двуполярного сигнала на основе импульсов Гаусса с минимальным сдвигом между их медианными значениями.

**Ключевые слова:** системы связи, секвентные сигналы, спектральное распределение.

С середины 20-го века активно ведутся работы по созданию использующих широкополосные или „шумоподобные“ сигналы систем связи, обеспечивающих высокую энергетическую скрытность по отношению к комплексам радиомониторинга.

Как правило, формирование „шумоподобных“ сигналов основывается на технологии расширения спектра. Расширение спектра обусловлено тем, что полоса частот, используемая для передачи сигнала, намного шире минимальной, необходимой для передачи данных [1]. Между тем свойство широкополосности присуще и так называемым секвентным сверхкратковременным импульсам (ССИ) нано- и пикосекундной длительности [2].

Наиболее полно вопрос увеличения количества информации, передаваемой в канале связи, за счет уменьшения длительности сигнала был рассмотрен Х. Хармутом [2], который ввел название „секвентный сигнал“, т.е. сигнал без несущей, относящийся к классу сверхширокополосных. К основным достоинствам систем связи, использующих ССИ, следует отнести:

- высокую скорость передачи данных (до сотен мегабит/с);
- защищенность от активных узкополосных и широкополосных помех;
- возможность использования многолучевого распространения радиоволн для повышения качества связи за счет временного разделения прямых и переотраженных сигналов и их последующего накопления;
- низкую спектральную плотность средней излучаемой мощности, что обеспечивает повышение скрытности самого факта работы формирующих их радиоэлектронных средств.

Следует отметить, что до сих пор нет четкой концепции применения ССИ в системах связи. Наиболее удачное математическое описание различных моделей сверхширокополосных сигналов применительно к передаче информации связи было сделано в работе [3]. Затем в статье [4] одна из полученных моделей на основе сглаженного манчестерского импульса была рассмотрена в качестве информационной единицы. Между тем данный вопрос требует серьезного исследования с целью выработки общих принципов применения ССИ. В настоящей статье затронут один из аспектов, связанный с обоснованием выбора модели рассматриваемых сигналов с позиций их спектральной эффективности.

Одним из основных показателей, характеризующих свойство широкополосности сигнала, является его база. Сигнал считается широкополосным, если его база больше единицы. Между тем секвентные сигналы нано- и пикосекундной длительности не являются широкополосными, поскольку их база равна единице. Однако при этом спектральные свойства ССИ близки к свойствам сигналов, база которых значительно больше единицы [1]. В связи с этим

широкополосность сигналов целесообразно рассматривать с позиций относительной величины полосы частот, занимаемой сигнальной выборкой.

Согласно работе [5], для передачи информации на основе ССИ используется время-импульсная модуляция (ВИМ), в которой значение логической единицы или нуля определяется временным положением полезного сигнала в пределах фрейма. Когда сигнальная выборка равна длительности фрейма, простейший способ информационного кодирования реализуется путем излучения или не излучения полезного сигнала в пределах фрейма. Другой подход к информационному кодированию заключается в жестком определении позиций слотов, в пределах которых размещаются или логические единицы, или логические нули.

Кроме того, интересным представляется информационное кодирование на основе нескольких полезных сигналов. Указанный подход, предусматривающий наличие правила, согласно которому происходит отбор фреймов для формирования информационного бита, обеспечивает определенную структурную скрытность передаваемых сообщений.

Рассмотренный принцип информационного кодирования в системах связи, использующих ССИ, позволяет заключить, что характер их работы определяет форма полезного сигнала.

С одной стороны, желательно, чтобы ССИ имел относительно простое аналитическое описание, позволяющее осуществлять реализацию быстрых алгоритмов его синтеза; с другой — он должен обладать рядом положительных свойств, делающих его применение эффективным с точки зрения выбранной целевой установки. К таким свойствам относятся однородность плотности спектральной энергии в пределах заданной полосы, непрерывность фазовых характеристик, максимальная концентрация спектральной мощности в пределах главного „лепестка“ и др.

Полезный сигнал в виде ССИ  $s(t)$  характеризуется тем, что аналитическая функция представления содержащей его выборки всегда равна нулю вне слота (временного интервала) существования:

$$z(t) = \begin{cases} s(t), & \text{если } t = \tau_0; \\ 0, & \text{если } t \neq \tau_0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $\tau_0$  — длительность импульса.

Спектральная плотность ограниченного во времени непрерывного ССИ (1) описывается спектральной функцией:

$$\dot{A}(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(t) \exp(-j2\pi ft) dt = \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} s(t) \exp(-j2\pi ft) dt. \quad (2)$$

Результат в выражении (2) является комплексной функцией. Для случая, когда  $\tau_0$  достаточно мало, значение  $\exp(\pm j2\pi f \tau_0 / 2)$  стремится к единице. В работе [3] доказано, что для рассматриваемого случая значение  $\exp(\pm j2\pi f \tau_0 / 2)$  приближается к единице только при  $\tau_0 \ll T_0$ , где  $T_0$  — период, соответствующий частоте  $f(T_0 - \tau_0)$ ,  $\tau_0 = 1/f$ .

Анализ полученных результатов показывает, что одиночный импульс независимо от своей формы всегда имеет сплошной спектр, энергия которого пропорциональна энергии импульса в пределах того интервала частот, в котором его период остается относительно большим по сравнению с длительностью самого импульса. Однако с повышением частоты, когда величина  $T_0$  практически сравнима со значением  $\tau_0$ , функция (2) асимптотически убывает.

Одну из самых простых аналитических моделей имеет манчестерский импульс, используемый, в частности, для кодирования данных в информационных сетях передачи (вычислительных сетях):

$$z(t) = \begin{cases} U, & \text{если } t \in [-\tau_0 / 2; 0]; \\ -U, & \text{если } t \in [0; \tau_0 / 2]; \\ 0, & \text{если } t \notin [-\tau_0 / 2; \tau_0 / 2]. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь  $U$  — амплитуда импульса.

Для расчета спектра манчестерского импульса подставим значение (3) в выражение (2) и после преобразований получим

$$\dot{A}(f) = \int_{-\tau_0/2}^0 U \exp(-j2\pi ft) dt - \int_0^{\tau_0/2} U \exp(-j2\pi ft) dt = \frac{jU}{\pi f} (1 - \cos(\pi f \tau_0)).$$

На практике удобнее работать с модулем спектральной плотности импульса (амплитудным спектром)  $|A(f)|$ , характеризующего распределение энергии импульса вдоль частотной оси.

Для систем связи, использующих ССИ, особый интерес представляют так называемые гладкие радиоизлучения с более равномерным распределением спектральной плотности мощности в частотном диапазоне.

В работе [3] обоснована спектральная эффективность полезных сигналов на основе гауссианов различной формы, что подтверждается и в [4]. Применительно к рассматриваемой проблематике можно аналитически представить функцию Гаусса в следующем виде:

$$s(t) = \exp(-\alpha t^2), \quad (4)$$

где  $\alpha$  — коэффициент масштабирования. Учитывая, что эффективная длительность гауссова импульса определяется из условия десятикратного уменьшения мгновенного значения сигнала [3], рассчитаем область допустимых значений  $\alpha$ , определив  $0,1 = \exp(-\alpha(t/2)^2)$ . Логарифмируя данное выражение, получим  $\ln(0,1) = -\alpha(t/2)^2$ , откуда  $t\sqrt{\alpha} = 2\sqrt{-\ln(0,1)} = 3,035$ .

В общем случае функция (4) безгранична на области определения своего аргумента  $t$ , поэтому для синтеза двуполярного импульса путем объединения двух формирующих функций (импульсов) на ее основе (в дальнейшем двуполярный гауссиан) ограничим область определения аргумента пределами  $[-\tau_0/2; \tau_0/2]$ . В итоге аналитическая модель для двуполярного гауссиана будет иметь следующий вид:

$$z(t) = \begin{cases} U \exp(-\alpha(t + \tau_0/\beta)^2), & \text{если } t \in [-\tau_0/2; 0]; \\ -U \exp(-\alpha(t - \tau_0/\beta)^2), & \text{если } t \in [0; \tau_0/2]; \\ 0, & \text{если } t \notin [-\tau_0/2; \tau_0/2]. \end{cases} \quad (5)$$

Здесь множитель  $\beta$  определяет расстояние между медианами формирующих импульсов. Тогда, в соответствии с (2), для  $U = 1$  спектр гауссова импульса представим как

$$\begin{aligned} \dot{A}(f) &= \int_{-\tau_0/2}^{\tau_0/2} z(t) \exp(-j2\pi ft) dt = \\ &= \int_{-\tau_0/2}^0 \exp(-\alpha(t + \tau_0/\beta)^2) \exp(-j2\pi ft) dt - \int_0^{\tau_0/2} \exp(-\alpha(t - \tau_0/\beta)^2) \exp(-j2\pi ft) dt. \end{aligned} \quad (6)$$

Согласно [3], выражение (6) преобразуется к виду:

$$\dot{A}(f) = \sqrt{\pi/\alpha} \left( \exp \left[ \frac{(j\alpha\tau_0 - 2\pi f)\pi f}{2\alpha} \right] - \exp \left[ \frac{-(j\alpha\tau_0 + 2\pi f)\pi f}{2\alpha} \right] \right). \quad (7)$$

Анализ спектральной функции (7) показывает, что она во многом определяется отношением  $f/\alpha$  и значением  $\tau_0$ , а также величиной сдвига положения максимумов двуполярного гауссиана относительно друг друга на временной оси. Так, максимальный сдвиг (рис. 1), обеспечивающий минимальное перекрытие формирующих функций, будет получен при  $\beta = 4$ . Спектр двуполярного гауссиана (распределение плотности спектральной энергии) при максимальном сдвиге (кривая 1) между формирующими функциями в сравнении с нормированным спектром манчестерского импульса (кривая 2) представлен на рис. 2.

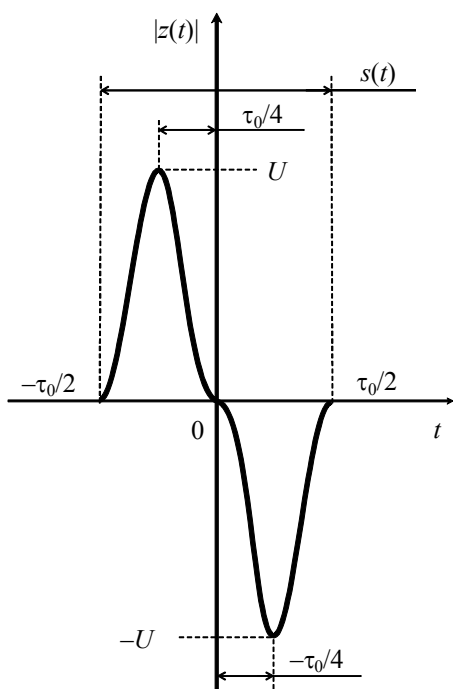


Рис. 1

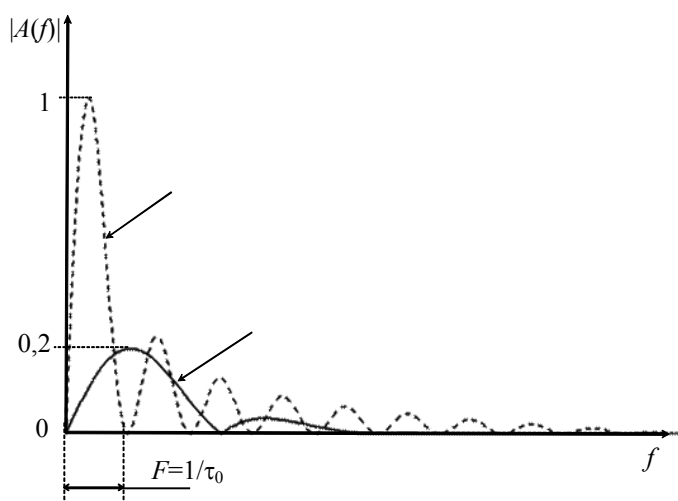


Рис. 2

Форма огибающей (7) непосредственно зависит от величины сдвига между положениями максимумов формирующих двуполярный гауссиан функций Гаусса на временной оси (см. рис. 1). Между тем на рис. 2 видны ярко выраженные провалы в функции спектральной плотности двуполярного гауссиана, что является нежелательным явлением для практического применения рассматриваемого импульса в качестве модели ССИ.

Избежать указанных провалов, обусловленных разрывом формирующей функции в точке ноль, возможно за счет повышения гладкости формирующей функции. Так, на рис. 3 представлен двуполярный гауссиан, сформированный путем максимального перекрытия формирующих функций. Поскольку функция, представленная на рис. 3, обладает максимальной степенью гладкости, то ее спектр (рис. 4, 1 — двуполярный гауссиан, 2 — манчестерский импульс) не имеет провалов (энергия сосредоточена в пределах главного „лепестка“; „лепесток“ только один).

Анализируя характер спектральной функции, определим значения ее частотных границ  $\Delta F_3$ , охватывающих, например, 99 % энергии импульса. Поскольку данная функция монотонно убывает справа, то предлагается диапазон  $\Delta F_3$  определять по граничному значению  $f_B$ .

Важным параметром спектральной функции является ее максимальное значение  $f_M$ , чтобы его определить, необходимо найти производную от (7) по параметру  $f$ . Согласно расчетам, максимальное значение  $U$ , соответствующее  $f_M$ , составляет 0,177 от нормированной величины спектральной функции манчестерского импульса. Причем максимальный спектральный компонент  $f_M$  делит диапазон  $\Delta F_3$  в соотношении 1/3, а амплитудное соотношение  $f_B / f_M = 0,05$ .

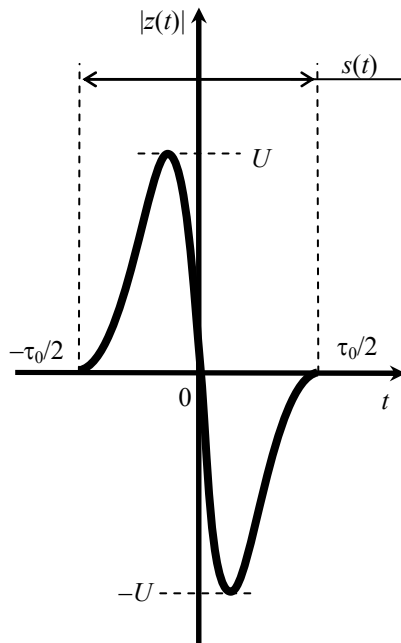


Рис. 3

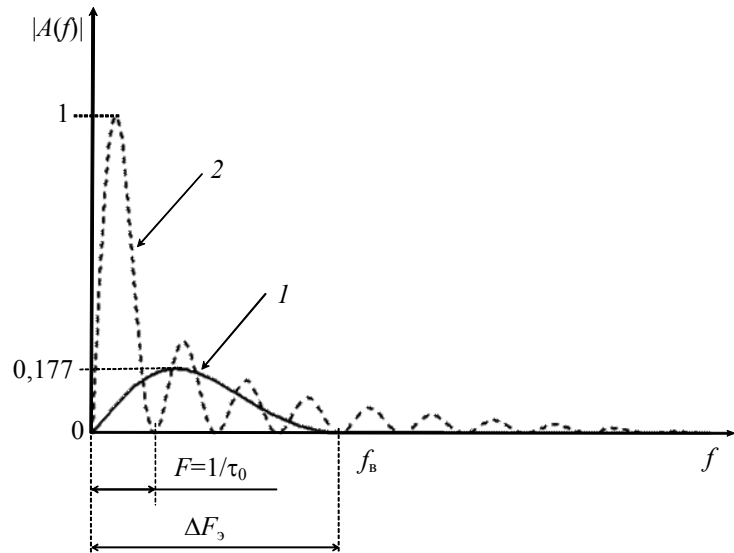


Рис. 4

Отметим также, что спектр двуполярного гауссиана при минимальном сдвиге формирующих функций в 4,6 раза шире первого „лепестка“ спектра прямоугольного импульса той же длительности.

Экспериментально установлено, что максимальное расстояние между медианами формирующих импульсов, при котором итоговый спектр еще носит „однолепестковый“ характер, не должно превышать  $\tau_0 / 5$ .

Анализ расчетов и результатов моделирования показал, что в качестве моделей ССИ целесообразно использовать двуполярные моноимпульсы, полученные на основе формирующих функций Гаусса, взятых с противоположным знаком и имеющих минимально возможный сдвиг между их медианными значениями. Такой выбор позволит обеспечить максимальную спектральную эффективность сигналов в частотном диапазоне с точки зрения равномерности распределения энергии.

По мнению авторов, целесообразно также рассмотреть модели ССИ на основе производных формирующих функций и степенных преобразований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев В. А. Сигналы современных зарубежных систем электросвязи. СПб: ВАС, 2007. 368 с.
2. Хармут Х. Теория секвентного анализа. Основы и применения. М.: Мир, 1980. 576 с.
3. Дворников С. В., Железняк В. К. Основы теории модулированных колебаний. СПб: ГУАП, 2006. 160 с.
4. Чельшев В. Д., Потапов С. Г., Фокин А. О. UWB — начальные представления во временной и спектральной областях // Информация. Космос. 2007. № 1. С. 45—59.

5. Имморев И. Я., Судаков А. А. Сверхширокополосная помехоустойчивая система скрытой связи с высокой скоростью передачи данных // Тр. Всеросс. науч. конф. „Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике“ (СРСА 2003). Муром, 2003. С. 435—440.

#### Сведения об авторах

- Сергей Викторович Дворников** — д-р техн. наук, доцент; Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург; старший научный сотрудник; E-mail: practicsdv@yandex.ru
- Евгений Валерьевич Казаков** — Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург; начальник лаборатории; E-mail: kazakov@fstec-szfo.ru
- Андрей Александрович Устинов** — д-р техн. наук, профессор; Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург; ведущий научный сотрудник; E-mail: ustinov.a@yandex.ru
- Александр Павлович Чихонадских** — канд. техн. наук, старший научный сотрудник; Государственный научно-исследовательский институт прикладных проблем, Санкт-Петербург; начальник центра; E-mail: spchih@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
радиоэлектроники ВАС

Поступила в редакцию  
22.05.12 г.

УДК 621.324

В. А. СМАГИН, И. Ю. ПАРАМОНОВ

## ОЦЕНИВАНИЕ КОЛИЧЕСТВА ИНФОРМАЦИОННОЙ РАБОТЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ

Предлагается метод расчета моментов и закона распределения количества информационной работы компьютерной сети, состоящей из нескольких взаимосвязанных узлов, при постоянной пропускной способности и произвольных законах распределения времени функционирования узлов. Метод пригоден и для сетевых структур, не связанных с преобразованием информации.

**Ключевые слова:** эффективная работа, информационная сеть, плотность и функция распределения, пропускная способность, матричный метод.

Компьютерные сети — неотъемлемый элемент современной цивилизации. На их основе строятся системы управления объектами различного назначения [1]. Для управления сложными объектами все чаще применяется сетевое управление.

Возрастание сложности систем управления и информационных сетей неизбежно приводит к удорожанию их создания и применения. Кроме того, ухудшаются отдельные эксплуатационные характеристики объектов, несмотря на наличие положительных системных эффектов. Поэтому количественное изучение свойств сетей необходимо для сравнения их друг с другом и выбора наилучших: экономных в эксплуатации, быстродействующих и т. д.

Одной из важнейших характеристик информационных сетей является величина (количество) их эффективной информационной работы, под которой будем понимать количество информации полученной на выходе сети за время ее функционирования.

**Формализация задачи.** Рассмотрим сеть, состоящую из  $M$  узлов. Представим ее в виде ориентированного графа с нулевым узлом (исток), узлами  $1, 2, \dots, M$  и выходным узлом  $(M + 1)$  — стоком. Переходы между узлами определим матрицей вероятностей передач сети  $p_{i,j}$ . Положим, что значения плотности распределения длительности пребывания в рабочем состоянии всех узлов  $f_i(t)$  известны [2]. Также положим, что известна пропускная способность



(производительность)  $I_i$  всех узлов сети (число операций в единицу времени). Задача состоит в том, чтобы определить значение плотности распределения вероятности величины работы, выполняемой сетью при переходе от ее истока к стоку, по которому можно определить начальные моменты и функцию распределения количества работы сети. Решив эту задачу, можно также определить количество работы, выполняемой на траектории между  $i$ -м и  $j$ -м узлами сети ( $i = \overline{0, M+1}$ ;  $j = \overline{0, M+1}$ ;  $i \neq j$ ). Метод решения задачи основывается на предположении о вероятностной независимости значений времени функционирования узлов. Однако это ограничение при необходимости может быть снято, что приведет только к усложнению математического алгоритма решения задачи и длительности получения численных расчетов.

Чтобы перейти от времени пребывания узлов в работоспособном состоянии к величине работы, выполняемой узлами, выполним простое преобразование  $\bar{W}_i = I_i \bar{t}_i$  ( $\bar{W}_i$  — случайная величина работы в  $i$ -м узле сети за случайное время  $\bar{t}_i$ ). Плотность распределения вероятности величины работы будет равна:

$$\varphi_i(w) = \frac{1}{I_i} f_i\left(\frac{w}{I_i}\right). \quad (1)$$

Размерность данной плотности — величина, обратная числу операций в единицу времени. В технологических приложениях плотность может измеряться как стоимость на единицу времени.

В дальнейшем требуется на любой траектории случайного процесса суммировать количество работы, поэтому представим соотношение (1) в преобразовании Лапласа:

$$g_i(s) = f_i^\circ(I_i s), \quad (2)$$

где  $\circ$  — символ преобразования,  $s$  — переменная Лапласа.

Введем в рассмотрение матрицу:

$$G(s) = \begin{bmatrix} P_{0,0} & P_{0,1} & \cdots & P_{0,M} & P_{0,M+1} \\ P_{1,0}g_1(s) & P_{1,1}g_1(s) & \cdots & P_{1,M}g_1(s) & P_{1,M+1}g_1(s) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ P_{M,0}g_M(s) & P_{M,1}g_M(s) & \cdots & P_{M,M}g_M(s) & P_{M,M}g_M(s) \\ P_{M+1,0} & P_{M+1,1} & \cdots & P_{M+1,M} & P_{M+1,M+1} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Каждый элемент матрицы  $p_{i,j}g_i(s)$  есть произведение преобразования Лапласа плотности вероятности количества выполненной работы в  $i$ -м узле сети на вероятность перехода после завершения работы в  $i$ -м узле в узел  $j$ . Величина работы в нулевом и  $M+1$  узлах полагается равной нулю, а  $g_0(s) = g_{M+1}(s) = 1$ .

Изображение Лапласа плотности распределения количество работы между узлами  $i$  и  $j$  сети будет равно элементу  $(i, j)$  матрицы  $T(s)$  вида:

$$T(s) = I + G(s) + G^2(s) + \cdots = I / (I - G(s))^{-1}, \quad (4)$$

где  $I$  — единичная матрица.

В соответствии с правилом вычисления обратной матрицы элемент  $(i, j)$  равен [5]:

$$Y_{i,j}(s) = A_{j,i}(s) / R(s), \quad (5)$$

где  $A_{j,i}(s)$  — алгебраическое дополнение элемента  $(i, j)$  матрицы  $T(s)$ ;  $R(s)$  — определитель матрицы  $T(s)$ . Из (5) следует, что преобразование Лапласа плотности распределения величины работы в сети будет равно:

$$Y_{0,M+1}(s) = A_{M+1,0}(s) / R(s). \quad (6)$$

Если величину работы в каждом узле сети задать начальными моментами, то можно предложить алгоритм определения ее начальных моментов между  $i$ -м и  $j$ -м узлами сети. Алгоритм учитывает связь между  $k$ -м начальным моментом и  $k$ -й производной преобразования Лапласа в точке  $s = 0$ .

Подставив вместо  $(-1)^k \frac{d^k g_l(s)}{ds^k} \Big|_{s=0}$ ,  $l = \overline{0, M+1}$ , значение  $k$ -го момента распределения величины работы в  $l$ -м узле сети, а вместо  $g_l(s) \Big|_{s=0}$  — единицу, получим  $k$ -й начальный момент распределения величины работы между  $i$ -м и  $j$ -м узлами сети.

По вычисленным начальным моментам с помощью одного из методов, указанных в статьях [3, 4], можно получить аппроксимирующую плотность распределения величины работы, выполненной между узлами  $i$  и  $j$  сети.

Если в модели сети полагать  $I_i = 1$  для всех  $i$ , то в результате анализа получим моменты и плотность распределения вероятности времени пребывания заявки в сети. При таком условии можно использовать эти параметры для анализа в обычных моделях систем массового обслуживания.

**Пример.** Требуется оценить вычислительную работу сети, состоящей из трех взаимосвязанных компьютеров. Стохастический граф сети приведен на рис. 1.

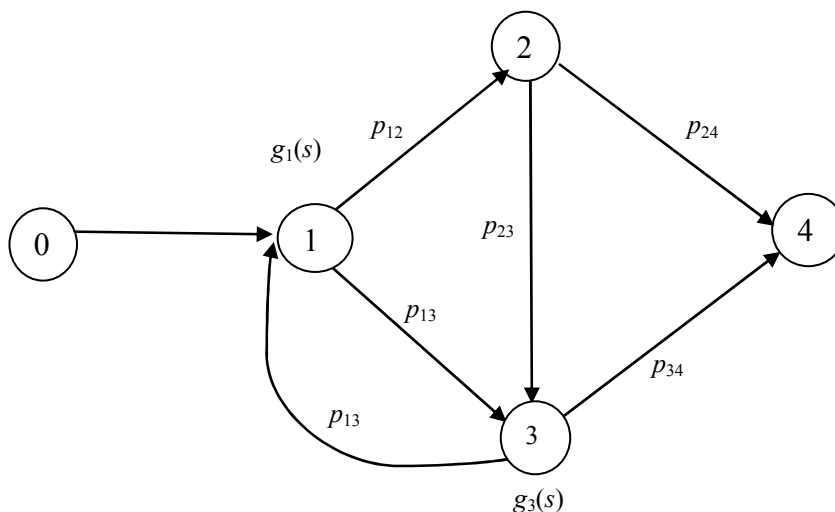


Рис. 1

Заданы значения производительности узлов сети  $I_1=10$ ,  $I_2 = 7$ ,  $I_3 = 4$  операций/ч; плотность распределений времени работы узлов  $f_1(t) = \delta(t - T_1)$ ,  $f_2(t) = \delta(t - T_2)$ ,  $\delta(t) = \delta(t - T_3)$ ,  $T_1 = 12$ ,  $T_2 = 15$ ,  $T_3 = 9$  ч; вероятность переходов между узлами  $p_{12}=0,7$ ;  $p_{13}=0,3$ ;  $p_{23}=0,6$ ;  $p_{24}=0,4$ ;  $p_{31}=0,8$ ;  $p_{34}=0,2$ . Распределения времени работ в примере взяты вырожденными для ускорения решения задачи на компьютере. Изображения плотности распределения количества работы узлов в преобразовании Лапласа принимают вид:  $g_1(s) = e^{-I_1 T_1 s}$ ,  $g_2(s) = e^{-I_2 T_2 s}$ ,  $g_3(s) = e^{-I_3 T_3 s}$ ;  $M = 3$ . Матрицы  $G(s)$  и  $I - G(s)$  представляются в виде:

$$G(s) = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & p_{12}g_1(s) & p_{13}g_1(s) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{23}g_2(s) & p_{24}g_2(s) \\ 0 & p_{31}g_3(s) & 0 & 0 & p_{34}g_3(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{vmatrix},$$

$$(I - G(s)) = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -p_{12}g_1(s) & -p_{13}g_1(s) & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -p_{23}g_2(s) & -p_{24}g_2(s) \\ 0 & -p_{31}g_3(s) & 0 & 1 & -p_{34}g_3(s) \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix}.$$

Элемент матрицы  $(I - G(s))^{-1}$  с номером (0,4), в соответствии с формулой (6), будет равен:

$$Y_{0,4}(s) = \frac{p_{12}g_1(s)p_{23}g_2(s)p_{34}g_3(s) + p_{12}g_1(s)p_{24}g_2(s) + p_{13}g_1(s)p_{34}g_3(s)}{1 - p_{13}g_1(s)p_{31}g_3(s) - p_{12}g_1(s)p_{23}g_2(s)p_{34}g_3(s)}. \quad (7)$$

Подставив исходные данные в (7) и полагая  $s = 0$ , получим  $Y_{0,4}(0) = 1$ , что подтверждает выполнимость условия нормирования плотности. Значения трех начальных моментов, найденные с помощью дифференцирования (7) и взятия пределов при  $s = 0$ , равны:  $v_1 = 517,5$ ;  $v_2 = 423590,5$ ;  $v_3 = 5,08 \cdot 10^8$ . Среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации  $\sigma = 394,7$ ;  $\eta = 0,763$ . Нормировав плотность вероятности с коэффициентом  $C = 1,105$ , вычислим новые значения моментов  $\bar{v}_1 = 535,1$ ;  $\bar{v}_2 = 4,179 \cdot 10^5$ ;  $\bar{v}_3 = 3,833 \cdot 10^8$ , для которых подберем нормальную плотность распределения вероятности. Найдем по ней третий начальный момент и сравним его с вычисленным по формуле (7) третьим моментом. Погрешность этого сравнения не превышает  $\Delta = 10,5\%$ , что вполне удовлетворительно для аппроксимации нормальным распределением. График вероятности  $P(w)$  того, что количество эффективной информационной работы, выполненной в сети, будет не менее  $w$ , приведен на рис. 2.

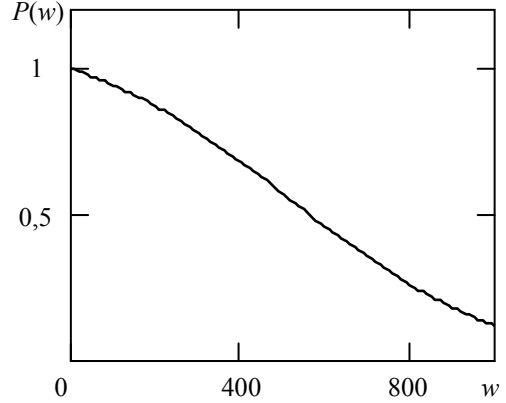


Рис. 2

**Заключение.** Предложен метод определения объема работы, выполненной информационной сетью. В нем используется понятие случайной работы и ее вероятностных характеристик. Для получения интегральной характеристики — количества работы сети — использованы стохастический граф сети и его матричное представление.

Предложенная математическая модель метода может быть применена для сетей самого различного назначения. Вместо показателя эффективной работы в них может использоваться, например, стоимость и т.д. Ограничительные допущения метода (независимость работы узлов, детерминированность их производительности, фиксированность вероятностей переходов) могут быть сняты. Но это приведет к усложнению метода и увеличению времени реализации его на компьютере.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Основы компьютерных сетей. СПб: Питер, 2009. 352 с.
2. Смагин В. А., Бубнов В. П., Филимоныхин Г. В. Расчет вероятностно-временных характеристик пребывания задач в сетевой модели массового обслуживания // Изв. вузов. Приборостроение. 1989. № 2. С. 23—25.
3. Смагин В. А., Филимоныхин Г. В. Аппроксимационный метод расчета разомкнутых сетей массового обслуживания // АВТ. 1986. № 4. С. 28—33.
4. Смагин В. А. Об одном методе исследования немарковских систем // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика. 1983. № 6. С. 31—36.
5. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. М.: Наука, 1988. 548 с.

*Сведения об авторах*

**Владимир Александрович Смагин** — д-р техн. наук, профессор; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, кафедра метрологического обеспечения, Санкт-Петербург; E-mail: va\_smagin@mail.ru

**Иван Юрьевич Парамонов** — канд. техн. наук; Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, отдел перспектив развития АСУ и связи, Санкт-Петербург; начальник отдела; E-mail: ivan\_paramonov@mail.ru

Рекомендована  
отдел перспектив развития АСУ и связи

Поступила в редакцию  
15.05.12 г.

---

---

# ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА

---

---

УДК 621.396:681.323

С. И. ЗИАТДИНОВ

## КОМПЕНСАЦИЯ ЗАДЕРЖКИ СИГНАЛА В ЦИФРОВЫХ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРАХ

Показано, что подавление узкополосных помех сглаживающими фильтрами приводит к значительной задержке сигнала. Исследована возможность компенсации задержки сигнала экстраполяторами. Оценено влияние экстраполяторов на уровень шумов квантования.

*Ключевые слова:* дискретизация сигнала, подавление помехи, задержка сигнала, экстраполирование, шумы квантования.

В цифровых системах обработки сигналов помимо узкополосных и широкополосных помех дополнительно действуют шумы квантования сигнала по уровню, вызванные работой аналого-цифрового преобразователя.

Рассмотрим задачу выделения гармонического сигнала на фоне шумов квантования и гармонической помехи с частотой  $\omega_n$ . Для снижения влияния помех используются сглаживающие фильтры с необходимой частотной характеристикой. Однако применение сглаживающих фильтров неизбежно приводит к задержке сигнала, что в ряде практических случаев недопустимо.

Пусть в качестве сглаживающих фильтров используются фильтры Баттерворта нижних частот [см. лит.], имеющие наиболее крутой спад амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) в области высоких частот.

В непрерывном варианте частотные передаточные функции фильтров Баттерворта имеют вид

$$W_s(j\omega) = 1 / \left[ 1 + \sum_{i=1}^s a_i \left( j \frac{\omega}{\omega_0} \right)^i \right], \quad (1)$$

где  $s$  — порядок фильтра,  $\omega_0$  — частота среза,  $a_i$  — весовые коэффициенты.

При этом для фильтра первого порядка ( $s=1$ )  $a_1 = 1$ ; второго ( $s=2$ ) —  $a_1 = \sqrt{2}$ ,  $a_2 = 1$ ; третьего ( $s=3$ ) —  $a_1 = 2$ ,  $a_2 = 2$ ,  $a_3 = 1$ ; четвертого ( $s=4$ ) —  $a_1 = 2,613$ ;  $a_2 = 3,414$ ;  $a_3 = 2,613$ ;  $a_4 = 1$ .

Сделав замену в формуле (1)

$$j\omega = \frac{2}{T} \frac{z-1}{z+1},$$

где  $z = e^{j\omega T}$ ,  $T$  — период дискретизации входного сигнала, получим частотную передаточную функцию дискретного фильтра Баттерворта в плоскости  $z$

$$W_s(z) = a_1(1+z^{-1})^s / \left[ 1 + \sum_{i=1}^s b_i z^{-i} \right]. \quad (2)$$

Здесь

для  $s=1$ :

$$a_1 = T / (T + 2\omega_0^{-1}); \quad b_1 = (T - 2\omega_0^{-1}) / (T + 2\omega_0^{-1});$$

для  $s=2$ :

$$a_1 = T^2 / (4\omega_0^{-2} + 2\sqrt{2}T\omega_0^{-1} + T^2); \quad b_1 = 2(T^2 - 4\omega_0^{-2}) / (4\omega_0^{-2} + 2\sqrt{2}T\omega_0^{-1} + T^2);$$

$$b_2 = (4\omega_0^{-2} - 2\sqrt{2}T\omega_0^{-1} + T^2) / (4\omega_0^{-2} + 2\sqrt{2}T\omega_0^{-1} + T^2);$$

для  $s=3$ :

$$a_1 = T^3 / (8\omega_0^{-3} + 8T\omega_0^{-2} + 4T^2\omega_0^{-1} + T^3);$$

$$b_1 = -(24\omega_0^{-3} + 16T\omega_0^{-2} - 8T^2\omega_0^{-1} - 3T^3) / (8\omega_0^{-3} + 8T\omega_0^{-2} + 4T^2\omega_0^{-1} + T^3);$$

$$b_2 = (24\omega_0^{-3} - 8T\omega_0^{-2} - 4T^2\omega_0^{-1} + 3T^3) / (8\omega_0^{-3} + 8T\omega_0^{-2} + 4T^2\omega_0^{-1} + T^3);$$

$$b_3 = -(8\omega_0^{-3} - 8T\omega_0^{-2} + 4T^2\omega_0^{-1} - T^3) / (8\omega_0^{-3} + 8T\omega_0^{-2} + 4T^2\omega_0^{-1} + T^3);$$

для  $s=4$ :

$$a_1 = T^4 / (16\omega_0^{-4} + 20,904T\omega_0^{-3} + 13,656T^2\omega_0^{-2} + 5,226T^3\omega_0^{-1} + T^4);$$

$$b_1 = - \frac{64\omega_0^{-4} + 41,808T\omega_0^{-3} - 5,226T^3\omega_0^{-1} - 4T^4}{16\omega_0^{-4} + 20,904T\omega_0^{-3} + 13,656T^2\omega_0^{-2} + 5,226T^3\omega_0^{-1} + T^4};$$

$$b_2 = \frac{96\omega_0^{-4} - 27,312T^2\omega_0^{-2} + 64T^4}{16\omega_0^{-4} + 20,904T\omega_0^{-3} + 13,656T^2\omega_0^{-2} + 5,226T^3\omega_0^{-1} + T^4};$$

$$b_3 = - \frac{64\omega_0^{-4} - 41,808T\omega_0^{-3} + 10,542T^3\omega_0^{-1} - 4T^4}{16\omega_0^{-4} + 20,904T\omega_0^{-3} + 13,656T^2\omega_0^{-2} + 5,226T^3\omega_0^{-1} + T^4};$$

$$b_4 = \frac{16\omega_0^{-4} - 20,904T\omega_0^{-3} + 13,656T^2\omega_0^{-2} - 5,226T^3\omega_0^{-1} + T^4}{16\omega_0^{-4} + 20,904T\omega_0^{-3} + 13,656T^2\omega_0^{-2} + 5,226T^3\omega_0^{-1} + T^4}.$$

**Подавление гармонической помехи.** Соотношение (2) позволяет записать АЧХ дискретных фильтров Баттерворта в виде

$$W_s(\omega) = a_1 2^s \cos^s(\omega T / 2) / \sqrt{\left( 1 + \sum_{i=1}^s b_i \cos i\omega T \right)^2 + \left( \sum_{i=1}^s b_i \sin i\omega T \right)^2}. \quad (3)$$

Из данной формулы видно, что для частоты  $\omega$ , равной половине частоты дискретизации  $\omega_d = 2\pi/T$ , коэффициент передачи фильтра равен нулю. Следовательно, с учетом периодичности функции  $\cos x$  при частоте помехи  $\omega_{\text{п}} = \pi(1+2k)/T$  для  $k=0,1,2,\dots$  имеет место полное подавление сигнала помехи. На практике обеспечить данное соотношение не всегда удается. В табл. 1 приведены результаты расчетов АЧХ дискретных фильтров Баттерворта вблизи частоты  $f = 1/2T$  при  $T=0,01$  с и  $\omega_0 = 25 \text{ с}^{-1}$ .

Таблица 1

$f, \text{Гц}$	15	20	25	30	35	40	45	50	
$W_s(f)$	$s=1$	0,238	0,170	0,124	0,090	0,064	0,041	0,020	0
	$s=2$	0,060	0,030	0,016	0,008	0,004	$1,6 \cdot 10^{-3}$	$3,9 \cdot 10^{-4}$	0
	$s=3$	$1,48 \cdot 10^{-2}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$7,49 \cdot 10^{-4}$	$2,58 \cdot 10^{-4}$	$6,7 \cdot 10^{-5}$	$7,76 \cdot 10^{-5}$	0
	$s=4$	$3,6 \cdot 10^{-3}$	$8,76 \cdot 10^{-4}$	$2,44 \cdot 10^{-4}$	$6,80 \cdot 10^{-5}$	$1,64 \cdot 10^{-5}$	$2,72 \cdot 10^{-6}$	$1,53 \cdot 10^{-7}$	0

Из представленных данных следует, что подавление помехи на уровне 40 дБ достигается для фильтра первого порядка при  $f_{\text{п}} > 45$  Гц; второго — при  $f_{\text{п}} > 30$  Гц; третьего — при  $f_{\text{п}} > 15$  Гц, четвертого — при  $f_{\text{п}} > 10$  Гц.

Время задержки  $\tau$  сигнала фильтром равно  $\tau_1 = 1/\omega_0$  для  $s=1$ ;  $\tau_2 = \sqrt{2}/\omega_0$  — для  $s=2$ ;  $\tau_3 = 2/\omega_0$  — для  $s=3$  и  $\tau_4 = 2,613/\omega_0$  — для  $s=4$ . При  $\omega_0 = 25 \text{ с}^{-1}$  задержка сигнала фильтрами составит 40; 56,6; 80 и 104,5 мс соответственно.

Определим значение ошибки, вносимой сглаживающим фильтром при передаче гармонического сигнала  $\alpha(t) = A \sin(\beta t + \psi)$ , где  $A$  — амплитуда,  $\beta$  — круговая частота и  $\psi$  — случайная начальная фаза, равномерно распределенная на интервале  $-\pi$ — $\pi$ .

Выходной сигнал фильтра можно записать как  $\alpha_{\text{ф}}(t) = A_{\text{ф}} \sin[\beta(t - \tau) + \psi]$ , где  $A_{\text{ф}}$ ,  $\tau$  — амплитуда и время задержки сигнала.

При этом дисперсия ошибки составит

$$D = \overline{[\alpha(t) - \alpha_{\text{ф}}(t)]^2} = 0,5A^2 \left( 1 + \frac{A_{\text{ф}}^2}{A^2} - 2 \frac{A_{\text{ф}}^2}{A^2} \cos \beta \tau \right). \quad (4)$$

Для примера положим  $\omega_0 = 25 \text{ с}^{-1}$ ,  $\beta = 1,884 \text{ с}^{-1}$ . Тогда отношение  $(A - A_{\text{ф}})/A < 0,2\%$  для всех порядков фильтров. При этом в выражении (4) без заметной погрешности можно положить  $A_{\text{ф}} = A$ .

В результате получим  $D = 2A^2 \sin^2(\beta\tau/2)$ . Относительное среднеквадратическое отклонение составит  $\Delta = 2 \sin(\beta\tau/2)$ .

Результаты расчетов  $\Delta$  при  $\omega_0 = 25 \text{ с}^{-1}$ ,  $\beta = 1,884 \text{ с}^{-1}$  для фильтров различных порядков приведены в табл. 2.

Таблица 2

$s$	1	2	3	4
$\tau, \text{мс}$	40	56,6	80	104,5
$\Delta, \%$	7,5	10,7	15,1	19,7

Рассмотрим возможность применения экстраполятора для снижения ошибок, связанных с задержкой сигнала сглаживающими фильтрами. В дискретном виде передаточная функция экстраполятора может быть представлена следующим образом:

$$W_3(j\omega) = \sum_{i=0}^m b_{3i} e^{-i(j\omega T)},$$

где  $b_{3i}$  — коэффициенты экстраполирования;  $m$  — степень экстраполирования;  $T$  — период следования отсчетов входного сигнала экстраполятора.

В случае линейной экстраполяции алгоритм работы экстраполятора имеет вид

$$\alpha_3(t) = \alpha_{\text{ф}}(t) + \dot{\alpha}_{\text{ф}}(t)T_3, \quad (5)$$

где  $\dot{\alpha}_{\text{ф}}$  — производная сигнала на выходе фильтра Баттерворта;  $T_3$  — интервал экстраполирования.

С учетом затухания сигнала в фильтре

$$\alpha_{\phi}(t) = W_s(\omega)\alpha(t - \tau),$$

где  $W_s(\omega)$  — коэффициент передачи фильтра;  $\tau$  — время задержки сигнала в фильтре.

Согласно [1]

$$W_s^2(\omega) = 1 / \left[ 1 + \left( \frac{\omega}{\omega_0} \right)^{2s} \right].$$

При использовании для вычисления производной  $\dot{\alpha}_{\phi}(t)$  первой обратной разности выражение (5) в дискретной форме принимает вид

$$\alpha_{\phi}[k] = W_s(\omega) \left\{ \alpha[k - T_3 / T] + \frac{T}{T_3} \{ \alpha[k - T_3 / T] - \alpha[k - 1 - T_3 / T] \} \right\},$$

где  $k$  — дискретное время.

Тогда дисперсия ошибки, вносимой задержкой сигнала фильтром, запишется в виде

$$D = \{ \alpha[k] - \alpha_{\phi}[k] \}^2 = \sigma_{\alpha}^2 [1 + 2W_s^2(\omega)T_3T^{-1} + 2W_s^2(\omega)T_3^2T^{-2} - 2W_s(\omega)(1 + T_3T^{-1})\rho(T_3) + 2W_s(\omega)T_3T^{-1}\rho(T_3 + T) - 2W_s^2(\omega)T_3T^{-1}(1 + T_3T^{-1})\rho(T)],$$

где  $\sigma_{\alpha}$ ,  $\rho(\tau)$  — среднеквадратичное отклонение (СКО) и коэффициент корреляции сигнала на входе фильтра.

Для ранее принятой гармонической модели входного сигнала  $\alpha(t) = A \sin(\beta t + \psi)$   $\rho(\tau) = \cos \beta \tau$ .

Результаты расчетов  $\Delta = \sqrt{D / \sigma_{\alpha}^2}$  при  $\omega_0 = 25 \text{ с}^{-1}$ ,  $\beta = 1,884 \text{ с}^{-1}$ ,  $T = 0,01 \text{ с}$  для фильтров различных порядков приведены в табл. 3.

Таблица 3

$s$	1	2	3	4
$\tau$ , мс	40	56,6	80	104,5
$\Delta$ , %	0,07	0,7	1,3	2,1

Полученные данные показывают, что применение экстраполятора позволяет резко снизить влияние задержки сигнала в сглаживающем фильтре.

**Влияние шумов квантования.** Квантование по уровню входного сигнала приводит к появлению дополнительных шумов на входе фильтра. Шумы квантования принято считать белым дискретным шумом с дисперсией  $D_{\kappa} = \delta^2 / 12$  и спектральной плотностью  $N_{\kappa} = T\delta^2 / 12$ , где  $\delta$  — цена младшего разряда аналого-цифрового преобразователя;  $T$  — период дискретизации.

Тогда дисперсия шумов квантования на выходе фильтра может быть найдена из соотношения

$$D_{\phi} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_s^2(\omega) N_{\kappa} d\omega = N_{\kappa} \Delta W_s,$$

где  $\Delta W_s = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_s^2(\omega) d\omega$  — эквивалентная полоса пропускания фильтра.



Результаты расчетов  $\Delta W_s$  и отношения среднеквадратических значений шумов квантования на входе и выходе фильтра при  $\omega_0 = 25 \text{ с}^{-1}$ ,  $T=0,01 \text{ с}$  приведены в табл. 4.

Таблица 4

$s$	1	2	3	4
$\Delta W_s, \text{ Гц}$	11,87	8,84	8,34	8,17
$\sigma_\phi / \sigma_\kappa$	0,345	0,297	0,289	0,286

Дисперсия шумов квантования на выходе экстраполятора находится по формуле

$$D_3 = \overline{\alpha_3^2(t)} = \overline{\alpha_\phi(t) + (T_3 / T)[\alpha_\phi(t) - \alpha_\phi(t - T)]^2},$$

где  $\alpha_\phi(t)$  — выходной сигнал сглаживающего фильтра.

Нетрудно показать, что

$$D_3 = \sigma_\phi^2 \left[ 1 + 2(T_3 / T) + 2(T_3 / T)^2 - 2(T_3 / T)(1 + (T_3 / T))\rho_\phi(T) \right],$$

где  $\sigma_\phi$ ,  $\rho_\phi(\tau)$  — СКО и коэффициент корреляции выходного сигнала сглаживающего фильтра:

$$\rho_\phi(\tau) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} W_s^2(\omega) N_\kappa \cos(\omega\tau) d\omega / \sigma_\phi^2.$$

Результаты расчетов интервала корреляции  $\rho_\phi(T)$  и отношения среднеквадратических значений шумов квантования на выходе и входе экстраполятора при  $\omega_0 = 25 \text{ с}^{-1}$ ,  $T=0,01 \text{ с}$  приведены в табл. 5.

Таблица 5

$s$	1	2	3	4
$\Delta W_s, \text{ Гц}$	11,87	8,84	8,34	8,17
$\rho_\phi(T)$	0,826	0,973	0,985	0,987
$\sigma_\phi / \sigma_\kappa$	2,82	1,75	1,79	2,02

Из приведенных данных видно, что экстраполятор увеличивает уровень шумов квантования практически в два раза.

Таким образом, по результатам работы можно сделать следующие выводы:

- 1) применение цифровых сглаживающих фильтров позволяет эффективно подавлять узкополосные помехи;
- 2) для устранения задержки сигнала в сглаживающем фильтре необходимо использовать экстраполяторы;
- 3) экстраполяторы увеличивают уровень шумов квантования.

#### ЛИТЕРАТУРА

Бесекерский В. А., Зиатдинов С. И. Цифровое дифференцирование сигналов пространственного положения управляемого объекта // Гирокоспия и навигация. 1999. № 1(24). С. 66—77.

#### Сведения об авторе

**Сергей Ильич Зиатдинов**

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

Рекомендована кафедрой  
информационно-сетевых технологий

Поступила в редакцию  
29.09.10 г.

И. А. Конников

**РАСЧЕТ ПЕРЕКРЕСТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЯХ**

Представлен подход к использованию классических методов радиотехники для моделирования электромагнитного поля в электронных устройствах. Предлагаемый подход может быть использован в САПР при решении проблемы внутренней электромагнитной совместимости электронных модулей, он позволяет снизить объем вычислений по сравнению с методами, основанными на строгом расчете электромагнитного поля.

*Ключевые слова:* наводки, электромагнитная связь, эквивалентная постоянная распространения.

**Введение.** Трудоемкость оценки влияния паразитных электромагнитных эффектов (ПЭМЭ) на характеристики современных радиоэлектронных модулей на ранней стадии их проектирования ограничивает размерность задач, решаемых в САПР. Тенденции развития радиоэлектроники обуславливают постоянно возрастающую актуальность разработки и внедрения все более эффективных методов решения этой проблемы.

Помимо использования существующих топологических ограничений и норм проектирования возможны два основных подхода к решению проблемы. Первый, предложенный в статье [1], предполагает экстракцию эквивалентной электрической схемы проектируемого модуля, включающей помимо элементов принципиальной схемы элементы, моделирующие ПЭМЭ. Экстракция проводится в автоматическом режиме. Для оценки влияния ПЭМЭ рассчитываются выходные электрические характеристики. Недостаток такого подхода — высокая размерность решаемой задачи, не соответствующая возможностям современных вычислительных средств.

Второй подход предполагает непосредственный расчет количественных характеристик ПЭМЭ (главным образом — амплитуды наведенной помехи). С целью снижения размерности задачи эквивалентная схема, по которой оцениваются ПЭМЭ, экстрагируется только для коммутационных проводников конструкции устройства. Активные элементы моделируются своими эквивалентными входными и/или выходными сопротивлениями и генераторами сигнала.

В обоих случаях паразитные наводки и задержки традиционно моделируются с помощью схем замещения, включающих частотонезависимые емкости и индуктивности. Однако в этом случае погрешность моделирования ПЭМЭ имеет две составляющие. Во-первых, погрешность, обусловленная использованием при моделировании поля реактивностей, которые рассчитываются через его статическую составляющую, превалирующую в ближней зоне, но быстро убывающую с увеличением расстояния. При моделировании наводок через взаимные емкости и индуктивности (в классической трактовке этих понятий) не учитываются поля излучения и переходной зоны. Это может привести к недопустимо высокой погрешности при проектировании устройств субнаносекундного диапазона, поэтому паразитные емкости и индуктивности целесообразно использовать только для моделирования распространения поля вдоль коммутационных проводников (для расчета времени задержки, волнового сопротивления и т.п.). Для моделирования взаимного влияния проводников следует использовать математические модели, которые учитывают все составляющие поля, в том числе поле излучения. Во-вторых, погрешность, обусловленная пространственной дискретизацией системы с распределенными параметрами, состоящей из объекта-источника и объекта-приемника помехи, а также канала распространения электромагнитной энергии.

В настоящей работе предлагаются математические методы и модели, основанные на прямом использовании методов теории электромагнитного поля, органично учитывающих распре-

деленный характер конструктива. Область корректного использования таких моделей не ограничена ближней зоной и может распространяться на решение проектных задач большой размерности, поскольку предлагаемый подход позволяет максимальным образом использовать аналитические методы, реализуемые заранее при разработке математического обеспечения САПР, в отличие от традиционных методов, основанных на пространственной дискретизации и предполагающих проведение основного, причем гораздо большего, объема вычислений в процессе моделирования.

**Основная идея предлагаемого подхода.** Для количественной оценки перекрестных помех предлагается использовать электродинамический подход на основе метода эквивалентной постоянной распространения (ЭПР) [2]. При таком подходе значение наводимой ЭДС помехи может быть рассчитано с учетом всех составляющих (а не только статической) электромагнитного поля источника помехи; наводимая ЭДС является интегральной характеристикой системы, состоящей из источника, рецептора помехи и канала паразитной связи. Для количественной оценки помехи пространственная дискретизация такой системы не нужна.

При расчете поля источника помех в качестве физической модели исследуемого устройства принимается слоистая диэлектрическая среда (непроводящая, изотропная и гомогенная)\* с плоскопараллельными границами раздела слоев, неограниченная в азимутальном направлении, в которой расположены проводники; объемы проводников аппроксимируются параллелепипедами.

Учитывая прикладной и конкретный характер указанной задачи, описанной в работе [2], подход к реализации метода ЭПР целесообразно модифицировать. Для слоистой среды функция Грина  $G_B$ , которая является решением волнового уравнения, описывается выражением того же вида, что и для однородной:

$$G_B = M \exp(-ik_{\text{эпр}}R)/R,$$

где  $M$  — коэффициент;  $k_{\text{эпр}} = \omega \sqrt{\varepsilon_0 \varepsilon_3 \mu_0 \mu_3}$  — ЭПР;  $R$  — расстояние между элементарным источником поля и точкой наблюдения;  $\varepsilon_0 = 10^{-9}/(36\pi)$  и  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  — абсолютные диэлектрическая и магнитная проницаемости свободного пространства;  $\varepsilon_3$  и  $\mu_3$  — эквивалентные относительные диэлектрическая и магнитная проницаемости слоистой среды соответственно;  $\pi = 3,14159\dots$ ;  $\omega$  — угловая частота.

Однако в настоящей работе значения  $\varepsilon_3$  и  $\mu_3$  предлагается рассчитывать иначе, по единым для каждого слоя среды более простым формулам, отличным от предлагаемых в [2]:

$$\varepsilon_3 = \frac{1}{R} \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) q_\varepsilon(\lambda) d\lambda; \quad \mu_3 = R \int_0^{\infty} J_0(\lambda r) q_\mu(\lambda) d\lambda,$$

где  $q_\varepsilon(\lambda)$  — полученная при решении электростатической задачи математическая модель слоистой среды, соответствующей конструкции электронного модуля [3];  $q_\mu(\lambda)$  — то же для магнитостатической задачи;  $J_0$  — функция Бесселя первого рода нулевого порядка;  $r$  — длина парциального канала связи (расстояние в азимутальной плоскости между элементарным источником поля и точкой, в которой поле вычисляется); несобственные интегралы вычисляются по методике [4].

Таким образом определенные величины  $\varepsilon_3$ ,  $\mu_3$  и  $k_{\text{эпр}}$  не зависят от размеров проводника, что существенно снижает объем необходимых вычислений. Тем не менее значения  $\varepsilon_3$ ,  $\mu_3$  и

\* Влияние препрега, который обеспечивает адгезию металлического проводника к диэлектрику платы, может являться предметом отдельного исследования.

$k_{\text{эпр}}$  зависят от величины  $r$  и параметров конструкции. Характер этих зависимостей должен учитываться при разработке технологии вычисления перекрестной помехи.

Идея описания электромагнитного процесса динамической математической моделью, один из параметров которой рассчитывается в квазистационарном приближении, не нова. Этот прием был использован, например, для описания электромагнитных процессов в линиях с распределенными параметрами при помощи дифференциального уравнения второго порядка (уравнения Гельмгольца [5]), описывающего распространение монохроматической волны вдоль проводника, т.е. распространение волны в канале связи, включающем проводник. Решение этого уравнения, как известно [5], представляет собой сумму двух слагаемых с экспоненциальной зависимостью от расстояния. Показатели экспонент отличаются знаком и рассчитываются через распределенные индуктивность и емкость линии, определяемые на основе решения уравнений Лапласа для потенциалов магнитного и электрического полей, т.е. строго говоря, на постоянном токе. Тем не менее полученная математическая модель эффективно используется в очень широком диапазоне частот. На основе этой модели была построена теория линий с распределенными параметрами, область корректного использования которой весьма обширна. Корректность применения такого приема для описания сходных электромагнитных процессов в канале связи, проводник не включающем, была исследована и обсуждалась в работах [6, 7].

Напряжение помехи, наводимое в проводнике-рецепторе, рассчитывается как интеграл от напряженности помехонесущего электрического поля по длине рецептора. Если проводники параллельны оси абсцисс (абсциссами начала и конца проводника — источника поля помехи длиной  $l$  — являются  $x_{\text{н}}$  и  $x_{\text{н}} + l$ ;  $x_{\text{п}}$  и  $x_{\text{п}} + l_{\text{п}}$  — то же для рецептора помехи длиной  $l_{\text{п}}$ ), то напряжение помехи

$$e_{\text{п}} = \int_{x_{\text{п}}}^{x_{\text{п}}+l_{\text{п}}} E(x, y, z) dl = \varphi(x_{\text{п}}, y) - \varphi(x_{\text{п}} + l_{\text{п}}, y) - i\omega \int_{x_{\text{п}}}^{x_{\text{п}}+l_{\text{п}}} A(x, y) dx.$$

В этой формуле напряженность электрического поля

$$E(x, y, z) = -\frac{\partial A}{\partial t} - \text{grad } \varphi = i\omega A - \text{grad } \varphi,$$

где усредненный по толщине проводника векторный потенциал магнитного поля, создаваемого током плотностью  $j$  в проводнике-источнике шириной  $b$ ,

$$A(x, y) = \frac{\mu_0 I_1}{4\pi} \int_{x_{\text{н}}}^{x_{\text{н}}+l} \frac{\mu_3(r) \exp[-ik_3(r)R - \gamma|x_0 - x_{\text{н}}|]}{R} dx_0;$$

усредненный по толщине проводника потенциал электрического поля, создаваемого зарядом плотностью  $\eta$ ,

$$\varphi(x, y) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0 t} \int_0^t dz \int_0^t dz_0 \int_0^b dy_0 \int_{x_{\text{н}}}^{x_{\text{н}}+l} \eta(x, x_0, y_0, z_0) \frac{\exp(-ik_{\text{эпр}} r)}{\epsilon_3 R} dx_0.$$

Характер распределения тока и заряда в линии (проводнике-источнике) подробно рассмотрен в работе [8]. Интегрирование проводится численно, по известным квадратурным формулам Гаусса или Лобатто [9].

**Заключение.** Получаемые с помощью предлагаемого варианта метода ЭПР математические модели уступают моделям, основанным на строгом динамическом подходе и пространственной дискретизации, по широкополосности, значительно превосходя их по экономичности (расходу машинного времени и емкости оперативной памяти). С другой стороны, они значительно превосходят модели, использующие взаимные емкости и индуктивности, как по экономичности, так и по широкополосности, позволяя учесть все составляющие поля, а не только

статическую, и таким образом более адекватно описывают физические процессы в реальном электронном модуле.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Конников И. А.* Принципы организации подсистемы учета конструктивно-технологических факторов при автоматизированном проектировании микросборок // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТПО. 1982. Вып. 3. С. 8—12.
2. *Конников И. А.* Вычисление параметров переходного процесса в канале электромагнитной связи // Электромагнитные волны и электронные системы. 2007. № 11. С. 52—60.
3. *Конников И. А.* Математическая модель конструкции микросхемы // Математическое моделирование. 2007. № 4. С. 37—44.
4. *Конников И. А.* Оценка точности вычисления функции Грина в слоистой среде // Вычислительные технологии. 2006. № 5. С. 55—62.
5. *Баскаков С. И.* Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. М.: Высш. школа, 1980. 152 с.
6. *Конников И. А.* Область корректного применения метода эквивалентной постоянной распространения // 63-я науч.-техн. конф., посвященная Дню радио. СПб: СПб ГТУ „ЛЭТИ“, 2008. С. 28—30.
7. *Конников И. А.* Область корректного использования метода эквивалентной постоянной распространения // Научная сессия ГУАП. Сб. докл. Ч. II. Технические науки. СПб: ГУАП, 2008. С. 111—115.
8. *Конников И. А.* Влияние плотности распределения заряда на емкость прямоугольной пленки в слоистой среде // Электричество. 2007. № 3. С. 37—41.
9. *Крылов В. И., Шульгина Л. Т.* Справочная книга по численному интегрированию. М.: Наука, 1966. 372 с.

*Сведения об авторе***Игорь Аркадьевич Конников**

— д-р техн. наук; Санкт-Петербург; E-mail: konnikov\_i@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
проектирования и безопасности  
компьютерных систем НИУ ИТМО

Поступила в редакцию  
15.05.12 г.

А. В. ЧЖАН, Г. С. ПАТРИН, А. Г. ЗАДВОРНЫЙ, В. А. СЕРЕДКИН

## ПРИМЕНЕНИЕ ОПТОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ НАБЛЮДЕНИЯ ДОМЕННЫХ СТРУКТУР В ФЕРРОМАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛАХ

Показана возможность использования устройств, снабженных приборами с зарядовой связью, для определения магнитных характеристик ферромагнитных материалов.

**Ключевые слова:** спектральная характеристика, инфракрасное излучение, светодиод, доменная структура, матрица, поляризатор.

Всестороннее изучение доменных структур (ДС) в ферромагнетиках как в статическом, так и в динамическом режиме является одним из важных направлений исследования магнитных материалов. Характеристики ДС зависят от геометрических размеров, формы и материала образцов, а также намагниченности, анизотропии и обменной энергии. Поэтому исследуя ДС, можно получить дополнительную информацию о магнитных свойствах материала, которая позволит прогнозировать эффективность магнитных преобразователей, так как размеры доменов и их конфигурация во многом определяют величину магнитной проницаемости. Экспериментальное наблюдение ДС обычно проводится в видимом диапазоне светового излучения. Но это не всегда возможно в силу спектральных характеристик исследуемых веществ.

В настоящей работе приведены результаты изучения ДС с помощью web-камеры, светодиодов и широкополосных поляризаторов как в видимой, так и в невидимой части спектра, показана возможность определения магнитных параметров локальных участков образца.

В последнее время активно изучаются возможности существенного повышения пропускной способности информационных систем с помощью оптических методов обработки информации. Однако использование оптоэлектронных систем во многих случаях сдерживается отсутствием эффективных средств записи оптической информации, а также быстродействующих широкополосных фотоприемников. Фотоэмульсионные среды не допускают многократной перезаписи, электронно-оптические преобразователи (ЭОП) сложны и не обеспечивают высокой плотности записи. Кроме того, они чувствительны лишь в ближнем ИК-диапазоне ( $\lambda = 800$  нм) [1].

Представляется перспективным применение устройств, которые позволяют исследовать особенности формирования ДС в динамическом режиме в широкой спектральной области. Для подобных исследований наиболее подходят приборы, способные работать в режиме реального времени и визуализировать излучение ближнего инфракрасного диапазона. Этим условиям удовлетворяют устройства, снабженные приборами с зарядовой связью (ПЗС). Их фоточувствительный элемент — кремниевая матрица — определяет спектральную характеристику прибора в целом. Спектральная чувствительность ПЗС-матрицы лежит в диапазоне от 0,1 (рентгеновское и гамма-излучение) до 1100 нм. В реальных приборах диапазон снижается вследствие ограниченного спектрального оптического тракта. В настоящее время выпускаются web-камеры, способные работать в диапазоне длин волн до 1700 нм [2].

В естественном свете визуализация ДС невозможна, требуется наличие поляризатора в оптическом тракте. Наиболее распространенные оптические поляризаторы (герпатитовые, призмы Николя) обладают поляризационной способностью только в ближнем участке инфракрасного спектра, при их использовании необходимо учитывать следующие моменты. Если

источником света служит лампа накаливания, то часть отраженного от образца излучения в ИК-области остается неполяризованной. Так как web-камера чувствительна в широкой области, то ИК неполяризованная часть излучения будет засвечивать матрицу, при этом изображение ДС получить невозможно. Поэтому для подсветки ДС необходимы некогерентные (для исключения интерференционных полос) источники света, обладающие высокой яркостью, с узким спектральным диапазоном.

Наиболее удобно применять светодиоды. В отличие от лазерного излучения свет от светодиодов некогерентный. В то же время излучение светодиодов имеет достаточно узкую спектральную линию ( $\Delta\lambda \approx 15\text{—}30$  нм) в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне спектра, что позволяет выбрать необходимую для исследования длину волны.

Исследования проводились на установке, структурная схема которой приведена на рис. 1 (1 — источник линейно-поляризованного света, 2 — оптический фильтр, 3 — образец, 4 — кольца Гельмгольца, 5 — анализатор, 6 — оптический микроскоп, 7 — ПЗУ-матрица web-камеры, 8 — компьютер, 9 — монитор, 10 — источник переменного тока). В качестве регистрирующего устройства использовалась web-камера типа Vimicro USB PC Camera (ZC0301PLH). Источником света служил светодиод мощностью 5 Вт с длиной волны излучения 600 нм.

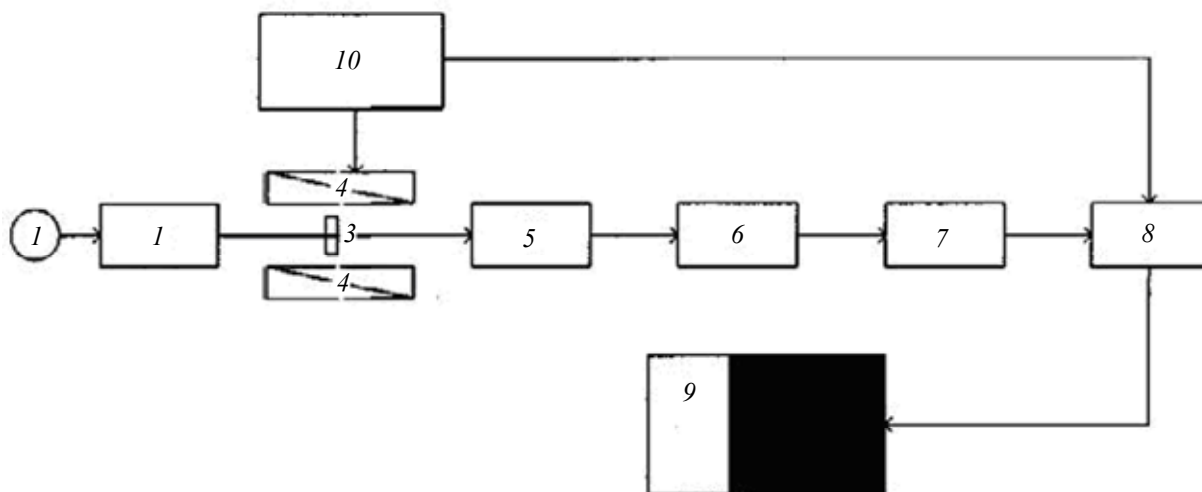


Рис. 1

На рис. 2, а приведено изображение доменной структуры, полученное с применением меридионального эффекта Керра с поверхности тонкой магнитной пленки Co—P.

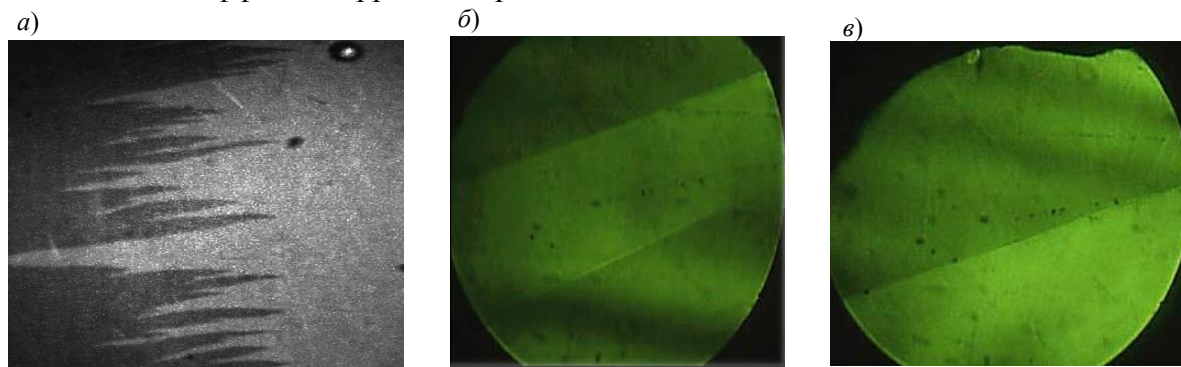


Рис. 2

Визуальное наблюдение ДС с использованием эффекта Фарадея возможно лишь в том случае, если материал прозрачен в видимой области. На рис. 2, б, в приведены изображения ДС гематита, полученные с помощью эффекта Фарадея и зарегистрированные web-камерой в невидимой части спектра. В видимой части спектра гематит непрозрачен (край оптического

поглощения этого соединения находится в области 900 нм). На рис. 2, в видно, что на ДС гематита, которая впервые исследовалась в работе [4], проявляются дополнительные магнитные неоднородности в виде темных и светлых полос, направленных перпендикулярно магнитному полю. Физическая природа возникновения таких полос не совсем ясна. Ранее такие структуры наблюдались в борате железа [5], прозрачном в видимом диапазоне излучения и, так же как гематит, являющемся слабым ферромагнетиком с ромбоэдрической элементарной ячейкой.

Web-камеры можно применять для определения таких характеристик, как магнитная проницаемость, прямоугольность петли гистерезиса, коэрцитивная сила локальных участков образца. Для этого достаточно записать в реальном времени цикл перемагничивания с большой площади образца. Затем при воспроизведении этого видеофайла на экране монитора можно выделить локальные участки и воспроизвести кривые перемагничивания искомых участков.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ №11–0200695-А.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Середкин В. А., Столяр С. В., Фролов Г. И., Яковчук В. Ю. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30, вып. 19. С. 46—52.
2. Неизвестный С. И., Никулин О. Ю. // Специальная техника. 1999. № 5. С. 17—29.
3. Формозов Б. Н. Аэрокосмические фотоприемные устройства видимого и инфракрасного диапазонов. СПб: БГТУ „Военмех“, 2004. 127 с.
4. Eaton J. A. and Morrish A. H. // J. Appl. Phys. 1969. Vol. 40, N 8. P. 3180—3185.
5. Haisma J. H., Stasy W. T. // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44, N 7. P. 3367—3369.

#### Сведения об авторах

- Анатолий Владимирович Чжан** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Институт физики им. Л. В. Киренского РАН, Красноярск; E-mail: avchz@mail.ru
- Геннадий Семенович Патрин** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Сибирский федеральный университет, кафедра общей физики, Красноярск; заведующий кафедрой; E-mail: patrin@iph.krasn.ru
- Александр Григорьевич Задворный** — канд. техн. наук, доцент; Сибирский федеральный университет, Сибирский государственный аэрокосмический университет, кафедра технической физики, Красноярск; E-mail: angara@inbox.ru
- Виталий Александрович Середкин** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Институт физики им. Л. В. Киренского РАН, Красноярск; E-mail: sva@iph.krasn.ru

Рекомендована кафедрой  
общей физики

Поступила в редакцию  
11.06.11 г.



---

---

# ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

---

---

УДК 621.391

И. А. Ключиков

## ИЗМЕРЕНИЕ СРЕДНЕЙ ЧАСТОТЫ СИГНАЛОВ В АКУСТООПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОАНАЛИЗАТОРАХ С ПРОСТРАНСТВЕННО-НЕИНВАРИАНТНОЙ АППАРАТНОЙ ФУНКЦИЕЙ

Рассмотрен способ повышения точности измерения средней частоты спектра сигналов в акустооптических спектроанализаторах с пространственно-неинвариантной аппаратной функцией, основанный на калибровке его АЧХ и частотной шкалы. Достигнуто уменьшение инструментальной ошибки измерения средней частоты спектра энергетической аппаратной функции с 4,5 до 0,1 МГц.

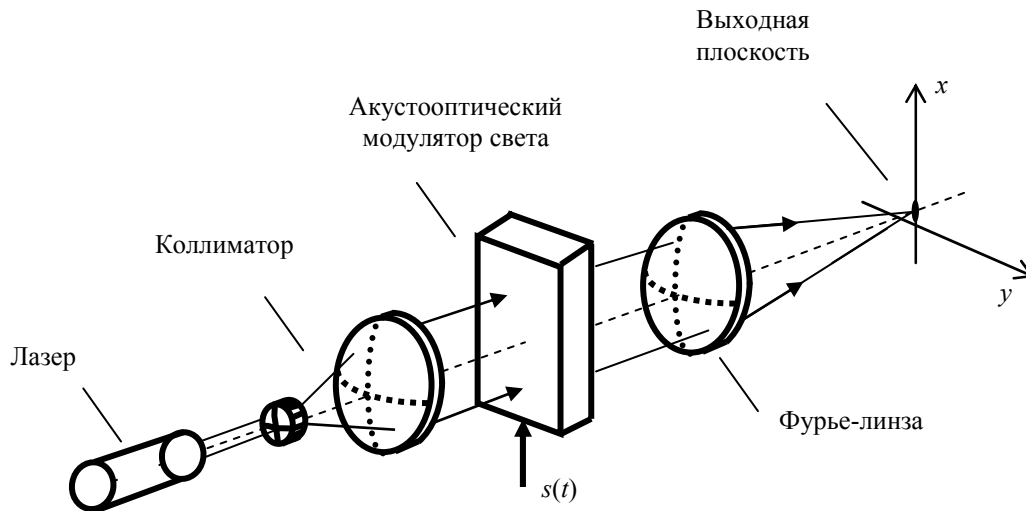
*Ключевые слова:* акустооптический спектроанализатор, измерение частоты, радиомониторинг.

Акустооптические спектроанализаторы (АОС) используются в системах радиоэлектронного мониторинга и радиоконтроля в качестве устройств, позволяющих производить параллельную спектральную обработку сигналов в СВЧ-диапазоне [1—4]. При моноимпульсном измерении средней частоты спектра радиотехнических излучений точность АОС СВЧ-диапазона составляет от 1 до 5 МГц, что на один-два порядка ниже точности цифровых анализаторов. В значительной степени это определяется наличием в АОС систематических ошибок измерения, вызванных влиянием частотно-зависимых факторов различной физической природы — особенностей дифракции света на акустических волнах (поглощение акустических волн, угловая расходимость акустического пучка, конечные углы дифракции, брэгговские переходные процессы), аббераций оптической системы, выполняющей пространственное фурье-преобразование дифрагировавшего светового поля, неточности юстировки оптической системы АОС, пространственной неоднородности параметров линейки фотодетекторов. Систематические ошибки, вызванные влиянием частотно-зависимых факторов, можно рассматривать как ошибки, обусловленные пространственной неинвариантностью аппаратной функции АОС. Такой обобщенный подход позволяет предложить способы учета и коррекции ошибок без анализа конкретных механизмов их возникновения, основанные на последетекторной обработке оптических изображений — аналогов спектров сигналов, формируемых оптической системой АОС.

Распределение комплексной амплитуды дифрагировавшего света в выходной плоскости АОС (см. рисунок) с учетом зависимости от второй пространственной координаты может быть записано в следующем виде [1, 2]:

$$E(x, y, t) = \int_{-\infty}^{+\infty} dx' G(x, x', y) \exp\left(j \frac{2\pi V}{\lambda F} x't\right) S\left(\frac{2\pi V}{\lambda F} x'\right), \quad (1)$$

где  $\lambda$  — длина волны света;  $V$  — скорость распространения акустических волн в звукопроводе акустооптического модулятора;  $F$  — фокусное расстояние фурье-линзы;  $x' = \frac{\lambda F}{2\pi V} \omega'$  — переменная интегрирования, по физическому смыслу являющаяся частотой спектральной составляющей анализируемого сигнала  $\omega'$ , приведенной к размерности пространственной координаты в выходной плоскости АОС;  $G(x, x', y)$  — распределение комплексной амплитуды света в выходной плоскости АОС при гармоническом входном сигнале частотой  $\omega'$ ;  $S(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt$  — спектр анализируемого сигнала.



Если время интегрирования линейки фотодетекторов больше длительности анализируемого сигнала, а размер фотоприемной ячейки по оси  $y$  больше ширины распределения  $E(x, y, t)$ , то выходной сигнал АОС имеет вид

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} dt dy |E(x, y, t)|^2. \quad (2)$$

Подставив (1) в (2) и изменив порядок интегрирования, после преобразований получим

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} dx' |G(x, x')|^2 \left| S\left(\frac{2\pi V}{\lambda F} x'\right) \right|^2,$$

где энергетическая аппаратная функция АОС имеет вид

$$G_E(x, x') = |G(x, x')|^2 = \int_{-\infty}^{+\infty} |G(x, x', y)|^2 dy.$$

Таким образом, пространственно-временное распределение интенсивности дифрагировавшего света в выходной плоскости АОС, определяемое спектром анализируемого сигнала, может быть записано как

$$I(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} dx' G_E(x, x') S_E\left(\frac{2\pi V}{\lambda F} x'\right). \quad (3)$$

Здесь опущены несущественная в данном случае зависимость от второй пространственной

координаты и  $S_E(\omega) = \left| \int_{-\infty}^{+\infty} s(t) \exp(-j\omega t) dt \right|^2$  — энергетический спектр сигнала.

Исходя из аналогии с радиотехническими устройствами выражение (3) удобно записать в виде

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} d\omega' S_E(\omega') G_E(\omega, \omega'),$$

пространственные координаты приведены к размерности частоты в соответствии с соотношением  $\omega = \frac{2\pi V}{\lambda F} x$ .

Средняя частота спектра входного сигнала определяется выражением

$$\omega_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \omega' S_E(\omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' S_E(\omega')}. \quad (4)$$

Из-за погрешностей формирования спектра в АОС его выходной сигнал  $I(\omega)$  отличается от сигнала  $S_E(\omega)$ , это обуславливает появление систематических ошибок измерения частоты. В соответствии с интегралом суперпозиции (3) погрешности формирования спектра определяются сглаживающим действием энергетической аппаратной функции (ЭАФ). Если ЭАФ известна, то принципиально возможно по наблюдаемому выходному сигналу АОС, решив уравнение (3), восстановить спектр сигнала и получить значение средней частоты в соответствии с выражением (4). Подобные задачи восстановления относятся к некорректно поставленным, для их решения разработан и успешно используется ряд математических методов [5, 6]. Однако ширина ЭАФ акустооптического анализатора спектра СВЧ-диапазона, как правило, значительно больше или сравнима с шириной спектра анализируемых сигналов, что определяет высокую чувствительность качества восстановления спектров к погрешностям исходных данных.

Методы восстановления требуют большого объема вычислений, и их использование в реальном масштабе времени представляется затруднительным. В связи с этим далее рассматривается оценка средней частоты спектра непосредственно по выходному сигналу АОС с введением поправок, в общем случае зависящих от характеристик ЭАФ и спектра исходного сигнала. Если ЭАФ спектроанализатора пространственно-инвариантна  $G_E(\omega, \omega') = G_E(\omega - \omega')$ , то после подстановки в выражение (4) в качестве спектра  $S_E(\omega)$  выходного сигнала АОС  $I(\omega)$  можно получить, что частота  $\omega_I$ , соответствующая пространственному положению выходного распределения света, может быть представлена как

$$\omega_I = \omega_s + \Delta\omega_G, \quad (5)$$

где  $\Delta\omega_G = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \omega' G_E(\omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' G_E(\omega')}$  — постоянная величина, характеризующая смещение ЭАФ.

Как и следовало ожидать, в случае пространственно-инвариантной ЭАФ существует только постоянная ошибка измерения частоты, не зависящая от характеристик сигнала.

В случае пространственно-неинвариантной ЭАФ представим ее в виде

$$G_E(\omega, \omega') = A(\omega') g_E(\omega, \omega'), \quad (6)$$

где  $A(\omega') = \int_{-\infty}^{\infty} G_E(\omega, \omega') d\omega$  — АЧХ АОС;  $g_E(\omega, \omega') = \frac{G_E(\omega, \omega')}{A(\omega')}$  — нормированная ЭАФ АОС.

Введенная ЭАФ  $g_E(\omega, \omega')$  удовлетворяет условию нормировки

$$\int_{-\infty}^{\infty} g_E(\omega, \omega') d\omega = 1.$$

При использовании представления (6) выражение для частоты  $\omega_I$  записывается как

$$\omega_I = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \tilde{S}_E(\omega') \int_{-\infty}^{\infty} d\omega \omega g_E(\omega, \omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \tilde{S}_E(\omega')},$$

где  $\tilde{S}_E(\omega') = A(\omega') S_E(\omega')$ .

Если пространственно-инвариантной является только нормированная ЭАФ, т. е.

$$G_E(\omega, \omega') = A(\omega') g_E(\omega - \omega'),$$

то, как следует из аналогии с (5),

$$\omega_I = \tilde{\omega}_s + \Delta\omega_g, \quad (7)$$

где  $\Delta\omega_g = \int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \omega' g_E(\omega')$  — величина, характеризующая смещение нормированной ЭАФ;

$$\tilde{\omega}_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \omega' \tilde{S}_E(\omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' \tilde{S}_E(\omega')} \quad \text{— средняя частота взвешенного спектра } \tilde{S}_E(\omega').$$

Средняя частота  $\tilde{S}_E(\omega')$  характеризует ошибку измерения средней частоты спектра сигнала, обусловленную неравномерностью АЧХ АОС. Коррекция неравномерности акусто-оптического модулятора возможна путем использования радиочастотных фильтров на входе АОМ, оптических фильтров вблизи выходной плоскости АОС или при цифровой обработке после выхода с детектора.

В общем случае, используя два первых члена разложения АЧХ АОС  $A(\omega)$  в ряд Тейлора в окрестности средней частоты спектра сигнала  $\omega_s$

$$A(\omega) = a_0(\omega_s) + a_1(\omega_s)(\omega - \omega_s),$$

где  $a_0(\omega_s) = A(\omega_s)$ ,  $a_1(\omega_s) = \left. \frac{dA(\omega)}{d\omega} \right|_{\omega=\omega_s}$ , найдем  $\tilde{\omega}_s = \omega_s + \alpha_{10}(\omega_s) \Delta\omega_s^2$ ,

$$\Delta\omega_s = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' (\omega' - \omega_s)^2 S_E(\omega')}{\int_{-\infty}^{\infty} d\omega' S_E(\omega')} \quad \text{— ширина спектра сигнала; } \alpha_{10}(\omega_s) = \frac{a_1(\omega_s)}{a_0(\omega_s)}.$$

С учетом (7) получим окончательное выражение для частоты  $\omega_I$ , соответствующей пространственному положению выходного распределения света, в случае пространственно-инвариантной нормированной ЭАФ

$$\omega_I = \omega_s + \alpha_{10}(\omega_s)\Delta\omega_s^2 + \Delta\omega_g(\omega_s), \quad (8)$$

в котором учтена зависимость смещения ЭАФ от частоты.

В данном случае учет ошибки измерения частоты, представленной в виде второго и третьего членов выражения (8), может быть произведен итерационным способом с использованием в качестве начальных значений  $\omega_s$  и  $\Delta\omega_s$  оценок средней частоты и ширины спектра сигнала непосредственно по выходному распределению света (3). Требуемые значения параметров АОС, характеризующих форму АЧХ и смещение нормированной ЭАФ, могут быть определены при калибровке АЧХ и частотной шкалы анализатора.

Алгоритм измерения средней частоты спектра был экспериментально проверен на образце АОС гигагерцового диапазона частот. При ширине ЭАФ 4,5 МГц инструментальная ошибка измерения средней частоты спектра была снижена в 8—10 раз и составила менее 0,1 МГц.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кулаков С. В. Акустооптические устройства спектрального и корреляционного анализа сигналов. Л.: Наука, 1978. 144 с.
2. Егоров Ю. В., Наумов К. П., Ушаков В. Н. Акустооптические процессоры. М.: Радио и связь, 1991. 160 с.
3. Паркс Д. Акустооптический приемник-спектроанализатор дециметрового диапазона // Зарубежная радиоэлектроника. 1970. № 2. С. 21—32.
4. Белошицкий А. П., Комаров В. И., Крекотень Б. П., Сапожников Б. Т. Акустооптические анализаторы спектра радиосигналов // Зарубежная радиоэлектроника. 1971. № 3. С. 28—40.
5. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1986. 322 с.
6. Василенко Г. И. Теория восстановления сигналов: о редукации к идеальному прибору в физике и технике. М.: Сов. радио, 1979. 272 с.

#### *Сведения об авторе*

**Игорь Алексеевич Ключиков** — д-р техн. наук, профессор; Курский государственный технический университет, кафедра биомедицинской инженерии;  
E-mail: Igor\_Klyuchikov@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
биомедицинской инженерии

Поступила в редакцию  
14.04.10 г.

И. С. Доронин, К. Н. ОКИШЕВ, Ю. М. КАРПЕЦ, Н. М. КИРЕЕВА

## ФУНКЦИЯ АВТОКОРРЕЛЯЦИИ РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ РАЗМЕРА НАНОЧАСТИЦ ПО СХЕМЕ НАРУШЕННОГО ПОЛНОГО ВНУТРЕННЕГО ОТРАЖЕНИЯ

Предложено при определении размеров наночастиц с помощью фотокорреляционного анализа использовать схему с нарушенным полным внутренним отражением для снижения влияния конвективных течений. Найдена функция автокорреляции интенсивности рассеянного излучения, показано, что метод фотокорреляционного анализа позволяет значительно сократить время измерения размера частиц и повысить точность измерений.

**Ключевые слова:** автокорреляционная функция, фотонно-корреляционная спектроскопия, наночастицы, динамическое рассеяние света, нарушенное полное внутреннее отражение.

Свойства наночастиц существенно зависят от их размера [1—9]. Для измерения размеров наночастиц используются методы электронной просвечивающей микроскопии, атомно-силовой микроскопии и т.д. [10—12]. Метод фотонно-корреляционной спектроскопии (ФКС) характеризуется высокой точностью и скоростью измерений, а также отсутствием необходимости подготовки проб при исследовании жидкофазных сред, содержащих наночастицы [13, 14].

Метод ФКС основан на анализе излучения, рассеянного броуновскими частицами. Для исследования дисперсных систем используется теоретическая зависимость функции автокорреляции рассеянного излучения  $G(\tau)$  от коэффициента диффузии  $D$  броуновских частиц [15]:

$$G(\tau) = \frac{E_m^2}{2} \exp(-k^2 D \tau), \quad (1)$$

где  $k$  — модуль волнового вектора рассеяния,  $E_m$  — амплитуда напряженности поля падающей световой волны.

Точность определения размера наночастиц с помощью метода ФКС снижается при возникновении в кювете с исследуемой средой конвективных течений вследствие тепловых и концентрационных неоднородностей исследуемой среды, появляющихся после загрузки пробы [15—18].

По мнению авторов, уменьшить зависимость результатов измерений по методу ФКС от указанных факторов можно, применив схему с использованием нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), согласно которой излучение, падающее на границу раздела сред под углом больше критического, частично проникает во вторую среду [19]. На рис. 1 представлена схема проведения измерений с использованием НПВО: 1 — падающее излучение, 2 — рассеянное излучение, 3 — зависимость интенсивности проходящего излучения от глубины проникновения.

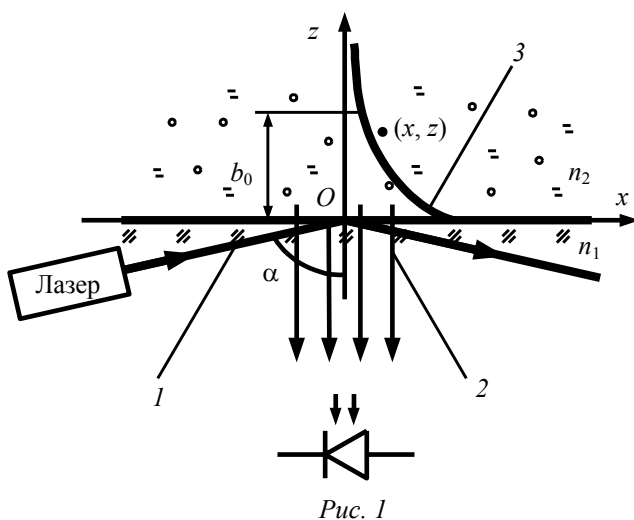


Рис. 1

1 — падающее излучение, 2 — рассеянное излучение, 3 — зависимость интенсивности проходящего излучения от глубины проникновения.

В настоящей работе решается задача нахождения функции автокорреляции интенсивности рассеянного излучения для указанного случая без учета взаимодействия частиц между собой и со стенкой кюветы.

Свет с длиной волны  $\lambda$  падает на границу раздела сред под углом  $\alpha$ , большим критического угла полного внутреннего отражения. Излучение во второй среде можно представить как волну, распространяющуюся вдоль границы раздела в плоскости падения с экспоненциально затухающей по оси  $z$  амплитудой. Тогда разность фаз в волновой зоне от излучения, рассеянного частицей, находящейся в точке  $O$  и в точке с координатами  $(x, z)$ , можно записать следующим образом:

$$\Delta\varphi = k_x x + k_z z, \quad (2)$$

где

$$k_x = \frac{2\pi n_1}{\lambda} \sin \alpha, \quad (3)$$

$$k_z = \frac{2\pi n_2}{\lambda}. \quad (4)$$

Считаем, что концентрация частиц в суспензии мала и они подвержены броуновскому движению. В соответствии с теорией броуновского движения частиц [20, 21] среднеквадратическое смещение частицы за время  $\tau$  равно:

$$\overline{\Delta r^2} = 2D\tau, \quad (5)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, определяемый соотношением [21]:

$$D = \frac{k_b T}{6\pi\eta R}, \quad (6)$$

где  $k_b$  — постоянная Больцмана,  $T$  — термодинамическая температура,  $\eta$  — коэффициент динамической вязкости жидкости,  $R$  — радиус частиц.

Плотность распределения вероятности нахождения частицы в точке с координатой  $x$  для момента времени  $t + \tau$  распределена по нормальному закону [22]

$$P_x = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2\sigma^2}\right), \quad (7)$$

где

$$\sigma^2 = \sigma_x^2 = \sigma_z^2 = \frac{1}{3}\overline{\Delta r^2} = \frac{2}{3}D\tau, \quad (8)$$

$x_0$  — начальная координата частицы в момент времени  $t$ .

Считаем, что плотность распределения вероятности на расстоянии  $z$  от границы также подчиняется нормальному распределению. Учитывая отражение от границы раздела сред, получим

$$P_z = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \left( \exp\left(-\frac{(z-z_0)^2}{2\sigma^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+z_0)^2}{2\sigma^2}\right) \right). \quad (9)$$

Добавка к амплитуде электрического поля для гетеродинного приема запишется в виде

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{z}{b_0}\right) \cos(k_x x + k_z z), \quad (10)$$

где  $b_0 = \frac{\lambda}{2\pi n_1} \sqrt{\sin^2 \alpha - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2}$  — глубина проникновения излучения во вторую среду [19],

$E_0$  — амплитуда напряженности поля падающего излучения. Тогда для начального момента времени

$$E_{t_0} = E_0 \exp\left(-\frac{z_0}{b_0}\right) \cos(k_x x_0 + k_z z_0). \quad (11)$$

Для упрощения решения задачи введем замену

$$u = x - x_0, \quad \varphi_x = k_x x_0. \quad (12)$$

С учетом (12) выражения (10) и (11) преобразуются к виду

$$E = E_0 \exp\left(-\frac{z}{b_0}\right) \cos(k_x u + \varphi_x + k_z z), \quad (13)$$

$$E_{t_0} = E_0 \exp\left(-\frac{z_0}{b_0}\right) \cos(\varphi_x + k_z z_0). \quad (14)$$

Исходя из вышесказанного можно записать значение автокорреляционной функции рассеянного излучения  $G(\tau)$ , в виде

$$G(\tau) = \frac{E_0^2}{\pi} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{-\infty}^\infty \int_0^{2\pi} P_z P_x \exp\left(-\frac{z-z_0}{b_0}\right) \cos(\varphi_x + k_z z_0) \cos(k_x u + \varphi_x + k_z z) d\varphi_x du dz dz_0. \quad (15)$$

Выполнив интегрирование (15) по  $d\varphi_x$  и  $du$  и учитывая выражение (8), получим

$$G(\tau) = E_0^2 \frac{\exp\left(-\frac{k_x^2 D\tau}{3}\right)}{2\sqrt{\pi D\tau/3}} \times \int_0^\infty \int_0^\infty \left[ \exp\left(-\frac{3(z-z_0)^2}{4D\tau}\right) + \exp\left(-\frac{3(z+z_0)^2}{4D\tau}\right) \right] \exp\left(-\frac{z+z_0}{b_0}\right) \cos(k_z(z-z_0)) dz dz_0. \quad (16)$$

**Результаты и обсуждение.** Выражение (16) решено численно с использованием пакета математического моделирования MatLab. Расчеты проводились для излучения с длиной волны  $\lambda = 1550$  нм, падающего под углом  $\alpha = 85^\circ$  на границу раздела между стеклом ( $n_1 = 1,54$ ) и суспензией ( $n_2 = 1,33$ ) сферических наночастиц (см. рис. 1).

На рис. 2 приведены нормированная функция автокорреляции рассеянного излучения  $G(\tau)$  в схеме с НПВО (кривая 1), рассчитанная в относительных координатах  $D\tau$  (6), а также нормированная функция автокорреляции рассеянного излучения для обычной схемы проведения измерений (кривая 2). Видно, что характер кривой 1 сильно отличается в области малых значений  $D\tau$ . В этой области функция автокорреляции с НПВО убывает обратно пропорционально  $D\tau$ , а в области больших времен ее характер подобен функции автокорреляции в обычном случае.



На рис. 3 приведены зависимости  $G(\tau)$ , рассчитанные для сферических частиц радиусом 1 (кривая 1), 10 (2) и 100 нм (3).

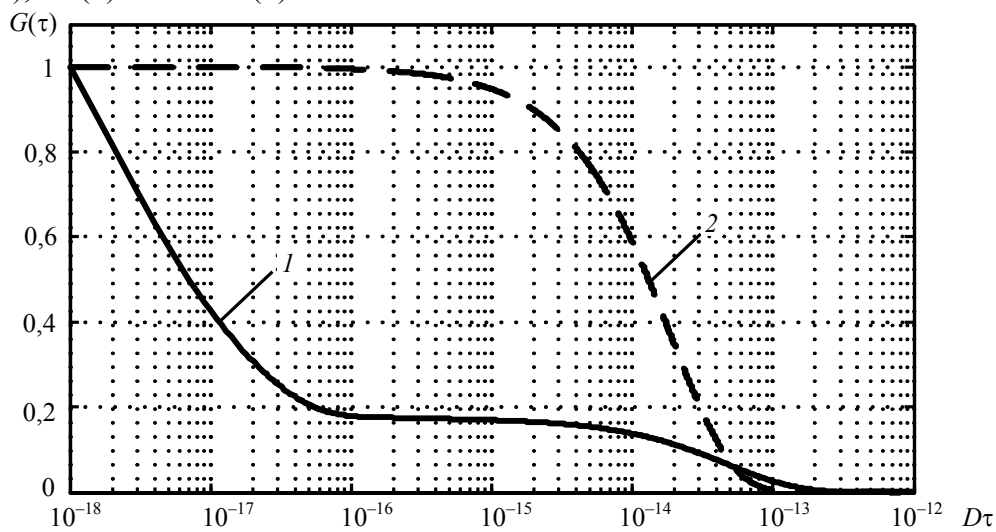


Рис. 2

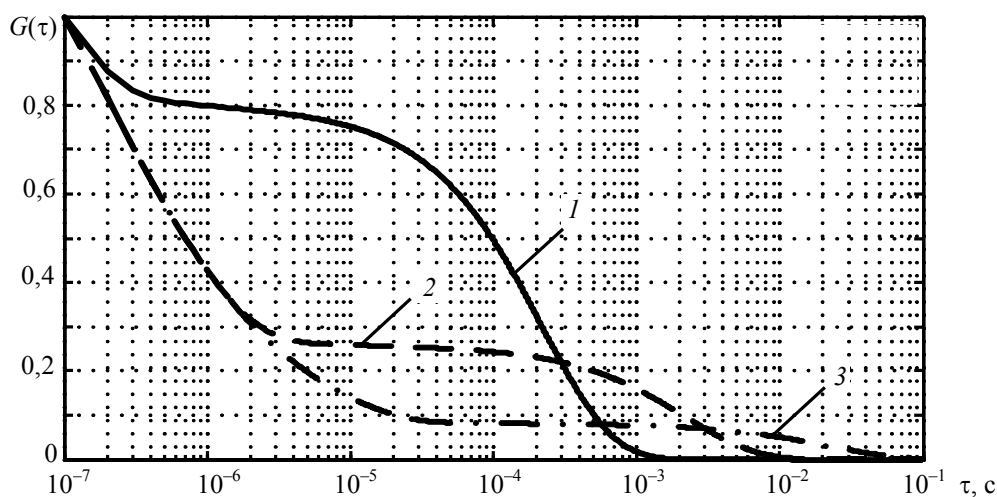


Рис. 3

Полученные функции автокорреляции могут быть использованы для нахождения размеров частиц согласно экспериментальной методике.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Yeh Y.-C., Creran B., Rotello V. M. Gold nanoparticles: preparation, properties, and applications in bionanotechnology // *Nanoscale*. 2012. Vol. 4. P. 1871—1880.
2. Kultchin Yu. N., Bezverbny A. V., Bukin O. A., Voznesensky S. S., Golik S. S., Mayor A. Yu., Shchipunov Yu. A., Nagorny I. G. Nonlinear optical properties of biomineral and biomimetic nanocomposite structures // *Laser Physics*. 2011. Vol. 21, N 3. P. 630 — 636.
3. Rotello V. Nanoparticle: Building Blocks for Nanotechnology. Springer, 2004.
4. Intartaglia R., Bagga K., Brandi F., Das G., Genovese A., Di Fabrizio E., Diaspro A. Optical Properties of Femtosecond Laser-Synthesized Silicon Nanoparticles in Deionized Water // *J. Phys. Chem.* 2011. Vol. 115, N 12. P. 5102—5107.
5. Kovalev D. and Fujii M. Silicon Nanocrystals: Photosensitizers for Oxygen Molecules // *Adv. Mater. (Deerfield Beach Fla.)* 2005. Vol. 17, N 21. P. 2531—2544.

6. *Filonov D. S., Krasnok A. E., Slobozhanyuk A. P., Kapitanova P. V., Nenasheva E. A., Kivshar Yu. S., Belov P. A.* Experimental verification of the concept of all-dielectric nanoantennas // *Applied Physics Letters*. 2012. Vol. 100, N 20. P. 201 113.
7. *Кособукин В. А.* Ближнепольная микроскопия на основе линейного нанозонда // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 55, № 2. С. 82—84.
8. *Englert B. C.* Nanomaterials and the environment: uses, methods and measurement // *J. of Environ.* 2007. Vol. 9. P. 1154—1161.
9. *Zharova N. A., Shadrivov I. V., Zharov A. A., Kivshar Yu. S.* Nonlinear control of invisibility cloaking // *Optics Express*. 2012. Vol. 20, N 14. P. 14 954—14 959.
10. *Maaz K.* The Transmission Electron Microscope. InTech, 2012.
11. *Bellitto V.* Atomic Force Microscopy - Imaging, Measuring and Manipulating Surfaces at the Atomic Scale. InTech, 2012.
12. *Drozdowicz-Tomsia K., Baltar H. and Goldys E. M.* Dense two-dimensional silver single and double nanoparticle arrays with plasmonic response in wide spectral range // *Langmuir*. 2012. Vol. 28, N 24. P. 9071—9081.
13. *Guo S.-M., He J., Monnier N., Sun G., Wohland T., Bathe M.* Bayesian approach to the analysis of fluorescence correlation spectroscopy data II: Application to simulated and in vitro data // *Anal. Chem.* 2012. Vol. 84, N 9. P. 3880—3888.
14. *Pike E. R., Abbiss J. B.* Light Scattering and Photon Correlation Spectroscopy. Kluwer Academic Publishers, 1997.
15. *Series H., Cummins Z., Pike E. R.* Photon Correlation and Light Beating Spectroscopy NATO Advanced Study Institutes. NY: Plenum Press, 1974. Vol. B3.
16. *Ivanov V. I., Okishev K. N.* Thermodiffusion mechanism of dynamic amplitude hologram recording in a two-component medium // *Technical Physics Letters*. 2006. Vol. 32, N 11. P. 967—968.
17. *Okishev K., Doronin I.* Application of photon correlation spectroscopy for investigation of silica nanospheres suspension // *Bulletin of scientific research. Russia, Khabarovsk: FESTU, 2010. Vol. 14.*
18. *Okishev K. N., Ivanov V. I., Kliment'ev S. V., Kuzin A. A., Livashvili A. I.* The thermal diffusion mechanism of the nonlinear absorbing in nanoparticle suspensions // *Atmospheric and Oceanic Optics*. 2010. Vol. 23, N 2. P. 106—107.
19. *Born M., Wolf E.* Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press, 1999.
20. *von Smoluchowski M.* Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen // *Ann. Physik. Leipzig*, 1906. Bd 21. S. 756.
21. *Einstein A.* Investigations on the Theory of the Brownian Movement. Dover Publications, Inc., 1956.
22. *Chandrasekhar S.* Stochastic problems in physics and astronomy // *Reviews of Modern Physics*. 1943. Vol. 15, N 1. P. 1—89.

#### **Сведения об авторах**

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| <b>Иван Сергеевич Доронин</b>       | — аспирант; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра оптических систем связи, Хабаровск; E-mail: ivonpr@mail.ru                                     |
| <b>Константин Николаевич Окишев</b> | — канд. техн. наук; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра оптических систем связи, Хабаровск; заведующий кафедрой; E-mail: okishev2005@yandex.ru |
| <b>Юрий Михайлович Карпец</b>       | — д-р физ.-мат. наук, профессор; Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра оптических систем связи, Хабаровск; E-mail: kjum@festu.khv.ru             |
| <b>Наталья Михайловна Киреева</b>   | — Дальневосточный государственный университет путей сообщения, кафедра физики, Хабаровск; преподаватель; E-mail: ariya75@mail.ru  |

Рекомендована кафедрой  
оптических систем связи

Поступила в редакцию  
01.10.12 г.

Е. Е. МАЙОРОВ, В. Т. ПРОКОПЕНКО

## ПРИМЕНЕНИЕ ДВУХЧАСТОТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ ПРИНЦИПОВ ГЕТЕРОДИННОЙ ГОЛОГРАФИЧЕСКОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ОДНИМ ОПОРНЫМ ПУЧКОМ

Рассмотрена возможность использования двухчастотного излучения для реализации принципа гетеродинной голографической интерферометрии. Такой подход к смещению оптических частот восстановленных интерферирующих волн позволяет задействовать один опорный пучок при регистрации голограммы. Он реализован при использовании излучения, содержащего волны с различными частотами и ортогональными поляризациями в сочетании с интерферометрией сдвига. Получены основные математические соотношения для параметров выходного сигнала: сформирован переменный во времени сигнал, определена фаза сигнала, которая содержит информацию о векторе смещения.

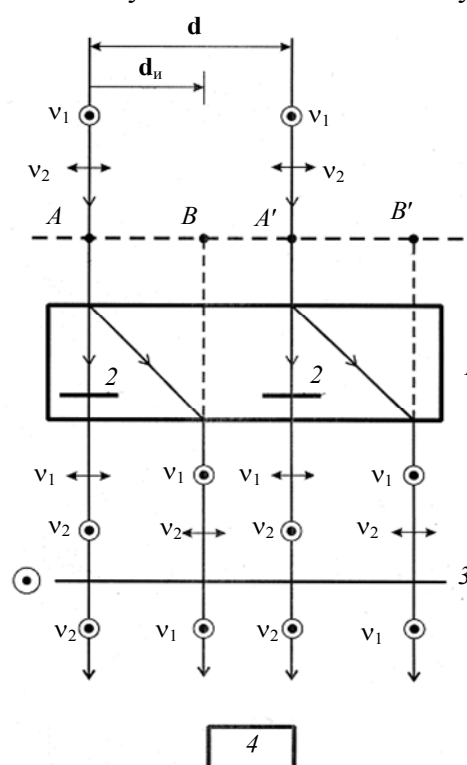
**Ключевые слова:** голографическая интерферометрия, интерферометр, голограмма, диффузно отражающий объект.

Метод голографической интерферометрии широко используется при решении задач неразрушающего контроля и исследовании напряженно-деформированного состояния диффузно отражающих объектов. Особый интерес к этому методу обусловлен его высокой информативностью, возможностью получения трехмерных изображений изучаемых объектов и отсутствием материальных связей с ними [1].

Основная цель применения двухчастотного излучения в голографической интерферометрии — реализовать принцип гетеродинирования, избавившись при этом от второго опорного пучка [2].

Под двухчастотным будем понимать излучение, при котором в одном световом пучке присутствуют две волны с различными оптическими частотами и ортогональными поляризациями. В работах [3, 4] рассматривались отдельные вопросы использования поперечно-сдвиговой интерферометрии и двухчастотного излучения применительно к методу спекл-фотографии. В статье [4] также высказано предположение о возможности использования двухчастотного излучения не только в методе спекл-фотографии, но и в голографической интерферометрии. В настоящей работе покажем, каким образом можно реализовать принцип гетеродинной голографической интерферометрии с применением двухчастотного излучения и поперечно-сдвиговой интерферометрии, задействовав при этом один восстанавливающий (опорный) пучок (см. рисунок).

На рисунке приведены элементы физической системы для реализации предлагаемого метода оптической обработки голографических интерферограмм:  $A, A'$  — одинаковые элементы;  $B, B'$  — мнимые изображения элементов  $A, A'$ ;  $I$  — интерферометр сдвига,  $2$  — полуволновая



пластинка, 3 — поляризатор, 4 — фотоприемник,  $\mathbf{d}$  — вектор смещения соответствующих элементов,  $\mathbf{d}_и$  — смещение интерферометра.

Будем считать, что на двухэкспозиционную голограмму, на которой зарегистрированы два положения исследуемого объекта, попадает восстанавливающий пучок излучения, содержащего две волны с частотами  $\nu_1$  и  $\nu_2$  и ортогональными поляризациями. В соответствии с общепринятой моделью интерпретации голографических интерферограмм [1] будем считать, что в формировании интерференционного поля участвует свет, рассеянный элементами поверхности  $A$  и  $A'$ . Если излучение содержит две оптические частоты  $\nu_1$  и  $\nu_2$ , свет, исходящий от точек  $A$  и  $A'$ , также содержит волны с частотами  $\nu_1$  и  $\nu_2$ .

Пусть  $a_1, a_2, a_3, a_4$  — волны на выходе интерферометра. Запишем выражения для амплитуд волн, участвующих в интерференции, учитывая, что поляризатор не пропускает колебания, плоскости которых перпендикулярны его оси:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a_{10} e^{i(\nu_2 t + \varphi_1)}, \\ a_2 &= a_{20} e^{i(\nu_1 t + \varphi_2)}, \\ a_3 &= a_{30} e^{i(\nu_2 t + \varphi_3)}, \\ a_4 &= a_{40} e^{i(\nu_1 t + \varphi_4)}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Соответствующие фазы световых колебаний запишутся следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} \varphi_2 &= \varphi_1 + \varphi_и, \\ \varphi_3 &= \varphi_1 + \varphi, \\ \varphi_4 &= \varphi_1 + \varphi_u + \varphi, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где  $\varphi_1$  — фаза колебания волны  $a_1$ ;  $\varphi_и$  — разность фаз, вносимая интерферометром;  $\varphi$  — разность фаз лучей от соответствующих элементов.

Интенсивность светового потока на выходе интерферометра в результате интерференции равна произведению комплексно сопряженных сумм амплитуд:

$$\begin{aligned} I &= (a_1 + a_2 + a_3 + a_4)(a_1 + a_2 + a_3 + a_4)^* = \\ &= \left[ a_{10} e^{i(\nu_2 t + \varphi_1)} + a_{20} e^{i(\nu_1 t + \varphi_2)} + a_{30} e^{i(\nu_2 t + \varphi_3)} + a_{40} e^{i(\nu_1 t + \varphi_4)} \right] \times \\ &\times \left[ a_{10} e^{-i(\nu_2 t + \varphi_1)} + a_{20} e^{-i(\nu_1 t + \varphi_2)} + a_{30} e^{-i(\nu_2 t + \varphi_3)} + a_{40} e^{-i(\nu_1 t + \varphi_4)} \right] = \\ &= a_{10}^2 + a_{10} a_{20} e^{i[(\nu_1 - \nu_2)t + \varphi_1 - \varphi_2]} + a_{10} a_{30} e^{i[\varphi_1 - \varphi_3]} + a_{10} a_{40} e^{i[(\nu_2 - \nu_1)t + \varphi_1 - \varphi_4]} + \\ &+ a_{20}^2 + a_{20} a_{10} e^{i[(\nu_2 - \nu_1)t + \varphi_2 - \varphi_1]} + a_{20} a_{40} e^{i[\varphi_2 - \varphi_4]} + a_{10} a_{30} e^{i[\varphi_3 - \varphi_1]} + \\ &+ a_{30} a_{20} e^{i[(\nu_2 - \nu_1)t + \varphi_3 - \varphi_2]} + a_{30}^2 + a_{30} a_{40} e^{i[(\nu_2 - \nu_1)t + \varphi_3 - \varphi_4]} + a_{10} a_{40} e^{i[(\nu_1 - \nu_2)t + \varphi_4 - \varphi_1]} + \\ &+ a_{40} a_{20} e^{i[\varphi_4 - \varphi_2]} + a_{40}^2 + a_{40} a_{30} e^{i[(\nu_1 - \nu_2)t + \varphi_4 - \varphi_3]} + a_{40} a_{20} e^{i[\varphi_4 - \varphi_2]}. \end{aligned}$$

Обозначив  $\nu_2 - \nu_1 = \omega$ , с учетом соотношений (2) представим выражение для результирующей интенсивности в следующем виде:

$$\begin{aligned}
 I = & a_{10}^2 + a_{20}^2 + a_{30}^2 + a_{40}^2 + a_{10}a_{20} \left[ e^{i(\omega t - \varphi_n)} + e^{-i(\omega t - \varphi_n)} \right] + a_{10}a_{30} \left[ e^{-i\varphi} + e^{i\varphi} \right] + \\
 & + a_{10}a_{40} \left[ e^{i[\omega t - (\varphi + \varphi_n)]} + e^{-i[\omega t - (\varphi + \varphi_n)]} \right] + a_{20}a_{40} \left[ e^{-i\varphi} + e^{i\varphi} \right] + \\
 & + a_{20}a_{30} \left[ e^{i[\omega t + (\varphi - \varphi_n)]} + e^{-i[\omega t + (\varphi - \varphi_n)]} \right] + a_{30}a_{40} \left[ e^{i(\omega t - \varphi_n)} + e^{-i(\omega t - \varphi_n)} \right]. \quad (3)
 \end{aligned}$$

Учитывая, что  $\cos x = \frac{e^{ix} + e^{-ix}}{2}$ , и полагая  $a_{10} = a_{20} = a_{30} = a_{40} = a$ , запишем выражение (1) в тригонометрической форме:

$$\begin{aligned}
 I = & 4a^2 + 2a^2 \cos(\omega t - \varphi_n) + 2a^2 \cos \varphi + 2a^2 \cos(\varphi + \varphi_n - \omega t) + \\
 & + 2a^2 \cos(\varphi - \varphi_n + \omega t) + 2a^2 \cos \varphi + 2a^2 \cos(\omega t - \varphi_n) = \\
 = & 4a^2 + 4a^2 \cos(\omega t - \varphi_n) + 4a^2 \cos \varphi + 2a^2 \cos(\varphi + \varphi_n - \omega t) + 2a^2 \cos(\varphi - \varphi_n + \omega t). \quad (4)
 \end{aligned}$$

Информация об искомом векторе смещения содержится в разности фаз  $\varphi$ , которую, в свою очередь, можно выделить из фазы переменной составляющей сигнала  $I'$  на выходе фотоприемника. Выделим последнюю из выражения (4):

$$I' = 4a^2 \cos(\omega t - \varphi_n) + 2a^2 \cos(\varphi + \varphi_n - \omega t) + 2a^2 \cos(\varphi - \varphi_n + \omega t).$$

Таким образом, оптическая обработка голографических интерферограмм с использованием двухчастотного излучения и интерферометрии сдвига позволила реализовать принцип гетеродинной интерферометрии:

- сформировать переменный во времени сигнал,
- показать, что в фазу сигнала входит параметр  $\varphi$ , который содержит информацию о векторе смещения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Александров Е. Б., Бонч-Бруевич А. М. Исследование поверхностных деформаций с помощью голограммной техники // ЖТФ. 1967. Т. 37, вып. 2. С. 360—365.
2. Большаков О. П., Котов И. Р., Майоров Е. Е., Майорова О. В., Хопов В. В. Расшифровка голографических интерферограмм с использованием гетеродинной интерферометрии сдвига // Фундаментальные исследования в технических университетах: Матер. VIII Всеросс. конф. по проблемам науки и высшей школы. СПб: Изд-во СПбГТУ, 2004. С. 66.
3. Большаков О. П., Котов О. И., Майоров Е. Е., Хопов В. В. Обработка голографических интерферограмм и спеклограмм с использованием двухчастотного лазера // Сб. науч. статей „Диагностика и функциональный контроль качества оптических материалов“ / Под ред. Ю. А. Гатчина, В. Л. Ткалич. СПб: СПбГУ ИТМО, 2004. С. 184—187.
4. Большаков О. П., Котов И. Р., Хопов В. В., Майоров Е. Е. Обработка голографических интерферограмм и спеклограмм с использованием двухчастотного лазера // Науч.-техн. вестн. СПбГУ ИТМО. 2003. Вып. 11. С. 21—24.

#### Сведения об авторах

**Евгений Евгеньевич Майоров**

— канд. техн. наук, доцент; Северо-Западный государственный медицинский университет им. И. И. Мечникова, кафедра медицинской информатики и физики, Санкт-Петербург; E-mail: majorov\_ee@mail.ru

**Виктор Трофимович Прокопенко**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра твердотельной оптоэлектроники; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru

Рекомендована кафедрой  
твердотельной оптоэлектроники

Поступила в редакцию  
02.04.12 г.

Г. А. КАЛИНОВ, А. В. ЛЫСАКОВ, В. И. РИМЛЯНД

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА СБОРА ГИДРОЛОГИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ

Рассмотрена конструкция автономного измерительного комплекса для сбора гидрологической информации в наблюдательных скважинах системы мониторинга уровня подземных вод. Комплекс состоит из блока сбора информации, высокоточного скважинного уровнемера, глубоководного измерительного зонда.

**Ключевые слова:** автоматизированный комплекс, мониторинг, уровнемер, ультразвук, микропроцессор, синхронизация, измерение, зонд, наблюдательная скважина.

Долговременные исследования подземных вод показали, что изменения их уровня коррелируют с сейсмическими проявлениями различного масштаба [1]. С 1986 г. в сейсмоопасных зонах Закавказья, Краснодарского края и Дальнего Востока по инициативе НИИ гидрогеологии и инженерной геологии создана сеть из 170 наблюдательных скважин. Для развития системы мониторинга гидрогеодеформационного поля Земли требуются автономные измерительные станции сбора гидрологической информации. Станция представляет собой комплекс для измерения уровня, температуры и электропроводности воды (характеризует степень минерализации воды), атмосферного давления и температуры воздуха.

Необходима высокая точность и надежность работы устройств системы [2]. Авторами настоящей статьи разработаны два типа измерительных станций „Кедр“. Результаты измерений станции „Кедр-А2“ хранятся в переносном модуле энергонезависимой памяти; передача информации выполняется посредством смены накопителя данных. Станция „Кедр-ДМ“ имеет телеметрический канал на основе сотовой или спутниковой связи.

**Высокоточный скважинный уровнемер.** Отдельным измерительным прибором является датчик измерения уровня воды в скважине. Ранее авторами был разработан метод определения уровня жидкости путем измерения времени распространения ультразвукового импульса (УЗИ) в вертикальном звукопроводе, изготовленном в виде тонкого металлического стержня. УЗИ формируется непосредственно на границе раздела жидкость—воздух [3].

На основе данного метода был разработан уровнемер, позволяющий измерять уровень жидкости в резервуарах. Значительно улучшить метрологические характеристики, повысить надежность, уменьшить габариты скважинного уровнемера удалось за счет изменения конструкции [4].

Скважинный уровнемер (рис. 1) состоит из корпуса 1 (защитная труба); вертикального стержня-звукопровода 2, натянутого в центре трубы; поплавка-излучателя УЗИ 3, коаксиально охватывающего стержень и свободно перемещающегося вдоль него; блока питания, синхронизации и приема УЗИ 4, закрепленного на верхнем конце стержня; эталонного излучателя УЗИ 5, закрепленного на нижнем конце стержня. Уровнемер опускается на специальном тросе 6 в скважину 7, связь с наземными блоками осуществляется по кабелю 8. Возбуждение УЗИ происходит пьезокерамическим кольцом, коаксиально охватывающим звукопровод, на который в момент запуска „счетчика времени“ электронная схема, расположенная в поплавке, подает электрический импульс. Для подачи питания и обеспечения синхронизации процесса излучения УЗИ разработана специальная система на основе

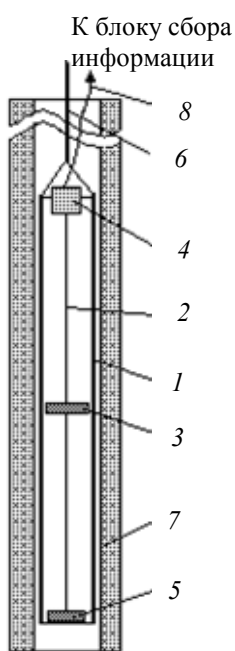


Рис. 1

ма, расположенная в поплавке, подает электрический импульс. Для подачи питания и обеспечения синхронизации процесса излучения УЗИ разработана специальная система на основе

индукционного метода. В качестве первичного витка трансформатора используются звукопровод и защитная труба. Вторичная обмотка трансформатора расположена внутри корпуса поплавка. Индуцированный сигнал разделяется во времени на сигнал питания — „накачки“ накопительного конденсатора и импульс синхронизации (СИ).

На рис. 2, а представлена функциональная схема питания и синхронизации ультразвукового излучателя. Блоки 1—3 расположены на неподвижном основании, 4—11 внутри поплавка. Микропроцессор 1 формирует необходимые для работы сигналы. На вход смесителя 2 поступают сигналы частоты „накачки“ и синхронизации. Выход смесителя 2 подключен к понижающему трансформатору 3. Вторичная обмотка трансформатора питания 4 и конденсатор  $C_{рез}$  образуют резонансный контур, что позволяет получить высокое напряжение на выходе детектора напряжения 6. „Накачка“ накопительных конденсаторов блока 6 производится в течение 20 мс частотой 100 кГц.

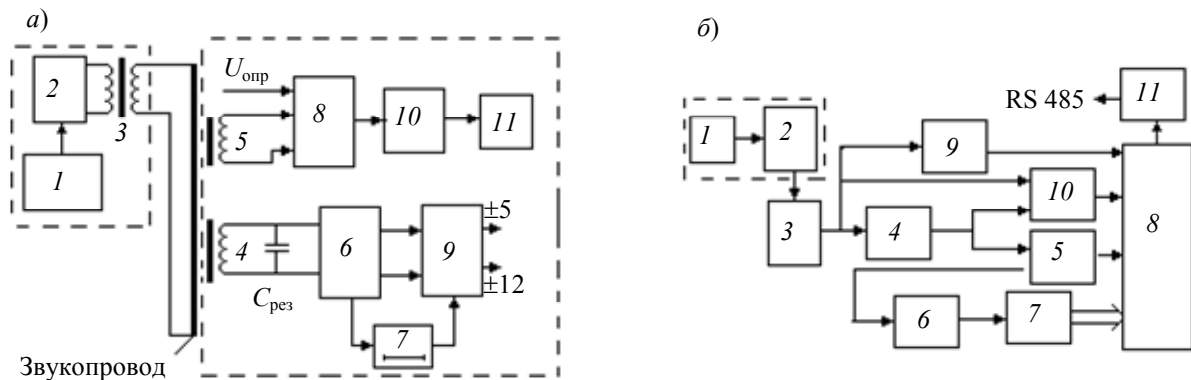


Рис. 2

Микропроцессор вырабатывает СИ через определенное время после окончания видеоимпульса частоты „накачки“ (рис. 3). После прекращения сигнала „накачки“ через время  $T_3$ , схема 7 (рис. 2, а) вырабатывает строб-импульс ( $T_c = 0,1$  мс), во время действия которого блок 9 обеспечивает питание сдвоенного 8 фазового обнаружителя синхроимпульса и блока 10, формирующего электрический импульс для возбуждения пьезокерамики 11.

Фазовый обнаружитель 8 регистрирует первый переход напряжения СИ через нулевой уровень, при этом момент начала формирования акустического импульса не зависит от амплитуды СИ и параметров первичного витка. Конструкция и работа фазового обнаружителя подробно описаны в работе [5]. Электронная схема акустического излучателя (включая трансформаторы питания и синхронизации) размещается на печатной плате диаметром 31 мм, весом 7,5 г.

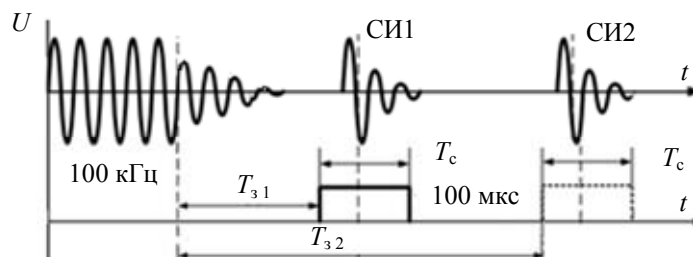


Рис. 3

На рис. 2, б представлена функциональная схема блока приема и измерения времени прихода УЗИ. Основными факторами, влияющими на качество работы уровнемера, являются точность регистрации момента прихода УЗИ и измерения времени его распространения ( $T_{узи}$ ). При перемещении акустического излучателя (поплавка) вдоль волновода амплитуда и форма переднего фронта акустического сигнала существенно изменяются [6]. В уровнемере „Кедр“ реализован фазовый способ регистрации УЗИ, аналогичный способу регистрации СИ поплавком-излучателем [5]. Началом отсчета для времени распространения УЗИ от излучателя

до приемника является СИ, запускающий генератор УЗИ в поплавке. Сформированный излучателем УЗИ распространяется по стержню волновода, поступает на пьезоприемник 1 (рис. 2, б) и далее — на вход малошумящего усилителя 2 (конструктивно совмещены и установлены на торце волновода). Далее сигнал проходит через ФВЧ 2-го порядка 3, усилитель 4 и ограничитель амплитуды 5. Блок схемы 6 обеспечивает фазовый прием первой полуволны импульса. На выходе схемы 6 формируется импульс длительностью  $T_{узи}$ , который „оцифровывается“ счетчиком 7. Микропроцессор 8 считывает состояние счетчика. По окончании измерительного импульса микропроцессор вычисляет расстояние от излучателя до преобразователя. С помощью детектора шума 9 и пикового детектора 10 определяется соотношение сигнал—шум [5]. Посредством встроенного интерфейса 11 RS-485 данные по линии связи передаются в микропроцессор блока сбора информации.

На точность измерения уровня жидкости влияет множество факторов: температура, линейное расширение металлического волновода, дрейф частоты кварцевого генератора и др. С целью исключения воздействия большинства из них предложен метод измерения уровня с автоматической калибровкой [7]. На нижнем конце звукового волновода устанавливается калибровочный излучатель, аналогичный излучателю поплавка (5 на рис. 1; 2, а). Микропроцессор преобразователя (8 на рис. 2, б), изменяя задержку импульса синхронизации (СИ2 на рис. 3), последовательно запускает два процесса: измерение с акустическим излучателем, расположенным на подвижном поплавке, или с калибровочным излучателем, который жестко закреплен на конце волновода. На основе измеренного времени распространения калибровочного УЗИ микропроцессором рассчитываются поправки для времени  $T_{узи}$ .

Разработанный скважинный уровнемер имеет следующие метрологические характеристики: диапазон измерения уровня — 3 м; разрешающая способность датчика уровня — 0,1 мм; основная погрешность измерения уровня — 0,5 %; рабочий диапазон температур — от 0 до +80 °С; габаритные размеры — 51×3180 мм; масса — 3,5 кг.

**Измерение дополнительных параметров.** Помимо уровня жидкости в наблюдательной скважине необходимо измерять температуру и электропроводность воды. Для этого был разработан глубоководный измерительный зонд, который может устанавливаться на 10—200 м ниже поверхности земли. На рис. 4, а и б представлены функциональная схема зонда и конструкция датчика проводимости. В качестве датчика температуры 1 применяется платиновое сопротивление типа Platinum RTDs 1000, подключенное к АЦП 2 (AD7788, 16-разрядный малошумящий сигма-дельта преобразователь с дифференциальным входом). Управление устройством выполняется встроенным микропроцессором 3 средствами SPI-интерфейса. Расчет температуры с погрешностью не более 0,5 % в диапазоне изменения 0—100 °С производится микропроцессором по специальному алгоритму.

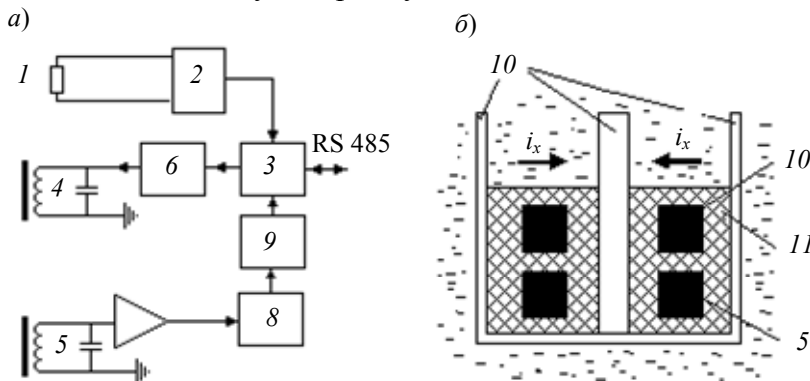


Рис. 4

Основанный на индукционном принципе датчик проводимости [8] представляет собой систему двух соосно расположенных тороидальных катушек индуктивности 4 и 5, охваченных общей петлей связи в виде элементов корпуса датчика 10 и жидкостного проводника



контролируемой среды. Для повышения электрической чувствительности и снижения электрических помех, обусловленных индуктивными и емкостными связями, приемная катушка помещена в незамкнутом экране. Генератор 6 подает переменное напряжение амплитудой 10 В на излучающую катушку 5. Электромагнитное поле вихревых токов возбуждает в приемной катушке 4 ЭДС, величина которой пропорциональна электропроводности жидкости, в которую погружен датчик. ЭДС с катушки поступает на усилитель 7, детектор 8 и через АЦП 9 на микропроцессор. Схема формирует постоянное напряжение, которое прямо пропорционально проводимости в диапазоне от 10 мВ до 3,3 В. У датчика проводимости отсутствуют электроды, и нет электрического контакта с жидкостью, что позволяет использовать его в жестких полевых условиях на большой глубине. Оцифрованные значения температуры и проводимости по запросу передаются в блок сбора информации.

**Блок сбора информации.** Центральным узлом измерительного комплекса „Кедр“ является блок сбора информации (БСИ). По функциональному назначению БСИ представляет собой регистратор данных (логгер), расположенный на поверхности в оголовке скважины. Программное управление логгером и специализированными датчиками осуществляется микропроцессором серии AVR типа АТМЕГА128. Микропроцессор БСИ всегда находится в „спящем“ режиме и потребляет от источника +12 В не более 70 мкА, что существенно, так как в автономном режиме логгер должен находиться не менее одного года. При воздействии сигналов от выносного индикатора или встроенных часов процессор активизируется. Логгер производит опрос измерительных датчиков, заносит результаты в накопитель данных, осуществляет сеансы связи и переходит в режим пониженного энергопотребления.

Информация с уровнемера и датчиков электропроводности и температуры воды по специальному кабелю (интерфейс RS-485) передается на процессор. Атмосферное давление и температура воздуха измеряются датчиками, установленным на плате БСИ, подключенными к микропроцессору. Опрос всех датчиков производится каждый час. Микропроцессор БСИ с помощью встроенных АЦП контролирует напряжение батареи питания и токи потребления в соответствующих измерительных каналах. БСИ обеспечивает минимизацию электропотребления всеми устройствами и защиту от короткого замыкания.

Информация с измерительных станций „Кедр-ДМ“ передается по каналам сотовой связи или спутниковой связи системы „GlobalStar“. Управление модемами осуществляет микропроцессор средствами интерфейса RS-232 (конвертор UART-RS-232). Для сотовой связи применяются модемы TC65 (Terminal фирмы Siemens), которые работают в диапазоне GSM 850/900/1800/1900 МГц; пакетная передача данных осуществляется с использованием модема со встроенными средствами GPRS. Для передачи данных по каналам спутниковой связи применяется модем GSP-1720, который обеспечивает двустороннюю связь со скоростью 9600 бит/с. Используется пакетная передача данных, которая обеспечивает доступ через станцию сопряжения к ресурсам сети Интернет. Передача информации осуществляется один раз в сутки.

В настоящее время ООО „Полином“ совместно с Тихоокеанским государственным университетом освоено опытное производство и монтаж измерительных станций для мониторинга гидрогеодеформационного поля Земли. Изготовлено и установлено в различных регионах РФ 48 систем с сотовой связью, 9 — со спутниковой связью и более 60 систем без телеметрии.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вартанян Г. С., Бредехофт Д., Розлоффе Э. А. Гидрогеологические методы при изучении тектонических напряжений // Советская геология. 1992. № 9. С. 3—12.
2. Вартанян Г. С., Гончаров В. С., Кривошеев В. П. и др. Методические указания по ведению гидрогеодеформационного мониторинга для целей сейсмопрогноза (система R-STEP). М.: ЗАО „Геоинформмарк“, 2000. 77 с.

3. Пат. РФ № 2156962. Способ ультразвукового измерения уровня жидкости / Г. А. Калинов, А. В. Лысаков, В. И. Римлянд. 2000.
4. Римлянд В. И., Калинов Г. А., Казарбин А. В. Автоматизированная система измерения уровня жидкости в резервуарах // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. Т. 43, № 3. С. 47—50.
5. Калинов Г. А., Римлянд В. И., Мигунов Д. С. Оценка влияния шумов на фазовый способ определения момента прихода акустических импульсов // Вестн. ТОГУ. 2009. № 1 (12). С. 275—282.
6. Римлянд В. И., Кондратьев А. И., Калинов Г. А., Казарбин А. В. Методы диагностики и контроля динамических объектов. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2006. 157 с.
7. Пат. РФ № 200612394. Способ ультразвукового измерения уровня жидкости / Г. А. Калинов, А. В. Лысаков, Д. С. Калинов. 2006.
8. Аметшин Р. М., Лугуманов М. Г. Высокочувствительный датчик электропроводности бурового раствора // Науч.-техн. вестн. „Каротажник“. 2003. Вып. 111—112. С. 173—181.

#### *Сведения об авторах*

- Геннадий Алексеевич Калинов** — аспирант; Тихоокеанский государственный университет, кафедра физики, Хабаровск; E-mail: riml@fizika.khstu.ru
- Александр Валентинович Лысаков** — Дальневосточный филиал ВНИИФТРИ, Хабаровск; ведущий инженер; E-mail: polinom@poli.khv.ru
- Владимир Иосифович Римлянд** — д-р техн. наук, доцент; Тихоокеанский государственный университет, кафедра физики, Хабаровск; и.о. заведующего кафедрой; E-mail: riml@fizika.khstu.ru

Рекомендована кафедрой  
физики Тихоокеанского  
государственного университета

Поступила в редакцию  
09.06.10 г.

УДК 614.842.3

А. С. ВАСИЛЬЕВ, А. В. КРАСНЯЩИХ, В. В. КОРОТАЕВ, О. Ю. ЛАШМАНОВ,  
Д. Ю. ЛЫСЕНКО, О. Н. НЕНАРОКОМОВ, А. С. ШИРОКОВ, С. Н. ЯРЫШЕВ

### РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ОБНАРУЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ МЕТОДОМ СОВМЕЩЕНИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрены вопросы разработки программно-аппаратного комплекса обнаружения и мониторинга лесных пожаров на базе беспилотного летательного аппарата с применением метода совмещения изображения тепловизионного и телевизионного каналов. Обоснован выбор основных компонентов системы. Описывается архитектура специального программного обеспечения.

**Ключевые слова:** совмещение видеоинформации, оптико-электронная система, система обнаружения и мониторинга лесных пожаров, телевизионная камера, тепловизор.

**Введение.** Обнаружение лесных пожаров и прогнозирование их распространения является важной народно-хозяйственной задачей. Одним из наиболее эффективных методов своевременного обнаружения является использование видеоинформационного оборудования, установленного на борту беспилотного летательного аппарата (БПЛА) [1].

Принцип совмещения видеоинформации предполагает, что для повышения эффективности видеоинформационной системы используется несколько видеоинформационных каналов с различными характеристиками. Наиболее часто применяют совмещение двух и более

формирователей видеосигнала, работающих в различных диапазонах спектра, например, видимого и инфракрасного (теплового) [2].

Для обнаружения лесного пожара недостаточно только телевизионных камер оптического диапазона вследствие низкого контраста изображения в условиях задымления. В таком случае на изображении, как правило, не видна активная зона пожара, но наличие на нем окружающих объектов позволяет привязать зону пожара к местности, возможно также определить направление ветра, что позволит сузить зону поиска активной зоны пожара.

Использование тепловизионных камер позволяет зафиксировать активную зону даже в условиях сильного задымления. Речь идет, прежде всего, о фронте пожара — области с наиболее высокой температурой, в которой присутствует открытое пламя. Активная зона в данном случае характеризуется высоким контрастом теплового изображения, что можно использовать в алгоритмах обнаружения.

Поскольку тепловизор выступает как преобразователь температуры в яркость или псевдоцвет, то гораздо удобнее использовать естественное изображение местности, пусть и задымленное. На его фоне можно указать активные области пожара, обнаруженные с помощью тепловизора (рис. 1).

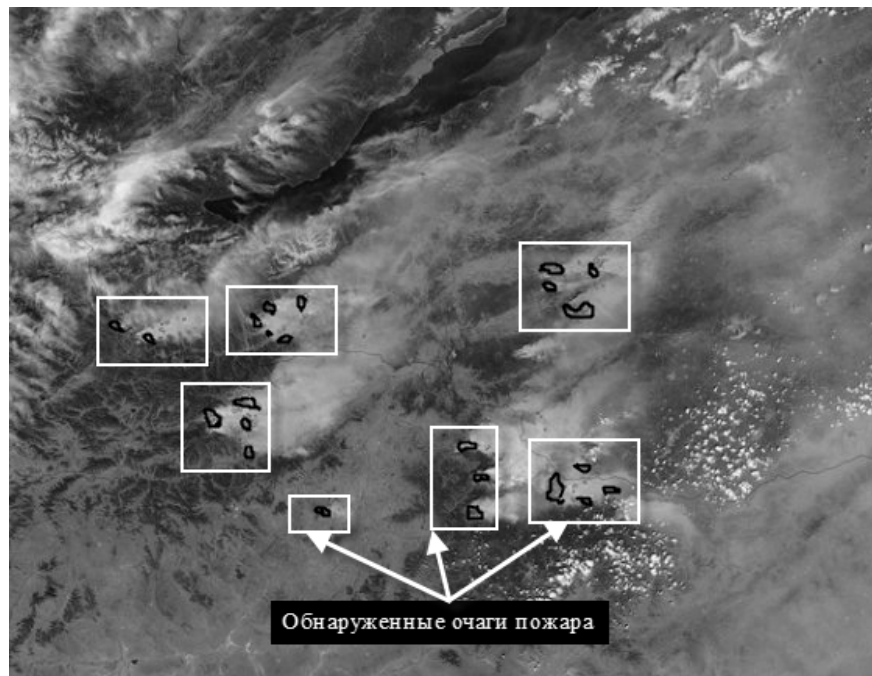


Рис. 1

**Обоснование и выбор компонентов системы обнаружения лесных пожаров.** Для решения задач обнаружения с использованием БПЛА требуется наличие системы комплексирования видеосигналов с двух устройств — телевизионной (ТВ) и тепловизионной камер. При этом камеры должны быть установлены соосно на одной гиростабилизированной платформе, имеющей возможность поворота в двух плоскостях. Для обработки видеоданных требуется также специализированный вычислитель, позволяющий осуществить видеозахват с этих камер, выполнить алгоритм совмещения изображения с целью обнаружения пожара, видеоархивирование и передачу видеоданных по запросу через канал связи.

В системе, структурная схема которой приведена на рис. 2, тепловизор и ТВ-камера подключены к блоку обработки посредством цифрового интерфейса LVDS через платы видеозахвата 2xLVDS стандарта PC104. Каналы управления тепловизором и ТВ-камерой выполнены на основе интерфейса RS-232. В систему также включены твердотельный накопитель SSD, блок питания и элементы защищенного корпуса. Для передачи видеоинформации и

управления системой используется интерфейс Ethernet, подключаемый к компьютеру управления БПЛА.

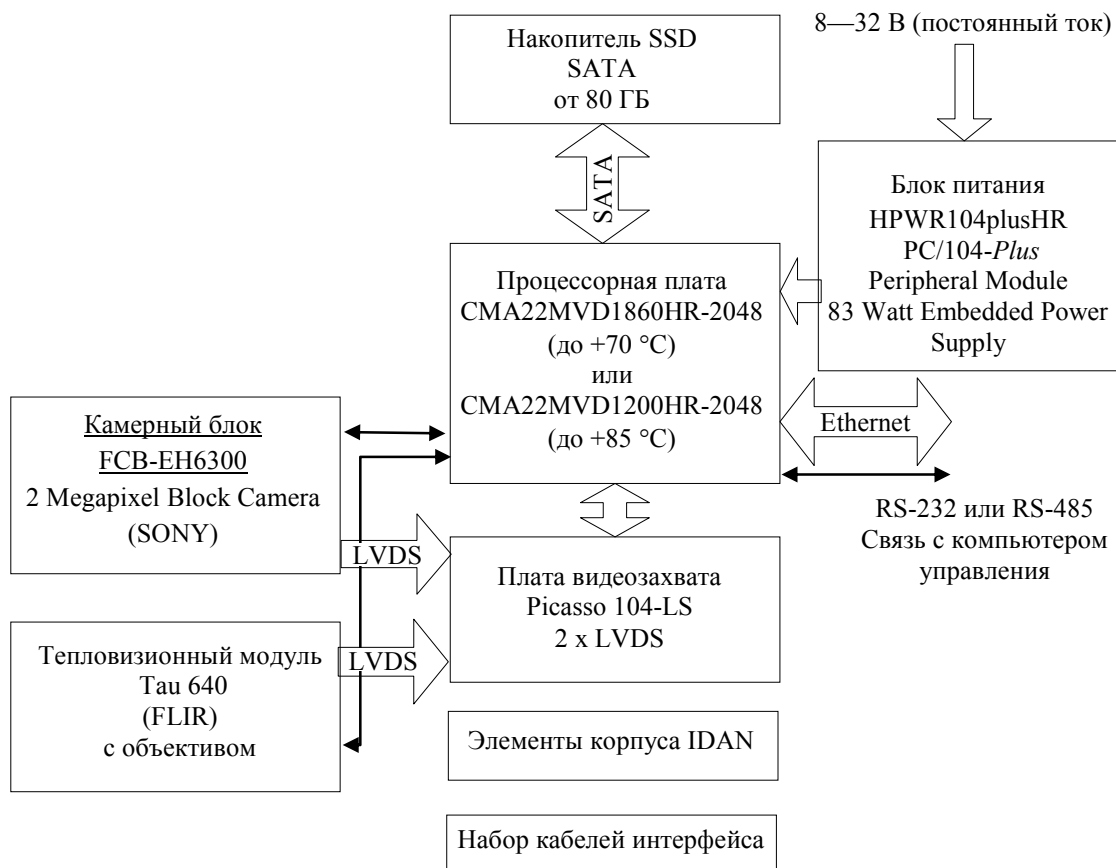


Рис. 2

Бортовой вычислитель предназначен для решения следующих основных задач:

- захват видеосигнала ТВ-камеры и тепловизора;
- сжатие видеосигнала ТВ-камеры и тепловизора в режиме реального времени (если сжатие отсутствует в самой ТВ-камере или тепловизоре);
- видеоархивирование на встроенном накопителе информации ТВ и тепловизионного сигналов;
- обнаружение, распознавание и определение положения пожара на совмещенном изображении;
- связь с главным вычислителем БПЛА;
- управление работой ТВ-камеры и тепловизора с помощью специального интерфейса.

Как показывает практика, процесс видеозахвата и обработки цифровых видеопотоков требует значительной вычислительной мощности. Поскольку описываемое оборудование устанавливается на сравнительно небольших БПЛА, одним из удачных технических решений можно считать использование промышленного компьютера фирмы RTD в качестве бортового вычислителя, выполненного в малогабаритном формфакторе стандарта PC/104 [3]. Кроме того, на это оборудование накладываются дополнительные требования:

- питание — 12 В ( $\pm 5\%$ ), постоянный ток,
- максимальная потребляемая мощность — не более 100 Вт,
- диапазон рабочих температур — от  $-20$  до  $+85$  °С,
- относительная влажность — до 95 % (без образования конденсата),
- канал связи с основным вычислительным блоком — RS-485, полудуплекс, скорость 115 кБод.

В качестве ТВ-камеры выбран блок FCB-EH6300 производства фирмы Sony [4]. Камера имеет встроенный КМОП-фотоприемник разрешением 1920×1080 пкс, диапазон освещенности 0,5—100 000 лк, 20-кратный оптический трансфокатор, позволяющий изменять горизонтальное поле зрения камеры от 2,9 до 55,4°. Подключение производится через цифровой интерфейс LVDS.

Оценить разрешающую способность камеры, работающей по цифровому интерфейсу, можно, определив расстояние в пространстве предметов, эквивалентное шагу элементов фотоприемной матрицы КМОП-фотоприемника в пространстве изображений  $l$ :

$$l = \frac{2H \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right)}{a_h},$$

где  $H$  — высота полета БПЛА;  $\omega$  — поле зрения камеры;  $a_h$  — количество элементов изображения по горизонтали.

Ширину зоны обзора  $L$  можно оценить по формуле:

$$L = 2H \operatorname{tg}\left(\frac{\omega}{2}\right).$$

Для решения задачи привязки совмещенного изображения к местности требуется различие в оптическом канале объектов типа „дорога“, „лесополоса“, „отдельно стоящее здание“, „опора ЛЭП“ и т.п. В этом случае эквивалентный шаг элементов фотоприемной матрицы должен быть не более одной четвертой от размера объекта. В большинстве случаев удовлетворительным значением следует считать 0,2 м.

Камера оптического диапазона высокого разрешения (1920×1080 пкс) предпочтительнее камеры стандартного разрешения (640×480), так как последняя способна обеспечить удовлетворительную разрешающую способность только при малой высоте или при минимальном угле поля зрения (см. таблицу).

$H$ , м	$l/L$			
	1920×1080 пикселей		640×480 пикселей	
	$\omega = 2,9^\circ$	$\omega = 55,4^\circ$	$\omega = 2,9^\circ$	$\omega = 55,4^\circ$
300	0,007/15	0,16/315	0,028/15	0,64/315
700	0,018/35	0,39/735	0,072/35	1,56/735
1500	0,035/75	0,8/1535	0,140/75	3,2/1535

Тепловизор необходим для определения активной зоны (фронта) пожара, в том числе в условиях сильной задымленности наблюдаемого участка леса. Исходя из этих соображений лучше использовать тепловизор, работающий в диапазоне 8—14 мкм, так как в этом спектральном интервале отсутствуют полосы поглощения углекислого газа и воды.

В качестве тепловизора выбран FLIR Tau 640 с фокальной матрицей на неохлаждаемых микроболометрах [5]. Спектральный диапазон чувствительности 7,5—13,5 мкм, разрешение 640×480 пкс, температурная чувствительность NETD — менее 0,5 °С, частота кадров — 30 Гц. Поле зрения тепловизора по горизонтали — 25°, по вертикали — 20°.

**Программное обеспечение системы.** Для выполнения задачи мультиплексирования полученной информации от ТВ и тепловизионных каналов создано специальное программное обеспечение (СПО) с использованием архитектуры „клиент-сервер“ (рис. 3).

Каждый малогабаритный цифровой блок обработки (МЦБО) представляет собой сервер, обеспечивающий выдачу видеоряда клиенту — вычислительному блоку (БВ). МЦБО включает в себя блоки ввода данных от видеоисточников; блок компиляции (решение задач масштабирования и совмещения изображений); блок управления (прием, применение управляющих

команд к соответствующим блокам МЦБО, хранение настроек пользователя); фильтр сжатия (кодирование выходного видеоряда с использованием стандартных кодеков); блок приема/передачи (обеспечивает двустороннюю передачу сигналов между МЦБО и БВ).

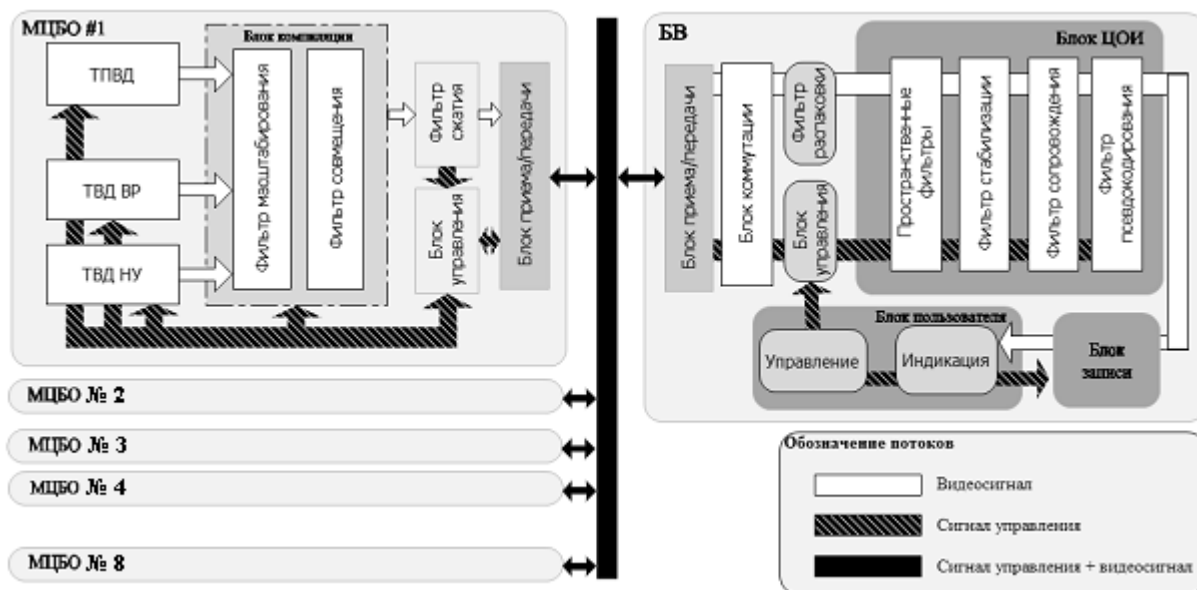


Рис. 3

Вычислительный блок содержит блок коммутации (предназначен для выбора активного, с точки зрения пользователя, МЦБО); фильтр распаковывания (для раскодирования выходного видеоряда с использованием стандартных кодеков); блок цифровой обработки изображений (ЦОИ), предназначенный для применения пространственных фильтров, фильтров электронной стабилизации, сопровождения и псевдокодирования; блок записи результирующего видеоряда в файл; блок пользователя, обеспечивающий управление процессом съема, обработки видеоданных, а также индикации результата пользователю.

**Заключение.** Эффективность решения задачи обнаружения и мониторинга активных зон лесных пожаров увеличивается за счет объединения информации, поступающей с телевизионной камеры и тепловизора. Такой подход позволяет не только определить очаги возгорания участков лесного массива, но и сохранить наглядность результатов съемки.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Ю. И. Лесные пожары на территории России: Состояние, проблемы. М.: ДЭК-ПРЕСС, 2004. 312 с.
2. Васильев А. С., Коротаев В. В., Краснящих А. В., Лашманов О. Ю., Ненарокомов О. Н. Применение совмещения тепловизионного и телевизионного изображений при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений // Изв. вузов. Приборостроение. 2012. Т. 55, № 4. С. 12—16.
3. PC/104 Single Board Computer Top Level Selection Guide [Электронный ресурс]: <[http://www.rtd.com/PC104/PC104\\_cpuModule.htm](http://www.rtd.com/PC104/PC104_cpuModule.htm)>.
4. Sony Color Camera Module FCB-EH6300. Technical Manual. Sony Corporation, 2011. 62 p.
5. Tau 640 Slow Video Camera. User Manual. Flir Commercial Systems. October 2010. 81 p.

#### Сведения об авторах

**Александр Сергеевич Васильев**

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

- Андрей Владимирович Краснящих** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: crus@mail.ru
- Валерий Викторович Коротаев** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; заведующий кафедрой, декан факультета; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Олег Юрьевич Лашманов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: o.lashmanov@gmail.com
- Дмитрий Юрьевич Лысенко** — Группа компаний „Транзас“, Санкт-Петербург; E-mail: Dmitry.Lysenko@transas.com
- Олег Николаевич Ненарокомов** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; ассистент; E-mail: 4307\_globl@mail.ru
- Анатолий Сергеевич Широков** — Группа компаний „Транзас“, Санкт-Петербург; E-mail: Anatoliy.Shirokov@transas.com
- Сергей Николаевич Ярышев** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики; E-mail: ysn63@mail.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
13.10.11 г.

М. В. ГРЯЗЕВ, В. Д. КУХАРЬ, В. Я. РАСПОПОВ

## ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ ПО АВИОНИКЕ В ТУЛЬСКОМ ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ

На примере Тульского государственного университета проанализированы проблемы подготовки специалистов в области авионики.

*Ключевые слова:* авионика, подготовка кадров, авиакосмическая отрасль.

Авионика — наука, исследующая проблемы создания эргатических и автоматических систем управления, контроля и наведения, размещаемых на подвижных носителях авиакосмической техники, функционирующих автономно или с внешним взаимодействием.

Авионика базируется на таких отраслях знаний, как аэродинамика; механика, в том числе микромеханика; мехатроника; оптотехника; психофизиология; радиотехника и радиоэлектроника; робототехника; системотехника; теория управления (кибернетика); электроника, в том числе микроэлектроника; электротехника; эргономика.

Основы авионики как системообразующей науки к настоящему времени не сформулированы. Однако очевидно, что они должны содержать необходимые предметные области отраслей знаний, образующих научную базу авионики.

Наиболее наукоемким направлением авионики является создание приборов для авиакосмической техники. К этому направлению относятся:

- интегрированные комплексы бортового оборудования;
- сенсорные устройства внешней обстановки и состояния носителя и его элементов;
- интеллектуальные экспертные системы и базы знаний;
- вычислительные системы и сети;
- внутрисистемные, межсистемные и межобъектные интерфейсы;
- программно-математическое обеспечение;
- информационно-технические технологии проектирования сложных систем.

Настоящая статья посвящена проблемам подготовки кадров в области авионики и анализу опыта их решения в Тульском государственном университете (ТулГУ). Приоритетная задача Университета — кадровое обеспечение национальной технологической базы авиационно-космической отрасли.

Проект комплексной целевой программы „Укрепление связей высшей школы с производством в условиях конверсии оборонной промышленности Российской Федерации“, разработанный Ассоциацией технических университетов с участием НИИ высшего образования, был внесен Госкомвузом России в 1995 г. в совместную комиссию по разработке федеральной целевой программы для решения вопросов кадрового обеспечения национальной технологической базы (НТБ).



Подготовка кадров по авионике и отдельным ее областям ведется в различных высших учебных заведениях Российской Федерации. В частности, в Тульском государственном университете на факультете систем автоматического управления Института высокоточных систем им. В. П. Грязева ведется многоуровневая подготовка (бакалавр, специалист, магистр) по таким областям, как системы автоматического управления летательными аппаратами (ЛА); приборы и системы ориентации, стабилизации и навигации; оптико-электронные приборы; радиотехника; радиоэлектроника и радиофизика; электрооборудование ЛА. На факультете кибернетики также по многоуровневой схеме ведется подготовка по вычислительным машинам и системам, по робототехническим комплексам, включая тренажеростроение.

Проблема подготовки современных специалистов в любой из областей авионики заключается в необходимости учета многочисленных и многообразных информационных каналов связи между ее объектами. Специалисты, занимающиеся исследованиями, разработкой, проектированием, сопровождением изготовления, наземными и летными испытаниями объектов авионики — информационных датчиков, подсистем и систем пилотажно-навигационных комплексов (ПНК) и др. — обязаны иметь представление как о наземных, так и о летных возможностях всех систем ЛА.

К разработчикам систем ПНК предъявляются многочисленные внутриведомственные технологические и технические требования. Системный подход к разработке бортового оборудования и информационный обмен, организованный мультиплексными каналами связи, позволяет существенно упростить эти требования. Датчики, подсистемы и системы ПНК образуют основной информационно-вычислительный комплекс-ядро бортовой системы управления ЛА. Это обуславливает возможность снятия ограничений, порождаемых внутрисистемными особенностями и привычными подходами к проектированию, и позволяет выработать взаимосогласованные требования по обмену информацией. Для выполнения этих функций специалисты должны владеть интегральным подходом к созданию объектов авионики.

Все, кто получал инженерное образование в 60—70-е гг. прошлого века, обучались по методике традиционной русской инженерной школы, органично сочетавшей фундаментальные и общеинженерные дисциплины. Именно это сочетание определяет системный подход при разработке образцов новой техники. Наиболее показателен пример выдающегося русского инженера В. Г. Шухова (1853—1939), создавшего образцы техники в различных областях: радиобашня (Шухова), нефтеналивные суда, форсунка для сжигания мазута, нефтепроводы и многое другое.

Сохраняя традиции русского инженерного образования, начиная с 1960-х гг. в Тульском государственном университете на кафедре систем автоматического управления и на кафедре гироскопических приборов и устройств (в настоящее время — кафедра приборов управления) ведется подготовка кадров для высокотехнологичных отраслей, в том числе — для авиакосмической. За прошедшие годы подготовлены сотни специалистов по системам ориентации, стабилизации и навигации, электрооборудованию ЛА, оптико-электронным приборам. География мест работы выпускников обширна: Тула, Коломна, Ковров, Москва, Барнаул, Арсеньев и многие другие большие и малые города.

Среди выпускников — руководители предприятий авиакосмической отрасли А. С. Сапронов, В. А. Дмитриев и др., начальник Главного технического управления Министерства оборонной промышленности СССР в период с 1980-го по 1987 гг. Г. Г. Янпольский, первый директор ГК „Росвооружение“ В. И. Самойлов и неупомянутые здесь руководители подразделений и служб, государственные и общественные деятели, внесшие неоценимый вклад в развитие авиакосмической отрасли и подготовку для нее кадров.

В специализированных диссертационных советах ТулГУ защитили докторские диссертации: А. Н. Герашенко — ректор Московского авиационного института, П. П. Парамонов —

директор-главный конструктор Санкт-Петербургского ОКБ „Электроавтоматика“ им. П. А. Ефимова, Ю.И. Сабо — главный конструктор этого же предприятия.

Особое значение в подготовке инженера имеет специальная подготовка. Очевидно, что уровень современных профессиональных знаний в области наукоемких технологий, таких как авиакосмическая отрасль, должен соответствовать перспективам ее развития. Это может быть обеспечено только при необходимом объеме учебных часов, отводимых на общенаучные и общепрофессиональные дисциплины. В настоящее время примерная трудоемкость изучения учебных циклов в ТулГУ (в условных единицах) составляет: гуманитарный, социальный и экономический (22—30); математический и естественнонаучный (76—84); профессиональный (204—211).

Теоретическая подготовка молодых специалистов для предприятий авиакосмической отрасли подкреплена в Университете достаточно основательной лабораторной базой с образцами техники, в частности, по приборам и системам ориентации, стабилизации и по оптоэлектронике.

На кафедре приборов управления работает инновационный и научно-образовательный центр „Микросистемная техника“, на базе которого проводятся занятия по авионике беспилотных летательных аппаратов, включающие летные испытания разработанной аппаратуры на авиамоделях.

Прекрасные возможности для становления студентов и аспирантов как исследователей представляют разнообразные тематические конференции и семинары. Следует отметить, прежде всего, „Гагаринские“ и „Королевские“ чтения, а также организованный в 1991 г. по инициативе проф. Г. Н. Лебедева и проф. В. М. Лохина международный научно-технический семинар „Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации“, в составе которого работает секция „Современные технологии в проектировании авиакосмических систем“. Соучредителями семинара являются восемь вузов, в том числе ТулГУ. Особо следует отметить ежегодную конференцию молодых ученых „Навигация и управление движением“, которая проходит с 1999 г. на базе «ЦНИИ „Электроприбор“» (Санкт-Петербург). Инициатором организации конференции является акад. РАН В. Г. Пешехонов, а ее руководителем — проф. О. А. Степанов. В ТулГУ, на базе Института высокоточных систем им. В. П. Грязева, проходит ежегодная конференция „Техника 21 века — глазами молодых“, программу которой составляют, в том числе, и доклады по авионике.

При подготовке кадров серьезную проблему представляет создание учебников и учебных пособий по авионике как системообразующей дисциплине. В настоящее время имеются следующие монографии: Парамонов П. П. „Основы проектирования авионики“ (Тула, 2003); Ларкин Е. В., Сабо Ю. И. „Сети Петри—Маркова и отказоустойчивость авионики“ (Тула, 2004); „Современные информационные технологии в задачах навигации и наведения беспилотных маневренных летательных аппаратов“ (под ред. М. Н. Красильщикова и Г. Г. Себрякова; М., 2009); „Микросистемы ориентации беспилотных летательных аппаратов“ (под ред. В. Я. Распопова; М., 2011); раздел „Управление и оборудование ДПЛА“ в учебнике Афанасьева П. П. „Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов“ (М., 2006); учебные пособия: Матвеев В. В., Распопов В. Я. „Основы построения бесплатформенных инерциальных навигационных систем“ (СПб, 2009); Распопов В. Я. „Микросистемная авионика“ (Тула, 2010); „Расчетный и лабораторный практикум по микросистемной авионике“ (под ред. В. Я. Распопова; Тула, 2011), а также многочисленные статьи в журналах „Авиакосмическое приборостроение“, „Мехатроника, автоматизация, управление“, „Мир авионики“ и др. Однако проблема остается.

Существует еще одна проблема в подготовке кадров, вызванная системой многоуровневой подготовки „бакалавр—магистр“ и некоторой настороженностью руководителей предприятий к работнику со степенью „бакалавр“. Очевидно, следует исходить из того, что в на-

стоящее время „бакалавр“ — это данность, и нужно искать решения, направленные на скорейшую адаптацию „недоучившегося инженера“ (а именно так определяют бакалавра руководители) к требованиям предприятий. Наиболее простое решение, которое принято в ТулГУ, заключается в том, что бакалавры, решившие продолжать образование в магистратуре, оформляются на работу на предприятие и параллельно обучаются на выпускающей кафедре. При этом дисциплины специализации методически составляются максимально соответствующие профилю предприятия. Данное решение Университет реализует на основе „генеральных“ договоров, заключаемых с предприятиями. Нужно отметить, что отзывы о такой схеме „доводки“ бакалавра положительны.

В этой связи необходимо сказать и о такой форме организации эффективного взаимодействия вуза с предприятиями отрасли, как повышение квалификации и переподготовка кадров. На предприятиях авиакосмической отрасли широко используются наукоемкие технологии проектирования и изготовления новых образцов техники (CALS-технологии, 3D-моделирование, отечественная система ГЛОНАСС, микроструктурное формообразование датчиков и систем и др.). Университет, в соответствии с запросами предприятий, организует работу по повышению квалификации инженерных кадров. На базе кафедры приборов управления проводятся 72-часовые курсы по разным программам (микромеханические гироскопы и акселерометры, системы автоматического управления ЛА, управляемый гиروهвод, инерциальные навигационные системы и др.) для специалистов предприятий, в том числе РФЯЦ—ВНИИТФ им. акад. Е. И. Забабахина (г. Снежинск) и ОАО «Мичуринский завод „Прогресс“».

На протяжении полувека Тульский государственный университет готовит кадры для различных отраслей промышленности, в том числе авиакосмической, и имеет в настоящее время репутацию учебного заведения, активно совершенствующего способы подготовки и повышения персонального уровня кадров.

#### *Сведения об авторах*

**Михаил Васильевич Грязев**

— д-р техн. наук, профессор; Тульский государственный университет; ректор

**Владимир Денисович Кухарь**

— д-р техн. наук, профессор; Тульский государственный университет; проректор по научной работе и международным связям

**Владимир Яковлевич Распопов**

— д-р техн. наук, профессор; Тульский государственный университет, кафедра приборов управления; заведующий кафедрой; E-mail: tguru@yandex.ru

Рекомендована ТулГУ

Поступила в редакцию  
14.03.12 г.

А. А. БОБЦОВ, А. А. ПЫРКИН

## АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ НЕИЗВЕСТНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ВОЗМУЩЕНИЯ ДЛЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СИСТЕМЫ С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ В УПРАВЛЕНИИ

Рассматривается задача компенсации неизвестного синусоидального возмущения в условиях запаздывания в управлении для нелинейной системы.

*Ключевые слова:* управление в условиях запаздывания, нелинейные системы, компенсация возмущающих воздействий.

Проблема управления в условиях запаздывания является актуальной и сложной для современной теории управления. Использование цифровых регуляторов, управление удаленными объектами, например, через Интернет, а также другие факторы вызывают нежелательные запаздывания. Несмотря на то что проблема эта хорошо известна и ей посвящено большое количество публикаций, следует отметить, что универсальных методов управления до сих не получено, и для решения практических задач приходится использовать тот или иной теоретический подход, связанный с конкретной математической постановкой. В рамках настоящей работы авторы планируют не проводить детальный анализ методов управления в условиях запаздывания, а представить новый алгоритм компенсации возмущений, базируясь на результатах монографии [1] и статьи [2].

В [1] была рассмотрена классическая задача стабилизации линейного стационарного объекта управления с постоянным запаздыванием

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau), \quad y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где  $x(t) \in R^n$  — измеряемый вектор переменных состояния,  $u(t)$  — скалярная входная переменная,  $y(t)$  — скалярная выходная переменная,  $\tau \geq 0$  — постоянное запаздывание;  $A$ ,  $B$ ,  $C$  — матрицы соответствующей размерности, содержащие известные параметры объекта управления.

Необходимо найти такой закон управления  $u(t)$ , чтобы положение равновесия  $x = 0$  было асимптотически устойчивым. Хорошо известно, что для системы вида (1) при  $\tau = 0$  можно синтезировать закон управления вида:

$$u = Kx(t), \quad (2)$$

где вектор-строка  $K$  выбирается из условия гурвицевости матрицы состояния замкнутой системы  $A + BK$ .

Для случая  $\tau > 0$  закон управления (2) можно переписать в виде:

$$u(t) = Kx(t + \tau), \quad (3)$$

где  $x(t + \tau)$  — значение вектора  $x(t)$  через интервал времени  $\tau$ . Очевидно, что закон управления (3) нереализуем, поскольку содержит неизвестную величину  $x(t + \tau)$ . Однако вектор

$x(t + \tau)$  можно рассчитать на основе имеющейся информации об объекте. Базируясь на положениях работы [1], значение  $x(t + \tau)$  будем искать в виде

$$x(t + \tau) = e^{A\tau} x(t) + \int_{t-\tau}^t e^{A(t-s)} B u(s) ds. \quad (4)$$

Из выражения (4) легко получить реализуемый закон управления вида (3).

Однако в современной практике решения задач управления в условиях запаздывания рассмотрение систем вида (1) не представляет интереса. Сегодня сложно представить ситуацию, когда на систему управления не действует возмущающее воздействие. Случай компенсации неизвестного синусоидального возмущающего воздействия для объекта вида (1) рассмотрен в работе [2]:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + B[u(t - \tau) + \delta(t)], \quad y(t) = Cx(t), \quad (5)$$

где  $\delta(t) = \delta_0 + \delta_1 \sin(\omega t + \varphi)$  — неизмеряемый сигнал, а  $\delta_0, \delta_1, \omega, \varphi$  — неизвестные постоянные параметры.

В работе [2] с использованием закона управления (3), (4) была решена комплексная задача компенсации возмущающего воздействия  $\delta(t) = \delta_0 + \delta_1 \sin(\omega t + \varphi)$  и стабилизации неустойчивого положения равновесия  $x = 0$ . Также в работе [2] последовательно были выстроены компенсатор возмущения и предсказатель. Методика синтеза компенсатора возмущения предполагает знание параметров объекта управления, а также наличие косвенной информации, которую можно получить по измерениям состояний системы. Были идентифицированы неизвестные параметры  $\delta_0, \delta_1, \omega, \varphi$  и с учетом величины запаздывания  $\tau$  синтезирован компенсатор.

В настоящей статье рассмотрим более сложную (в сравнении с [1, 2]) задачу компенсации неизвестного синусоидального возмущения для нелинейной системы с запаздыванием в управлении. Пусть объект управления имеет вид

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_1(t) &= x_2(t) + \psi_1(y(t - \tau_1)) + \theta_1 y(t), \\ &\dots \\ \dot{x}_n(t) &= u(t - \tau) + \delta(t) + \psi_n(y(t - \tau_n)) + \theta_n y(t), \\ y(t) &= x_1(t), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

где  $\theta_i$  и  $\psi_i(y(t - \tau_i))$  — соответственно известные постоянные параметры и нелинейные функции,  $\tau_i$  — известные константы, причем  $\tau_i \geq \tau$  для всех  $i = \overline{1, n}$ .

Ставится задача синтеза такого управляющего воздействия  $u(t)$ , чтобы положение равновесия  $y = 0$  было асимптотически устойчивым.

Аналогично [3] продифференцируем переменную  $y(t) = x_1(t)$   $n$  раз, последовательно проводя замены переменных

$$\left. \begin{aligned} \dot{y}(t) &= \dot{\xi}_1(t) = \xi_2(t), \\ \dot{\xi}_2(t) &= \xi_3(t), \\ &\dots \\ \dot{\xi}_n(t) &= u(t - \tau) + \delta(t) + \frac{\partial^{n-1} \psi_1(y(t - \tau_1))}{\partial y(t - \tau_1)^{n-1}} y^{(n-1)}(t - \tau_1) + \dots \\ &\dots + \psi_n(y(t - \tau_n)) + \theta_1 y^{(n-1)}(t) + \dots + \theta_n y(t). \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Выберем закон управления следующим образом:

$$u(t) = u_1(t) - \frac{\partial^{n-1} \psi_1(y(t + \tau - \tau_1))}{\partial y(t + \tau - \tau_1)^{n-1}} y^{(n-1)}(t + \tau - \tau_1) + \dots + \psi_n(y(t + \tau - \tau_n)). \quad (8)$$

Подставив (8) в уравнение (7), получим

$$\left. \begin{aligned} \dot{\xi}_1(t) &= \xi_2(t), \\ \dot{\xi}_2(t) &= \xi_3(t), \\ &\dots \\ \dot{\xi}_n(t) &= u_1(t - \tau) + \delta(t) + \theta_1 y^{(n-1)}(t) + \dots + \theta_n y(t). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Легко видеть, что система (9) аналогична (5), следовательно, к ней может быть применен алгоритм управления [2], который обеспечит асимптотическую устойчивость положения равновесия  $y = 0$ .

Итак, положения метода компенсации неизвестного синусоидального возмущающего воздействия в условиях запаздывания [2] развиты на нелинейные системы. Остается нерешенной задача стабилизации модели (6) в условиях неизвестных параметров  $\theta_i$ .

Работа выполнена при финансовой поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. (соглашение № 14.В37.21.0406).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krstic M. Delay compensation for nonlinear, adaptive and PDE systems. Birkhauser, 2009.
2. Pyrkina A., Smyshlyaev A., Bekiaris-Liberis N., Krstic M. Rejection of Sinusoidal Disturbance of Unknown Frequency for Linear System with Input Delay // American Control Conf. Baltimore, 2010. P. 5688—5693.
3. Мирошник И. В., Никифоров В. О., Фрадков А. Л. Нелинейное и адаптивное управление сложными динамическими системами. СПб: Наука, 2000.

#### Сведения об авторах

**Алексей Алексеевич Бобцов**

— д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; декан факультета КТиУ, заведующий кафедрой; E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru

**Антон Александрович Пыркин**

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

Рекомендована кафедрой систем управления и информатики

Поступила в редакцию 10.09.12 г.

М. В. ФАРОНОВ, А. А. ПЫРКИН, И. Б. ФУРТАТ, С. А. КОЛЮБИН,  
М. О. СУРОВ, А. А. ВЕДЯКОВ

## РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ МОБИЛЬНЫМИ РОБОТАМИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ

Рассматривается алгоритм управления „последовательный компенсатор“ в задаче движения трехколесного мобильного робота по неизвестной траектории. Для получения информации о состоянии робота используется система технического зрения.

**Ключевые слова:** мобильный робот, техническое зрение, робастное управление.

Рассмотрим робастный алгоритм управления в условиях полной параметрической и частичной структурной неопределенности [1—3] на примере движения мобильного робота (Festo Robotino). Этот робот обладает тремя независимыми степенями свободы при движении на плоскости. На рис. 1 представлены внешний вид робота (а), его локальная система координат (б) и схема движения вдоль стены (в, ИД1—ИД9 — инфракрасные датчики, Дв1—Дв3 — двигатели постоянного тока, Б — защитный бампер).

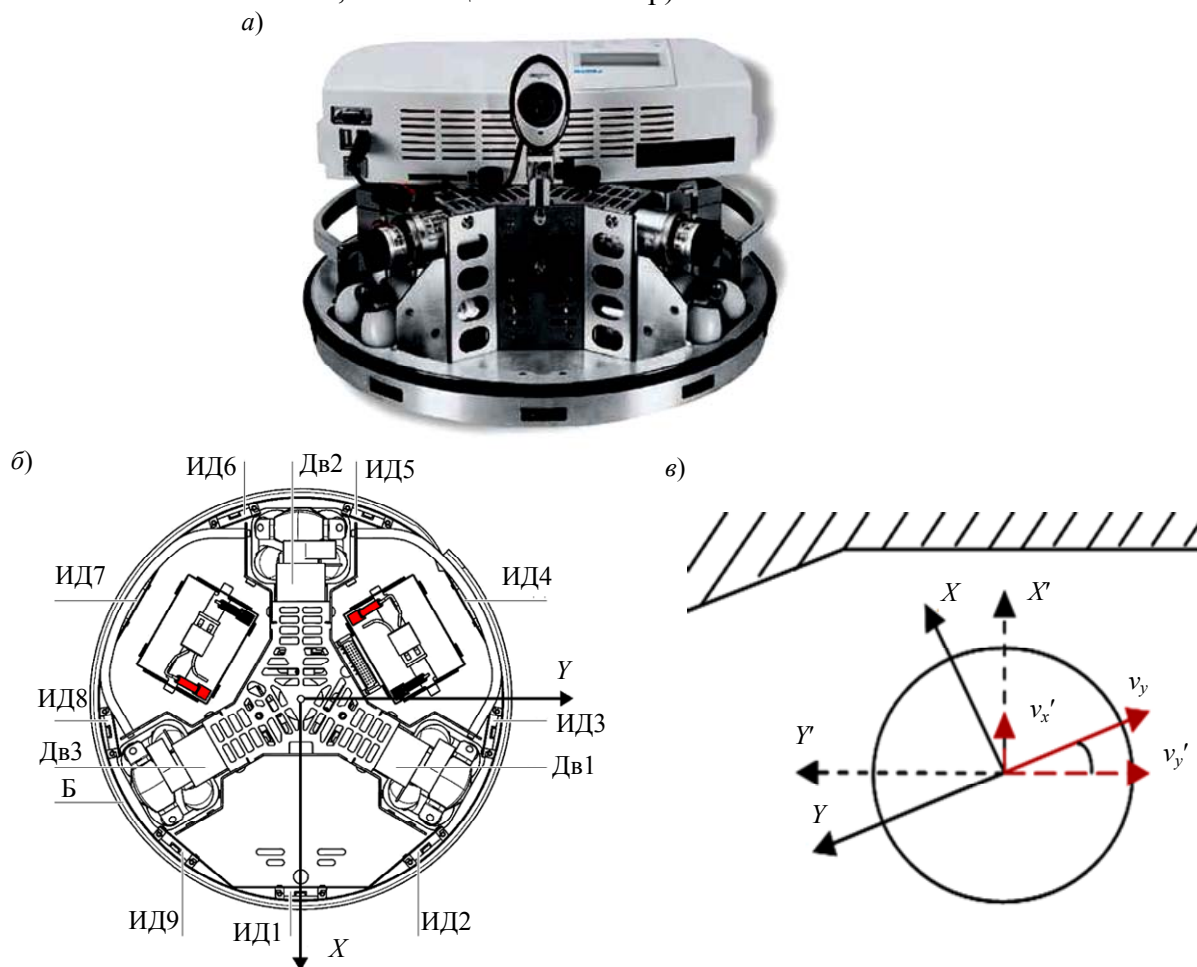


Рис. 1

Была поставлена следующая задача: робот должен двигаться вдоль криволинейной стены (рис. 1, в) на заданном расстоянии  $y^*$ , а текущее расстояние определять с помощью встроенной системы технического зрения.

Движение робота определяется двумя алгоритмами: один задает постоянную скорость бокового движения  $v_y$ , второй обеспечивает поворот робота, чтобы с течением времени стабилизировать заданное расстояние до стены  $y^*$  с погрешностью  $\delta$ . Упрощенная математическая модель изменения расстояния при постоянной скорости бокового движения может быть записана с использованием оператора дифференцирования  $p$ :

$$y(t) = \frac{K}{p(Tp + 1)} \bar{u}(t), \quad \bar{u}(t) = \frac{1}{a(p)} u(t), \quad (1)$$

где  $y(t)$  — расстояние,  $u(t)$  — управление, обеспечивающее поворот робота вокруг своей оси,  $\bar{u}(t)$  — поворотный момент,  $a(p)$  — гурвицев полином, описывающий паразитную динамику органов управления,  $K$  и  $T$  — неизвестные коэффициент передачи и постоянная времени робота.

Алгоритм управления для  $u(t)$  выберем в форме „последовательный компенсатор“ [1], обеспечивающий экспоненциальную устойчивость [2]:

$$u(t) = \mu(\xi(t) + \dot{\xi}(t)), \quad \dot{\xi} = \sigma(-\xi(t) + e(t)), \quad e(t) = y^* - y(t), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} |e(t)| \leq \delta, \quad (2)$$

где  $\mu > 0$ ,  $\sigma > \mu$  — настраиваемые параметры,  $e(t)$  — ошибка слежения. Расчет прямых управлений для двигателей является простой алгебраической задачей.

На рис. 2 приведены ошибка слежения ( $a$ ) и скорость поворота робота вокруг своей оси ( $b$ ). Проведенный эксперимент подтверждает эффективность полученного закона управления.

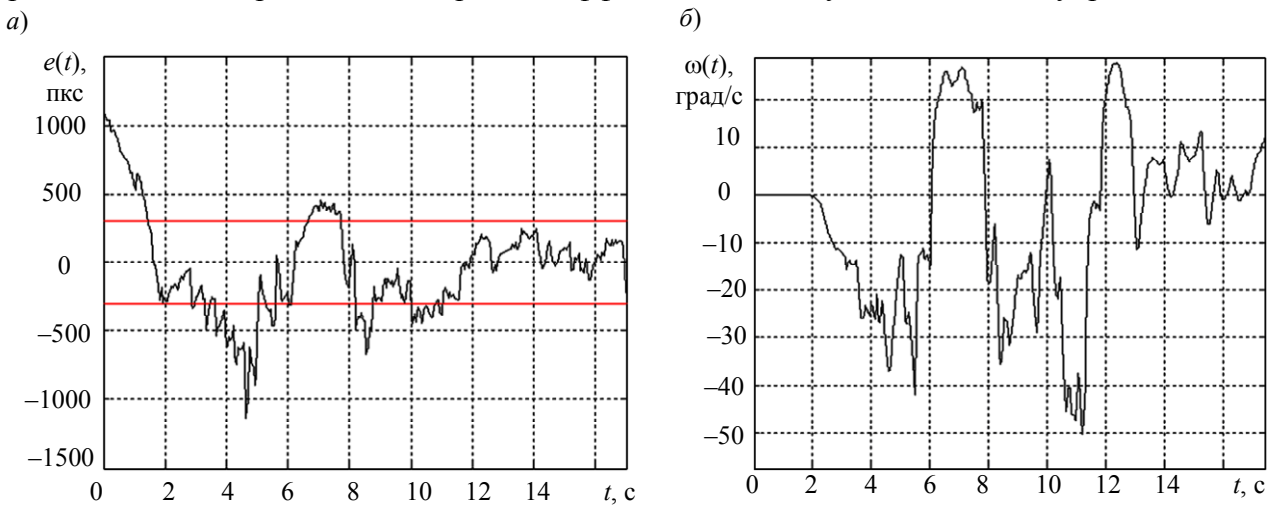


Рис. 2

Работа выполнена при поддержке ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг. (соглашение 14.В37.21.0871, соглашение 14.В37.21.1480).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бобцов А. А., Фаронов М. В. Управление по выходу нелинейными системами с запаздыванием в условиях неучтенной динамики // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2011. № 3. С. 79—87.
2. Bobtsov A. A., Pyrkin A. A., Faronov M. V. Output control for time-delay nonlinear system providing exponential stability // Proc. of 19th Mediterranean Conf. on Control & Automation (MED). 2011. P. 515—520.
3. Фуртат И. Б., Цыкунов А. М. Адаптивное управление объектами с неизвестной относительной степенью // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 6. С. 109—118.



**Сведения об авторах**

- Максим Владимирович Фаронов** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Антон Александрович Пыркин** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Игорь Борисович Фуртат** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: cainenash@mail.ru
- Сергей Алексеевич Колюбин** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Максим Олегович Суров** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Алексей Алексеевич Ведяков** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра систем управления и информатики; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
систем управления и информатики

Поступила в редакцию  
10.09.12 г.

УДК 535.66, 681.78

А. А. АЛЁХИН, Е. В. ГОРБУНОВА, А. Н. ЧЕРТОВ, Д. Д. ШИТОВ

## ОБ ОПИСАНИИ ОБЪЕКТОВ АНАЛИЗА ДЛЯ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЦВЕТОВОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Предложен подход к описанию цвета объекта анализа для систем технического зрения, основанный на использовании совокупности функций цветового тона, насыщенности и светлоты.

**Ключевые слова:** цветовой образ, оптико-электронная система, цвет объекта, система технического зрения.

Цвет как характеристика объекта является результирующей функцией взаимодействия ряда физических процессов, включая выборочное поглощение на различных частотах, отражение и рассеяние света источника. Как правило, эти явления описывают общей макроскопической моделью бинарной функции распределения отражения/пропускания [1]. Однако подобная методология ограничена и не дает возможности комплексного и полного описания сложного цветного объекта.

Для того чтобы эффективность работы оптико-электронной системы (ОЭС) технического зрения, предназначенной для цветовой идентификации, не зависела от свойств материала и поверхности объекта анализа, его формы и положения в пространстве, а также от расположения источников и изменения условий освещения, необходимо установить однозначную связь между указанными параметрами и цветом объекта.

Предлагается подход к описанию цветового образа как совокупности трех функций различных переменных — цветового тона, насыщенности и светлоты. При этом цветовой тон несет информацию только о спектральных свойствах отражения или пропускания материала

элемента поверхности объекта анализа. Светлота как компонент цветового образа содержит данные о форме и ориентации элемента поверхности, с ее помощью можно описать и впоследствии определить поверхностные дефекты (или внутренние дефекты — в случае анализа прозрачных объектов). Параметр „насыщенность цвета“ также содержит информацию о форме и ориентации вследствие зависимости от функции, характеризующей локальные затенения поверхности объекта в процессе его анализа.

Использование предложенного подхода к описанию цветного объекта позволяет установить тождество компонентов его цветового образа с координатами цветового пространства HLS (Hue — цветовой тон, Lightness — светлота, S — насыщенность). При этом последнее удобно перевести в сферическую систему координат, а в цветовом канале L ввести логарифмический множитель [2], что позволит обеспечить подстройку отображения ОЭС к особенностям восприятия цветовой картины визуальным аппаратом человека.

С целью прогноза воздействия различных факторов на процесс цветового анализа с помощью оптико-электронных систем технического зрения также исследовано влияние изменения рабочих параметров источников излучения и наличия бликов на поверхности объекта на различные составляющие его цветового образа.

Работа проводилась при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках федеральной целевой программы „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России“ на 2009—2013 гг.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Форсайт Д. А., Понс Ж. Компьютерное зрение. Современный подход. М.: Вильямс, 2004.
2. Цвет в промышленности / Под ред. Р. Мак-Дональда; пер. с англ. И. В. Пеновой, П. П. Новосельцева. М.: Логос, 2002.

#### *Сведения об авторах*

- Артём Андреевич Алёхин** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: temka-pk@mail.ru
- Елена Васильевна Горбунова** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: vredina\_ia@mail.ru
- Александр Николаевич Чертов** — канд. техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: a.n.chertov@mail.ru
- Денис Дмитриевич Шитов** — студент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра оптико-электронных приборов и систем; E-mail: chock-design@yandex.ru

Рекомендована кафедрой  
оптико-электронных приборов и систем

Поступила в редакцию  
04.09.12 г.

А. С. ЗАГАРСКИХ, А. А. БЕЗГОДОВ, С. В. ИВАНОВ, А. В. БУХАНОВСКИЙ

## ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ СРЕДА ДЛЯ ОРГАНИЗАЦИИ ВИРТУАЛЬНЫХ ПОЛИГОНОВ НА ОСНОВЕ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Рассмотрена возможность применения виртуальных полигонов с использованием технологии облачных вычислений, моделирующих объектов и потоков задач для создания композитных приложений. Виртуальный объект моделирования сопряжен с реальной моделью посредством систем захвата движения.

**Ключевые слова:** облачные вычисления, виртуальный полигон, моделирующий объект, захват движений, поток заданий.

В настоящее время для изучения поведения сложных систем активно применяется суперкомпьютерный эксперимент в режиме реального времени; для интерпретации его результатов используются технологии научной визуализации. Технологии создания стереоизображений позволяют усилить эффект „погружения“ исследователя в моделируемое явление с возможностью всестороннего наблюдения и анализа воспроизводимых закономерностей реального мира. В сочетании с интерактивными технологиями, отображающими реакцию моделируемого объекта на внешние воздействия, они позволяют создавать *виртуальные полигоны* (ВП) — проблемно-ориентированные программно-аппаратные комплексы виртуальной реальности, используемые для поддержки принятия решений в различных областях науки и промышленности [1].

При всех режимах использования полигона задача моделирования среды является базовой, модели различных объектов конструируются самими пользователями, выполняющими эксперименты, например, в форме потоков заданий (workflow, WF) или моделирующих объектов (domain objects) [2]. Это позволяет описывать отдельные эксперименты в виде *композитных приложений*, объединяющих сами вычислительные пакеты, источники данных, средства визуализации и взаимодействия, которые можно исполнять на распределенных ресурсах в среде облачных вычислений. Для поддержки разработки и исполнения таких приложений целесообразно применять специализированную инструментальную технологическую среду (ИТС), которая обеспечивает пользователю возможность работы непосредственно с содержательными объектами предметной области, не вдаваясь в специфику использования самих распределенных ресурсов.

В целом ИТС представляет собой открытую программно-аппаратную платформу на основе технологии iPSE [3], функционирующую в распределенной вычислительной среде, которая объединяет различные прикладные сервисы, необходимые для организации ВП. Доступ ко всем ресурсам обеспечивается в рамках модели облачных вычислений, поддерживаемой платформой CLAVIRE [2]: внешний пользователь не является владельцем вычислительных ресурсов и установленных на них прикладных пакетов и не может управлять физическим исполнением приложений в распределенной среде. Он через web-интерфейс взаимодействует с ИТС посредством сети Интернет. Несмотря на широту набора доступных сервисов ИТС не является полноценной средой облачных вычислений; скорее это узкоспециализированное средство, в котором пользователь-разработчик имеет возможность создавать прототипы собственных ВП, описывая их компоненты на языках высокого уровня EasyFlow и EasyPackage [4], а также выполнять вычислительные эксперименты на их основе. Таким образом, ИТС обеспечивает одновременное функционирование нескольких ВП, а также совместную работу

нескольких пользователей в рамках одного ВП, с одним и тем же или различными объектами. Для обеспечения интерактивного управления вычислительным экспериментом через систему виртуальной реальности в ИТС используется модель интерактивного композитного приложения [5], допускающая динамическое изменение структуры WF непосредственно во время исполнения как за счет заложенного сценария вычислений, так и внешнего управления.

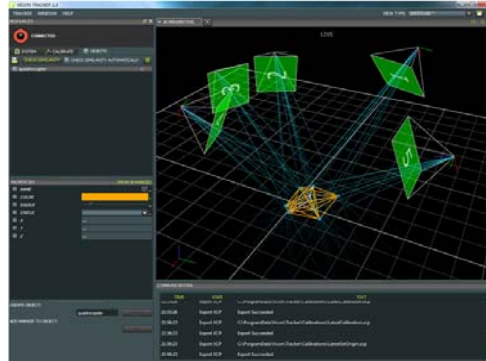
ИТС может быть использована не только для изучения свойств моделируемых объектов в ходе вычислительных экспериментов, но и для прототипирования информационно-измерительных и управляющих систем, например, бортовых интеллектуальных систем управления и поддержки принятия решений операторов сложных динамических объектов.

На рисунке проиллюстрирована работа прототипируемой системы управления полетом беспилотного летательного аппарата. Данные о движении аппарата вводятся в ВП посредством системы оптического захвата движения (а) производства компании Vicon, под управлением ИТС рассчитываются аэродинамические характеристики, производится прогноз траектории движения и на основе сравнения наблюдаемой и расчетной траекторий формируется управляющее воздействие (б). Результаты работы ВП отображаются в системе виртуальной реальности (в); пользователь может независимо управлять реальным аппаратом и вносить „виртуальные“ возмущающие факторы в среду ВП.

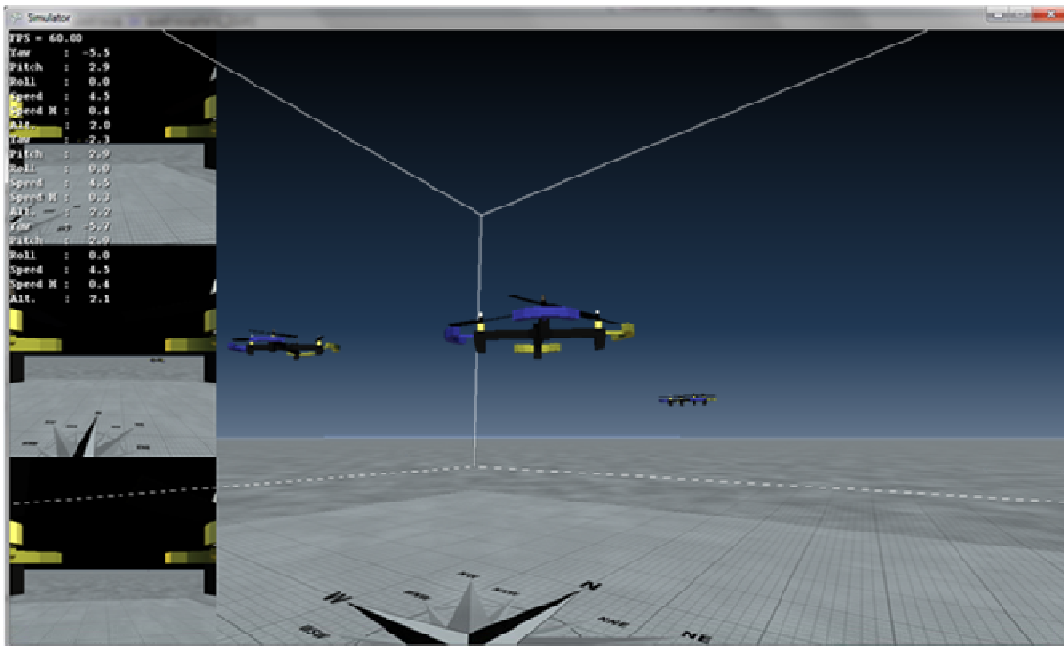
а)



б)



в)



В целом ИТС позволяет автоматизировать как проведение вычислительных экспериментов на основе ВП, так и сам процесс организации ВП в рамках концепции облачных вычислений.

Работа поддержана ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009—2013 гг.“, соглашение № 14.В37.21.0596 (технология ВП), контракт № 02.740.11.0837 (развитие ИТС).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Simulation Based Engineering Science. Revolutionizing Engineering Science through Simulation // Report of the National Science Foundation. Blue Ribbon Panel on Simulation-Based Engineering Science – May, 2006 [http://www.docstoc.com/docs/6820220/Revolutionizing-Engineering-Science-through-Simulation].
2. *Knyazkov K. V., Kovalchuk S. V., Tchurov T. N., Maryin S. V., Boukhanovsky A. V.* CLAVIRE: e-Science infrastructure for data-driven computing // *J. of Computational Sciences*. 2012. Vol. 3(6) P. 504—509.
3. *Бухановский А. В., Васильев В. Н.* Современные программные комплексы компьютерного моделирования e-Science // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2010. Т. 53, № 3 С 60—64.
4. *Князьков К. В., Ларченко А. В.* Предметно-ориентированные технологии разработки приложений в распределенных средах // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 54, № 10. С. 36—44.
5. *Князьков К. В.* Особенности работы с потоками задач длительного исполнения в рамках концепции iPSE // *Изв. вузов. Приборостроение*. 2011. Т. 54, № 10. С. 97—99.

**Сведения об авторах**

- Александр Сергеевич Загарских** — НИИ Научно-технологических компьютерных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; инженер; E-mail: alazar.az@gmail.com
- Алексей Алексеевич Безгодов** — НИИ Научно-технологических компьютерных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; младший научный сотрудник; E-mail: demiurghg@gmail.com
- Сергей Владимирович Иванов** — канд. техн. наук; НИИ Научно-технологических компьютерных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; старший научный сотрудник; E-mail: Sergey.v.ivanov@rambler.ru
- Александр Валерьевич Бухановский** — д-р техн. наук, профессор; НИИ Научно-технологических компьютерных технологий Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики; директор; E-mail: avb\_mail@mail.ru

Рекомендована НИИ НКТ

Поступила в редакцию  
10.09.12 г.

С. Э. ХОРУЖНИКОВ, Т. В. ЗУДИЛОВА, Н. А. ОСИПОВ, В. В. ПРЫГУН

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В УЧЕБНОМ ПРОЦЕССЕ

Рассматривается возможность внедрения облачных технологий в учебный процесс с целью повышения качества образовательных услуг.

**Ключевые слова:** виртуализация, облачные технологии, частное учебное вычислительное облако.

Методика преподавания ИТ-дисциплин предполагает использование вычислительной техники и различного программного обеспечения (ПО). Организовать учебный процесс на должном уровне в рамках традиционных лекционных и практических (лабораторных) занятий практически невозможно вследствие стремительного развития ИТ-сервисов.

Авторы настоящей работы предлагают решение, позволяющее внедрить облачные технологии для эффективной организации учебного процесса в сфере ИТ-дисциплин, таких как „Администрирование сетей Windows 2008/2012“ или „Виртуализация серверов“ и др.

На современном этапе развития технологий виртуализации все большее распространение получают средства облачных технологий [1]. Такой подход позволяет оперативно по требованию получать вычислительные ресурсы в моменты пиковых потребностей, а потом возвращать их, когда нагрузка снижается. При этом оплачиваются фактически потребленные ресурсы, и нет необходимости вкладывать значительные средства в собственную инфраструктуру, поскольку большую часть времени загрузка оборудования невысока [2].

Внедрение облачных технологий позволяет перейти от традиционного понятия „компьютерный класс“ к варианту, при котором в любой лекционной аудитории организуется современный эффективный учебный процесс с использованием мобильных компьютеров и беспроводной сети. Реализованная на основе облачных технологий образовательная платформа позволяет студентам применять последние компьютерные разработки во время лекционных занятий.

Решить проблему можно за счет одного или нескольких (с учетом обеспечения полной отказоустойчивости) центров обработки данных, размещенных на территории университета и предлагающих вычислительные ресурсы с возможностью потребления по необходимости, т.е. частное учебное вычислительное облако. Используя широкие возможности, имеющиеся в серверных платформах Microsoft Windows Server 2008/2012 с гипервизором Hyper-V, возможно абстрагироваться от аппаратной конфигурации и физического расположения рабочих станций и серверов. Продукты Microsoft System Center 2012 (Virtual Machine Manager, Operation Manager, Configuration Manager, Service Manager, Orchestrator) предоставляют мощный инструмент для управления, оптимизации и мониторинга ресурсов, полученное решение на основе частного учебного облака обеспечивает требуемую гибкость учебного процесса.

Таким образом обеспечивается возможность консолидировать высокопроизводительные вычислительные средства, объединить разные классы устройств хранения информации и предоставлять эти ресурсы по мере необходимости. Большую часть учебных и рабочих мест можно оснастить компьютерами не самой высокой производительности, даже тонким клиентом, так как они будут обеспечивать только связь с виртуальными машинами, работающими в частном облаке. Конечно, выделенные рабочие и исследовательские места следует оборудовать отдельными высокопроизводительными рабочими станциями и серверами, но большую часть общего учебного процесса можно перенести в облачную среду.

*Преимущества предлагаемой технологии:*

— обеспечение высокой масштабируемости, надежности, разделения ресурсов, гибкости подключаемых сервисов, безопасности использования существующих вычислительных мощностей, а также легкости администрирования и лицензионной чистоты;

— эффективное использование учебных площадей, так как нет необходимости выделять отдельные и специально оборудованные помещения под традиционные компьютерные классы, что приводит к сокращению затрат;

— качественно новый уровень получения современных знаний по специальности, так как студенты получают возможность находиться в процессе обучения в любое время и в любом месте, где есть выход в сеть Интернет;

— возможность быстро создавать, адаптировать и тиражировать образовательные сервисы в ходе учебного процесса;

— обеспечение для студентов обратной связи с преподавателем путем оценки и комментирования предлагаемых им образовательных сервисов;

— централизованное администрирование программных и информационных ресурсов, используемых в учебном процессе.

Предлагаемое авторами решение организации учебного процесса ИТ-дисциплин на основе построения частного учебного облака добавляет ряд инновационных методик по сравнению с традиционной моделью обучения и реализуется в рамках пилотного проекта „Разработка и создание сегмента корпоративной облачной инфраструктуры для формирования системы воспроизводства высококвалифицированных кадров“ в Центре Авторизованного обучения ИТ НИУ ИТМО.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федоров А. Г., Мартынов Д. Н. Windows Azure. Облачная платформа Microsoft [Электронный ресурс]: <[http://download.microsoft.com/documents/rus/msdn/Windows\\_Azure\\_web.pdf](http://download.microsoft.com/documents/rus/msdn/Windows_Azure_web.pdf)>.
2. Burke P. What cloud computing really means [Электронный ресурс]: <<http://cloudcomputing.systemcon.com/node/2254464>>.

*Сведения об авторах*

- Сергей Эдуардович Хоружников** — канд. физ.-мат. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра сервисов и услуг в инфокоммуникационных системах, заведующий кафедрой; декан факультета ИКС;  
E-mail: xse@vuztc.ru
- Татьяна Викторовна Зудилова** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра программных систем; заведующая кафедрой;  
E-mail: info@itcenter-ifmo.ru
- Никита Алексеевич Осипов** — канд. техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра программных систем; E-mail: info@itcenter-ifmo.ru
- Виктор Викторович Прыгун** — Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра программных систем; зав. лабораторией; E-mail: info@itcenter-ifmo.ru

Рекомендована кафедрой программных систем

Поступила в редакцию 12.07.12 г.

В. А. КАРБОВСКИЙ

## ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА АКТИВНОГО МОНИТОРИНГА РЕСУРСОВ ОБЛАЧНОЙ СРЕДЫ

Рассмотрены особенности применения интеллектуальных технологий предметно-ориентированного тестирования корректности выполнения пакетов, а также работоспособности ресурсов публичных сред облачных вычислений на основе платформы CLAVIRE.

*Ключевые слова:* предметно-ориентированное тестирование, система мониторинга, облачные вычисления.

Поддержка функционирования публичных сред облачных вычислений, предоставляющих доступ к прикладным сервисам на основе распределенной вычислительной среды, требует развития инструментария активного мониторинга ресурсов и пакетов. Такой инструментарий позволяет выявлять сбои в функционировании прикладных сервисов с целью их оперативного устранения, что увеличивает надежность среды и повышает качество предоставления услуг посредством облачных технологий.

Традиционно механизм активного мониторинга ассоциируется с периодическим опросом состояния вычислительных ресурсов и проверкой их работоспособности путем запуска тестовых заданий. Однако в том случае, когда среда облачных вычислений реализует модели SaaS (Software as a Service) и AaaS (Application as a Service), мониторинг должен включать в себя проверку прикладного программного обеспечения (ПО) ресурсов. Это позволяет определить, корректно ли развернуты и настроены вычислительные пакеты, обеспечиваются ли временные характеристики их функционирования. Формальный метод проверки работоспособности ПО путем запуска и регистрации ошибок исполнения имеет существенные ограничения, поскольку в ряде случаев пакет может завершить выполнение без ошибки, однако результат, по тем или иным причинам, будет некорректен. Потому для решения поставленной задачи следует применять предметно-ориентированное тестирование, т.е. направленное на предметное содержание объекта.

В рамках данного исследования применены интеллектуальные технологии [1], основанные на исходных знаниях предметных областей, отчуждаемых от экспертов — разработчиков или пользователей ПО — в форме заранее подготовленных тестовых сценариев. Сценарий включает в себя описание тестового примера, входные и соответствующие им выходные данные, а также параметры настройки пакета. Результатом работы сценария является выходной файл, который проверяется на соответствие эталону с учетом допустимой неопределенности (например, вызванной наличием стохастических эффектов в алгоритме или правил округления на различных архитектурах). Таким образом, каждый сценарий проверяется отдельно. Для решения этой задачи разработана система активного мониторинга в форме web-приложения. Система адаптирована для использования в составе многофункциональной инструментально-технологической платформы облачных вычислений CLAVIRE [2] и успешно прошла испытания. В процессе опытной эксплуатации системы на 20 % снизилось число отказов, связанных с некорректной настройкой прикладного ПО владельцами распределенных вычислительных ресурсов.

Работа выполнена в рамках проекта „Создание высокотехнологичного производства комплексных решений в области предметно-ориентированных облачных вычислений для нужд науки, промышленности, бизнеса и социальной сферы“ при реализации постановления



Правительства РФ № 218 „О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства“.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухановский А. В., Васильев В. Н. Современные программные комплексы компьютерного моделирования e-Science // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 3. С. 60—64.
2. Бухановский А. В. и др. CLAVIRE: перспективная технология облачных вычислений второго поколения // Там же. 2011. Т. 54, № 10. С. 7—13.

#### Сведения об авторе

**Владислав Александрович Карбовский** — аспирант; Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, кафедра высокопроизводительных вычислений; E-mail: dalamarik@gmail.com

Рекомендована кафедрой  
высокопроизводительных вычислений

Поступила в редакцию  
18.10.12 г.

УДК 519.8

М. Ю. ОХТИЛЕВ, В. А. ЗЕЛЕНЦОВ, С. А. ПОТРЯСАЕВ, Б. В. СОКОЛОВ

### КОНЦЕПЦИЯ ПРОАКТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ И ТЕХНОЛОГИИ ЕЕ РЕАЛИЗАЦИИ

Рассмотрены концепция проактивного управления сложными техническими объектами, а также технологии ее реализации, базирующиеся на разработанной авторами теории управления структурной динамикой указанных объектов.

**Ключевые слова:** проактивное управление и мониторинг, комплексное моделирование, сложный технический объект.

Главная особенность управления в кризисных ситуациях состоит в том, что оно происходит в условиях неполноты, неопределенности, неточности и противоречивости информации о складывающейся обстановке и при наличии неустранимого порогового ограничения времени на цикл формирования и реализации решений по предотвращению возможных катастроф, чрезвычайных и аварийных ситуаций. Это определяет принципиальное отличие технологий принятия решений в данных обстоятельствах от технологий управления при единичных отказах отдельных элементов и подсистем в сложных технических объектах (СТО), базирующихся на классических положениях теории надежности и отказоустойчивости. В условиях кризисных ситуаций снижение возможных негативных последствий природных и техногенных катастроф достигается только при использовании *проактивного управления*, которое в отличие от традиционно используемого на практике *реактивного*, ориентированного на оперативное реагирование и последующее недопущение инцидентов, предполагает предотвращение возникновения инцидентов за счет создания в соответствующих системах мониторинга и управления (СМУ) СТО принципиально новых прогнозирующих и упреждающих возможностей при формировании и реализации управляющих воздействий, базирующихся на концепции комплексного моделирования [1].

Предлагаемый авторами подход к решению перечисленных проблем базируется на разработанной ими *междисциплинарной методологии* создания и применения интеллектуаль-

ных технологий мониторинга, прогнозирования структурной динамики СТО, а также *проактивного управления* указанными инфраструктурами в реальном масштабе времени. Использование этой методологии позволяет осуществить переход от эвристических методов описания процессов мониторинга и управления в кризисных ситуациях к целенаправленному построению моделей и алгоритмов анализа состояний, адаптивных к возможным изменениям структуры критически важных объектов различного назначения. В основу предлагаемой авторами технологии проактивного управления СТО была положена разрабатываемая ими теория управления структурной динамикой (УСД) СТО.

В работах [1—3] показано, что задачи УСД по своему содержанию относятся к классу задач динамического адаптивного структурно-функционального синтеза облика СТО и формирования соответствующих программ управления их развитием (модернизацией). Главная трудность и особенность решения задач рассматриваемого класса состоит в следующем. Определение оптимальных программ и законов управления (планирования) основными элементами и подсистемами СТО в динамично изменяющейся обстановке может быть выполнено лишь после того, как станет известен перечень функций и алгоритмов обработки информации и управления, который должен быть реализован в указанных элементах и подсистемах. В свою очередь, распределение функций и алгоритмов по элементам и подсистемам СТО зависит от структуры и параметров законов управления данными элементами и подсистемами. Трудность разрешения данной противоречивой ситуации усугубляется еще и тем, что под действием различных причин (объективных, субъективных, внешних и внутренних) во времени изменяется состав и структура СТО на различных этапах ее жизненного цикла. Новизна разработанного авторами подхода состоит в следующем: базируясь на сформулированных концепциях управляемой структурной динамики, инвариантности состояний СТО, а также состояний распределенного асинхронного вычислительного процесса, их описывающих, осуществить переход от *эвристических* методов алгоритмизации этих процессов к *последовательности целенаправленных теоретически и методически обоснованных взаимосвязанных этапов* построения как *алгоритмов анализа многоструктурных макро- и микросостояний СТО, так и алгоритмов проактивного управления ими*. К настоящему времени разработана интеллектуальная информационная технология и соответствующее модельно-алгоритмическое, программное и информационное обеспечение, которые позволили на конструктивном уровне решить широкий спектр актуальных научно-технических задач, связанных с проактивным управлением СТО в таких предметных областях, как космонавтика, логистика, атомная энергетика [1].

Исследования по рассматриваемой тематике проводились при финансовой поддержке РФФИ (гранты 11-08-01016-а, 12-07-00302-а, 12-07-13119-офи-м-РЖД), Программы фундаментальных исследований ОНИТ РАН (проект №2.11. 2.12), проекта ESTLATRUS 2.1/ELRI - 184/2011/14 “Integrated Intelligent Platform for Monitoring the Cross-Border Natural-Technological Systems” (2012—2013 гг.).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга и управления структурной динамикой сложных технических объектов. М.: Наука, 2006. 410 с.
2. Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Концептуальные основы оценивания и анализа качества моделей и полимодельных комплексов // Теория и системы управления. 2004. № 6. С. 5—16.
3. Майданович О. В., Охтилев М. Ю., Куссиль Н. Н., Соколов Б. В., Цивирко Е. Г., Юсупов Р. М. Междисциплинарный подход к оцениванию и анализу эффективности информационных технологий и систем // Изв. вузов. Приборостроение. 2010. Т. 53, № 11. С. 7—16.

*Сведения об авторах*

- Михаил Юрьевич Охтилев** — д-р техн. наук, профессор; Специальное конструкторское бюро „Орион“, Санкт-Петербург; заместитель главного конструктора; E-mail: oxt@mail.ru
- Вячеслав Алексеевич Зеленцов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; ведущий научный сотрудник; E-mail: zvarambler@rambler.ru
- Семен Алексеевич Потрясаев** — канд. техн. наук; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; старший научный сотрудник; E-mail: spotryasaev@gmail.com
- Борис Владимирович Соколов** — д-р техн. наук, профессор; Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации Российской академии наук, лаборатория информационных технологий в системном анализе и моделировании; заместитель директора по научной работе; E-mail: sokol@ias.spb.su

Рекомендована СПИИРАН

Поступила в редакцию  
01.11.12 г.

## SUMMARY

P. 5—10.

### MATHEMATICAL MODELS OF “NATURE—TECHNOGENICS” CONTROL SYSTEMS

A system for control over pollution concentration in “natural—technogenic” environment is discussed. The developed mathematical models of the object under control consider it as a space-distributed system. The proposed models describe spatial distribution of the pollutant flow and may be used for improvement of the control system. Possible applications of the models include estimation of pollutant concentration and control over natural-anthropogenic system like a nuclear power plant.

**Keywords:** control systems, mathematical models, pollutant transfer.

#### *Data on authors*

- Remir I. Solnitsev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of System Analysis and Logistics; E-mail: remira70@mail.ru
- Gennady I. Korshunov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Innovation and Quality Control; E-mail: kgi@pantes.ru

P. 11—16.

### JUSTIFICATION OF SEQUENTIAL SIGNAL MODEL FOR COMMUNICATION SYSTEM

Models of sequential signal generated on the base of ultra-short pulses and used in communication systems are studied. The choice of parameters to provide the best possible distribution of spectral energy density is justified. A comparative analysis of the spectral properties of the synthesized signals and Manchester pulses is performed.

**Keywords:** communication system, sequential signal, spectral distribution.

#### *Data on authors*

- Sergey V. Dvornikov* — Dr. Techn. Sci.; State Scientific-Research Institute of Applied Problems, St. Petersburg; Senior Scientist; E-mail: practcdsv@yandex.ru
- Evgeny V. Kazakov* — State Scientific-Research Institute of Applied Problems, St. Petersburg; Head of the Laboratory; E-mail: kazakov@fstec-szfo.ru
- Andrey A. Ustinov* — Dr. Techn. Sci., Professor; State Scientific-Research Institute of Applied Problems, St. Petersburg; Leading Scientist; E-mail: ustinov.a@yandex.ru
- Alexander P. Chikhonadskikh* — Cand. Techn. Sci., Senior Scientist; State Scientific-Research Institute of Applied Problems, St. Petersburg; Head of the Center; E-mail: spchih@mail.ru

P. 16—20.

### ASSESSMENT OF INFORMATION WORK QUANTITY IN COMPUTER NETWORK

A method is proposed for evaluation of statistical moments and distribution law for information work quantity in computer network of several interconnected sites at fixed traffic capacities and arbitrary distribution law of a site operation time. The method is also applicable to network structures not involved in information processing.

**Keywords:** effective work, information network, distribution density function, traffic capacity, matrix method.

#### *Data on authors*

- Vladimir A. Smagin* — Dr. Techn. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Metrological Maintenance, St. Petersburg; E-mail: va\_smagin@mail.ru
- Ivan Yu. Paramonov* — Cand. Techn. Sci.; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department Prospects of Development of the Automated Control Systems and Communication, St. Petersburg; Head of the Department; E-mail: ivan\_paramonov@mail.ru

P. 21—25.

### COMPENSATING FOR SIGNAL DELAY IN DIGITAL SMOOTHING FILTERS

Suppression of narrowband noise with digital smoothing filters is shown to cause a significant signal delay. The possibility of compensating for the delay with the use of data-hold devices is analyzed. The influence of data-hold device on quantization noise levels is estimated.

**Keywords:** signal discretization, noise suppression, signal delay, extrapolation, quantization noise.

#### *Data on author*

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

P. 26—29.

### EVALUATION OF CROSSTALK IN ELECTRONIC UNIT

An approach to electromagnetic field modeling in electronic device based on classical radio engineering methods is presented. The proposed technique is intended for using in CAD systems when solving the problem of internal electromagnetic compatibility of electronic units. The approach makes it possible to reduce the volume of computation as compared with other techniques based on electromagnetic field evaluation.

**Keywords:** crosstalk, electromagnetic coupling, equivalent propagation constant.

#### *Data on author*

- Igor A. Konnikov* — Dr. Techn. Sci.; St. Petersburg; E-mail: konnikov\_i@mail.ru

## P. 30—32.

**APPLICATION OF OPTOELECTRONIC DEVICES FOR OBSERVATION OF DOMAIN STRUCTURES IN FERROMAGNETIC MATERIALS**

The possibility of the use of domain structures for determination of magnetic characteristics of ferromagnetic materials is demonstrated.

**Keywords:** spectral characteristics, infrared, led, domain structure, matrix, polaroid.

*Data on authors*

- Anatoly V. Zhang* — Cand. Phys.-Math. Sci.; L. V. Kirensky Institute of Physics RAS, Krasnoyarsk; E-mail: avchz@mail.ru
- Gennady S. Patrin* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Siberian Federal University, Department of General Physics, Krasnoyarsk; Head of the Department; E-mail: patrin@iph.krasn.ru
- Alexander G. Zadvorny* — Cand. Techn. Sci.; Siberian Federal University, Department of Technical Physics, Krasnoyarsk; E-mail: angara@inbox.ru
- Vitaly A. Seredkin* — Cand. Phys.-Math. Sci.; L. V. Kirensky Institute of Physics RAS, Krasnoyarsk; E-mail: sva@iph.krasn.ru

## P. 33—37.

**MEASUREMENT OF AVERAGE FREQUENCY OF SIGNAL IN ACOUSTO-OPTICAL SPECTROANALYZER WITH SPATIAL NON-INVARIANT RESPONSE**

A method is proposed for improvement of accuracy of average frequency measurement in acousto-optical spectroanalyzer with spatial non-invariant response based on calibration of the frequency response and frequency scale. The method is reported to ensure reduction of instrumental error of frequency measurement from 4,5 to 0,1 MGz.

**Keywords:** acousto-optical spectroanalyser, frequency measurement, radio monitoring.

*Data on author*

- Igor A. Klyuchikov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Kursk State Technical University, Department of Biomedical Engineering; E-mail: Igor\_Klyuchikov@mail.ru

## P. 38—42.

**AUTOCORRELATION FUNCTION OF SCATTERED RADIATION IN ATTENUATED TOTAL REFLECTION SCHEME FOR NANOPARTICLE SIZE MEASUREMENT**

The method of nanoparticles size measurement based on photon correlation analysis is considered. An attenuated total reflectance scheme is proposed for reduction of influence from convective flows on the measurement accuracy. Autocorrelation function of scattered light intensity is determined for the scheme, and the proposed approach is shown to afford a significant decrease in time required for particle size measurement and an improvement in accuracy of the method.

**Keywords:** autocorrelation function, photon-correlation spectroscopy, nanoparticles, dynamic light scattering, attenuated total reflectance.

*Data on authors*

- Ivan S. Doronin* — Post-Graduate Student; Far Eastern State Transport University, Department of Optical Communication, Khabarovsk; E-mail: ivonpr@mail.ru
- Konstantin N. Okishev* — Cand. Techn. Sci.; Far Eastern State Transport University, Department of Optical Communication, Khabarovsk; Head of the Department; E-mail: okishev2005@yandex.ru
- Yury M. Karpets* — Dr. Phys.-Math. Sci., Professor; Far Eastern State Transport University, Department of Optical Communication, Khabarovsk; E-mail: kjum@festu.khv.ru
- Natalia M. Kireeva* — Far Eastern State Transport University, Department of Physics, Khabarovsk; Lecturer; E-mail: ariya75@mail.ru

P. 43—45.

### THE USE OF TWO-FREQUENCY RADIATION TO IMPLEMENT THE PRINCIPLES OF HETERODYNE HOLOGRAPHIC INTERFEROMETRY WITH A SINGLE REFERENCE BEAM

Realization of heterodyne holographic interferometry with the use of two-frequency radiation is considered. This approach to displacement of the optical frequencies of restored interfering waves makes it possible to use a single reference beam to record the hologram. To implement the principle, waves with different optical frequencies and orthogonal polarizations in conjunction with the shift interferometry are applied. Basic mathematical relations for output signal parameters are derived. Time variant signal is generated and the signal phase containing information on the displacement vector is determined.

**Keywords:** holographic interferometry, interferometer, diffusely reflecting object.

#### *Data on authors*

- Evgeny E. Majorov* — Cand. Techn. Sci.; I. I. Mechnikov Northwestern State Medical University, Department of Medical Informatics and Physics, St. Petersburg; E-mail: majorov\_ee@mail.ru
- Viktor T. Prokopenko* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Solid-State Optoelectronics; E-mail: prokopenko@mail.ifmo.ru

P. 46—50.

### AUTOMATED SYSTEM FOR HYDROLOGICAL DATA GATHERING

An autonomous measuring complex for hydrological data gathering is designed for observation wells of ground water level monitoring system. The complex includes a data gathering unit, a precision well level meter, and deep-water measuring sensor.

**Keywords:** automated complex, monitoring, level meter, ultrasound, microprocessor, synchronization, measurement, sensor, observation well.

#### *Data on authors*

- Gennady A. Kalinov* — Post-Graduate Student; Pacific National University, Department of Physics, Khabarovsk; E-mail: riml@fizika.khstu.ru
- Alexander V. Lysakov* — Far Eastern Branch of FSUE VNIIFTRI, Khabarovsk; Leading Engineer; E-mail: polinom@poli.khv.ru
- Vladimir I. Rimlyand* — Dr. Techn. Sci.; Pacific State University, Department of Physics, Khabarovsk; Acting Head of the Department; E-mail: riml@fizika.khstu.ru

P. 50—55.

### UNMANNED AERIAL VEHICLE COMPUTER SYSTEM FOR WILDFIRE DETECTION BY IMAGE SUPERIMPOSING

Main problems in development of unmanned aerial vehicle computer system for wildfire detection based on superimposition of thermal and TV-images are considered. The choice of basic system components and architecture of special software is described and justified.

**Keywords:** integration of video, optical-electronic system, forest fire detection and monitoring system, TV-camera, thermal imager.

#### *Data on authors*

- Alexander S. Vasiliev* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: yoshikawa06@gmail.com

- Andrey V. Krasnyashchikh* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: crus@mail.ru
- Valery V. Korotaev* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Head of the Department; E-mail: korotaev@grv.ifmo.ru
- Oleg Yu. Lashmanov* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; E-mail: o.lashmanov@gmail.com
- Dmitry Yu. Lysenko* — Transas Group, St. Petersburg; E-mail: Dmitry.Lysenko@transas.com
- Oleg N. Nenarokomov* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Optical-Electronic Devices and Systems; Assistant; E-mail: 4307\_globl@mail.ru
- Anatoly S. Shirokov* — Transas Group, St. Petersburg; E-mail: Anatoliy.Shirokov@transas.com
- Sergey N. Yaryshev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; E-mail: ysn63@mail.ru

P. 56—59.

#### TRAINING OF AVIONICS SPECIALISTS AT TULA STATE UNIVERSITY

Problems of training of specialists in avionics are considered is analyzed using Tula State University as an example.

**Keywords:** avionics, training of specialists, aviation and space industry.

##### *Data on authors*

- Mikhail V. Gryazev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Tula State University; Chancellor
- Vladimir D. Kukhar* — Dr. Techn. Sci., Professor; Tula State University; Deputy Chancellor for Scientific Research and International Cooperation
- Vladimir Ya. Raspopov* — Dr. Techn. Sci., Professor; Tula State University, Department of Control Instruments; Head of the Department; E-mail: tgupu@yandex.ru

P. 60—62.

#### REJECTION ALGORITHM FOR UNKNOWN SINUSOIDAL DISTURBANCE IN NONLINEAR SYSTEM WITH INPUT DELAY

A new approach to the problem of rejection of a sinusoidal disturbance of unknown frequency, bias, amplitude, and phase for a nonlinear unstable system with a delay in the control channel is considered. The proposed solution is based on combination of the well-known predictor feedback method with an adaptive scheme which identifies the disturbance frequency.

**Keywords:** control in delay conditions, predictor, sinusoidal disturbance.

##### *Data on authors*

- Alexey A. Bobtsov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; Head of the Department; E-mail: bobtsov@mail.ifmo.ru
- Anton A. Pyrkin* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: a.pyrkin@gmail.com



P. 63—65.

### ROBUST CONTROL OF MOBILE ROBOTS WITH THE USE OF TECHNICAL VISION

Control of three-wheeled omnidirectional mobile robot using a control algorithm “serial compensator” is considered. The robot motion along an unknown trajectory feedback is provided by a technical vision system.

**Keywords:** mobile robot, technical vision, robust control.

#### *Data on authors*

- Maxim V. Faronov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Anton A. Pyrkin** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Igor B. Furtat** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: cainenash@mail.ru
- Sergey A. Kolubin** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Maxim O. Surov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: a.pyrkin@gmail.com
- Alexey A. Vedyakov** — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: a.pyrkin@gmail.com

P. 65—66.

### OBJECTS DESCRIPTION FOR OPTOELECTRONIC SYSTEMS OF COLOR ANALYSIS

The main features of the object color description for machine vision systems by a set of functions of hue, saturation and lightness are considered.

**Keywords:** color image, optoelectronic system, object color, machine vision system.

#### *Data on authors*

- Artyom A. Alyokhin** — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: temka-pk@mail.ru
- Elena V. Gorbunova** — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: vredina\_ia@mail.ru
- Alexander N. Chertov** — Cand. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: a.n.chertov@mail.ru
- Denis D. Shitov** — Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Control Systems and Informatics; E-mail: chock-design@yandex.ru

P. 67—69.

### INSTRUMENTAL TECHNOLOGICAL MEDIUM FOR ORGANIZATION OF VIRTUAL TESTING GROUND ON THE BASE OF CLOUD COMPUTING

Organization of virtual testing ground with the use of cloud computing technologies, modeling objects, and task flow for development of composite applications is considered. The problem of conjugation of virtual modeling object with actual model by motion capture system is discussed.

**Keywords:** cloud computing, virtual testing ground, modeling object, motion capture, task flow.

#### *Data on authors*

- Alexander S. Zagarskikh* — eScience Research Institute, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Engineer;  
E-mail: alazar.az@gmail.com
- Alexey A. Bezgodov* — eScience Research Institute, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Junior Researcher;  
E-mail: demiurgh@gmail.com
- Sergey V. Ivanov* — Cand. Techn. Sci.; eScience Research Institute, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Senior Researcher; E-mail: Sergey.v.ivanov@rambler.ru
- Alexander V. Boukhanovsky* — Dr. Techn. Sci., Professor; eScience Research Institute, St. Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics; Director;  
E-mail: avb\_mail@mail.ru

P. 70—71.

### CLOUD TECHNOLOGIES FOR TRAINING COURSES

Implementation of cloud technologies into training courses is considered as a mean to up-grade the education services.

**Keywords:** virtualization, modeling cloud technologies, private cloud.

#### *Data on authors*

- Sergey E. Khoruzhnikov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Services and the Services in Infocommunication Systems; Head of the Department, Dean of the Faculty of Infocommunication Technologies; E-mail: xse@vuztc.ru
- Tatiana V. Zudilova* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Software Development; Head of the Department; E-mail: info@itcenter-ifmo.ru
- Nikita A. Osipov* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Software Development;  
E-mail: info@itcenter-ifmo.ru
- Viktor V. Prygun* — St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of Software Development; Head of Laboratory;  
E-mail: info@itcenter-ifmo.ru

P. 72—73.

### INTELLIGENT ACTIVE MONITORING SYSTEM OF PACKAGES AND RESOURCES OF CLOUD COMPUTING ENVIRONMENT

Considered are the peculiarities of application of intellectual technologies of the object-oriented testing the correctness of the execution of the packages, as well as the efficiency of the resources of the public media cloud computing on the basis of a platform CLAVIRE.

**Keywords:** domain-specific testing, monitoring system, cloud computing.

#### *Data on author*

*Vladislav A. Karbovsky* — Post-Graduate Student; St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Department of High Performance Computing; E-mail: dalamarik@gmail.com

P. 73—75.

### COMPLEX TECHNICAL OBJECTS PROACTIVE CONTROL CONCEPTION AND ITS IMPLEMENTATION TECHNOLOGIES

Complex technical objects proactive control conception and its implementation technologies were proposed. The investigation was based on authoring structure dynamics control theory.

**Keywords:** proactive control and monitoring, integrated modeling and simulation, complex technical object.

#### *Data on authors*

*Mikhail Yu. Okhtilev* — Dr. Techn. Sci., Professor; Special Design Organization „Orion“, St. Petersburg; Deputy Chief Designer; E-mail: oxt@mail.ru

*Vyacheslav A. Zelentsov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Leading Researcher; E-mail: zvrambler@rambler.ru

*Semyon A. Potryasaev* — Cand. Techn. Sci.; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Senior Researcher; E-mail: spotryasaev@gmail.com

*Boris V. Sokolov* — Dr. Techn. Sci., Professor; St. Petersburg Institute for Informatics and Automation RAS, Laboratory of Information Technologies in System Analysis and Modeling; Deputy Director on Scientific Work; E-mail: sokol@iias.spb.su

# УКАЗАТЕЛЬ СТАТЕЙ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В 2012 Г.

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ</b>		
Андронов В. Г., Дегтярёв С. В., Лазарева Е. В.	Фотограмметрическая модель космических панорамных изображений	1
Балошин Ю. А., Мехреньгин М. В., Арсеньев А. В., Сорокин А. А.	Электродинамическая модель ВЧ-ближнепольного зондирования биологических объектов	7
Бахолдин В. С., Гаврилов Д. А., Шалдаев А. В.	Алгоритмы формирования радиолокационных изображений земной поверхности при использовании сигналов ГЛОНАСС	9
Бачевский А. С., Шаталова В. А.	Алгоритм оптимального обнаружения негауссовых узкополосных случайных сигналов	9
Бирюков Д. С., Ушаков А. В.	Контроль энергетических затрат на управление при воспроизведении полиномиальных экзогенных воздействий: грамианный подход	9
Гирина Н. В.	Оценка вероятности первого пересечения уровней гауссовыми марковскими последовательностями	1
Дворников С. В., Казаков Е. В., Устинов А. А., Чихонадских А. П.	Выбор модели секвентного сигнала для системы связи	12
Ломов П. А., Маслобоев А. В.	Технология формирования вариантов расширения поисковых запросов на основе общесистемного тезауруса	9
Миронов В. И., Миронов Ю. В., Юсупов Р. М.	Регуляризация вариационных оценок параметров состояния нелинейных динамических систем	1
Пиуновский Е. В., Тропченко А. А.	Анализ аудиоданных с помощью вейвлет-функций	3
Пономарев Д. Ю.	Тензорная методология в информационных коммуникациях	5
Рубина И. С., Тропченко А. Ю.	Исследование алгоритмов выбора опорных пикселей в задачах выделения сегментов кадра видеопоследовательности	1
Сольнищев Р. И., Коршунов Г. И.	Математические модели систем управления „природа—техногеника“	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Стародубцев В. Г.	Алгоритм формирования последовательностей Гордона — Миллса — Велча	7
Ушаков А. В., Яицкая Е. С.	Коммутация структуры пространства линейных устройств рекуррентного преобразования кодов	5
Хафизов Р. Г., Охотников С. А.	Распознавание непрерывных комплекснозначных контуров изображений	5

### ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Андреев Ю. С., Медунецкий В. В.	Исследование изменения микрорельефа поверхностей в процессе их трения скольжения	9
Безрядин М. М., Лозгачев Г. И.	Построение модального робастного регулятора при возмущающих и задающих воздействиях	7
Голубчиков М. А., Кузьмин Ю. П.	Образование регулярного микрорельефа на станке с числовым программным управлением	9
Калявин В. П., Нгуен Ч. В., Та Х. Т.	Использование метода чувствительности функции передачи для анализа диагностической модели гребной электрической установки	5
Красильников А. В.	Поворотный гидродинамический стенд и методика оценки его габаритных характеристик	5
Малышев В. В., Кабанов Д. С.	Алгоритм коррекции структуры управления автоматическим подводным аппаратом для построения области достижимости	7

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Аллес М. А., Соколов С. В., Ковалев С. М.	Оптические нечетко-логические устройства	1
Богатырев В. А., Голубев И. Ю., Беззубов В. Ф.	Организация межмашинного обмена в дублированных вычислительных комплексах	3
Демин А. В., Гатчина Ю. Ю., Жуков С. И.	Численное моделирование светолокационных систем	1
Никифоров В. В., Шкиртиль В. И.	Составное блокирование взаимосвязанных задач в системах на многоядерных процессорах	1

### ГИРОСКОПИЧЕСКИЕ И НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Лестев А. М., Ефимовская А. В.	О влиянии нелинейных факторов на динамику микромеханического гироскопа с двухмассовым чувствительным элементом	5
Мысливцев Т. О.	Оценка чувствительности алгоритма вторичной обработки навигационных измерений к возмущениям параметров модели наблюдения	5

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>ПРИБОРЫ ТОЧНОЙ МЕХАНИКИ</b>		
Виноградова А. А., Есбулатова А. Ж., Войнов К. Н.	Использование усовершенствованного прибора ночного видения для обнаружения ненаблюдаемых объектов	5
Красильников А. В.	Проектное обоснование конструктивно-технологических характеристик устройства торможения движущегося подводного аппарата	1
Майоров В. С.	Метод повышения надежности гидродинамических подшипников скольжения	1
Пирогов С. П., Чуба А. Ю.	Расчет частот собственных колебаний манометрических трубчатых пружин	1
Рябинин М. А.	Сравнительный анализ методов поверхностного упрочнения деталей киноаппаратуры	5
<b>ЭЛЕКТРОННЫЕ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА</b>		
Артюшенко В. М., Воловач В. И.	Анализ параметров спектра доплеровского сигнала, отраженного от протяженного объекта	9
Гулин А. И.	Проектирование многозвенных RC-генераторов	3
Гусаков В. М., Михайловский А. В., Шалдаев С. Е., Шкиль В. М.	Методика оптимизации параметров логопериодических и конических логоспиральных антенн для пассивных радиолокационных отражателей	9
Зиатдинов С. И.	Теорема отсчетов для комплексного и действительного сигналов	1
Зиатдинов С. И.	Компенсация задержки сигнала в цифровых сглаживающих фильтрах	12
Иванов В. В., Шакурский В. К., Шакурский М. В.	Синтез цифровых фильтров для генераторных преобразователей повышенной чувствительности	7
Конников И. А.	Расчет перекрестных помех в электронных модулях	12
Коршунов А. И.	Непрерывная модель трехфазного контура регулирования токов статора синхронного двигателя	9
Кузнецов В. Н., Гранкин А. С.	Разработка теплового сканера для исследования электромагнитного поля в волноводной линии передачи	1
Мысливцев Т. О., Гусаков В. М., Алешкин А. П.	Моделирование измерений навигационных параметров в коротковолновых радиолокационных системах пространственной волны	9
Никитин Ю. А.	Построение тракта приведения активного синтезатора частот	3
Стеблев Ю. И., Вашуркина Е. С.	Многоэлементные электроемкостные преобразователи для полнопоточной влагометрии нефтяных эмульсий	3

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Ткалич В. Л., Лабковская Р. Я., Пирожникова О. И.	Анализ присоединенных масс упругих чувствительных элементов ртутных герконов	7
Чжан А. В., Патрин Г. С., Задворный А. Г., Середкин В. А.	Применение оптоэлектронных устройств для наблюдения доменных структур в ферромагнитных материалах	12
Юрков К. В., Петров С. Е.	О двух подходах к параметрическому кодированию стереосигнала	1

### ОПТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Архипов Р. М., Архипов М. В., Егоров В. С., Чехонин И. А., Чехонин М. А., Багаев С. Н.	Эффективное возбуждение поляритонных мод оптического резонатора с резонансно-поглощающим веществом без инверсии населенностей	7
Баля В. К., Денисюк И. Ю.	Получение трехмерных оптических микроструктур с использованием лазерного гравера	3
Беломутская П. С., Данилова Т. М., Храмцовский И. А.	Определение оптических характеристик элементов лазерной техники методом внутрирезонаторных потерь излучения	1
Васильев А. С., Краснящих А. В., Кортаев В. В., Лашманов О. Ю., Лысенко Д. Ю., Ненарокомов О. Н., Широков А. С., Ярышев С. Н.	Разработка программно-аппаратного комплекса обнаружения лесных пожаров методом совмещения изображений	12
Гайворонский С. В., Зверев В. А.	Анализ коррекционных параметров оптической системы из трех отражающих поверхностей	3
Гончар И. В., Иванов А. С., Манухов В. В., Федорцов А. Б.	Автоматизированный быстродействующий лазерный интерферометр для контроля толщины прозрачных пленок	5
Демин А. В., Моисеева М. И.	Оценка коэффициента пропускания атмосферы на основе экспериментальных данных	5
Денисов А. В., Сидорова Н. П.	Высокочастотная асимптотика модуля коэффициента отражения электромагнитной волны от плоскостойкой среды	9
Доронин И. С., Окишев К. Н., Карпец Ю. М., Киреева Н. М.	Функция автокорреляции рассеянного излучения при измерении размера наночастиц по схеме нарушенного полного внутреннего отражения	12

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Зонов Р. Г., Стяпшин В. М., Михеев Г. М.	Гониометрическое устройство для исследования угловых зависимостей оптоэлектрического отклика в проводящих пленках	1
Иванова Л. А., Мелешко А. В., Пятков В. В., Ресовский В. А.	Метод автоматической компенсации вибраций в теневом приборе с использованием оптимального дискриминатора	7
Илларионов А. И., Иванов М. С.	Нелинейно-оптический метод измерения величины сферической аберрации германиевых линз в инфракрасной области спектра	1
Иночкин М. В., Назаров В. В., Сачков Д. Ю., Сидорова О. П., Хлопонин Л. В., Храмов В. Ю.	Особенности многочастотной генерации излучения эрбиевых лазеров	5
Калинов Г. А., Лысаков А. В., Римлянд В. И.	Автоматизированная система сбора гидрологической информации	12
Ключиков И. А.	Измерение средней частоты сигналов в акустооптических спектроанализаторах с пространственно-неинвариантной аппаратной функцией	12
Колесников А. И., Каплунов И. А., Молчанов В. Я., Ильяшенко С. Е., Гречишкин Р. М.	Перестраиваемый акустооптический фильтр на основе кристаллов парателлуриата	9
Кузьмин Б. П., Мальцева Н. К., Минин А. В.	Интерферометр-рефрактометр для измерения состава газовых и жидких проб	7
Майоров Е. Е., Машек А. Ч., Прокопенко В. Т., Чистякова Н. Я.	Исследование метрологических характеристик измерительной оптико-механической головки	7
Майоров Е. Е., Прокопенко В. Т.	Применение двухчастотного излучения для реализации принципов гетеродинной голографической интерферометрии с одним опорным пучком	12
Мараев А. А., Коняхин И. А., Тимофеев А. Н.	Исследование энергетической чувствительности в оптико-электронных системах с полихроматической оптической равносигнальной зоной	3
Мачихин А. С., Пожар В. Э.	Особенности передачи изображений при коллинеарной дифракции света на акустической волне	3



Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Правдивцев А. В.	Объектив для хроматической селекции спектральных компонентов изображения полихроматического кольцевого предмета	7
Романова Г. Э., Чечуров П. С.	Моделирование вторичной оптики для светодиодов на основе линз с эффектом полного внутреннего отражения	7
Сушков А. Л.	Алгоритм расчета зейделевых aberrаций для оптической среды с распределенным показателем преломления	5
Тарасов В. В., Якушников Ю. Г.	Тенденции совершенствования элементной базы инфракрасных систем 3-го поколения	5
Трофимов В. А., Нагибин Ю. Т., Шванова М. Л.	Бесконтактный пневмооптический метод измерения внутриглазного давления	3
Тымкул В. М., Шелковой Д. С.	Использование оптического трехспектрального пирометра при воздействии теплового излучения фона	9

### ТЕПЛОВЫЕ РЕЖИМЫ И НАДЕЖНОСТЬ ПРИБОРОВ И СИСТЕМ

Баёва Ю. В., Демин А. В., Ханков С. И., Жуков С. И.	Моделирование теплового режима и термоаббераций малогабаритного космического телескопа	7
Бирюлин Г. В., Егоров В. И., Муров С. Ю., Невский И. В.	Оптимизация конструкции системы охлаждения электронного модуля	3
Кузнецова О. А.	Оценка надежности структурно избыточных комплексов авионики с учетом среднего времени между восстановлениями при отказах	3
Лаповок Е. В., Ханков С. И.	Аналитическое описание нестационарных температур изотермического объекта в условиях его лучистого теплообмена с окружающей средой	3
Полетаев Б. И., Атамасов В. Д., Белянкин А. В., Михайлов Д. Ю., Полуян М. М., Левандович А. В.	Исследования тепловых режимов радиационных излучателей космических аппаратов при воздействии метеорных потоков	9
Поляков А. В.	Волоконно-оптическая система скважинной термометрии рециркуляционного типа	9

### ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

Гагарский С. В., Ермолаев В. С., Сергеев А. Н., Пузык М. В.	Исследование лучевой прочности диэлектрических покрытий, нанесенных на оптическую поверхность	7
--	---	---

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Итин А. Л., Лукин С. Б., Успенская М. В., Соловьев В. С.	Исследование оптических свойств акрилового гидрогеля для систем индикации загрязнений	7
Яблочников Е. И., Брагинский В. А., Восоркин А. С.	Применение систем виртуального моделирования при выборе и проектировании полимерных композиционных материалов	7
<b>ИСТОРИЯ ОПТИКИ</b>		
Томилин М. Г.	Глаз и линза через призму тысячелетий	3
<b>НОВЫЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ</b>		
Грязев М. В., Кухарь В. Д., Распопов В. Я.	Подготовка специалистов по авионике в Тульском государственном университете	12
<b>КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ</b>		
Алехин А. А., Горбунова Е. В., Чертов А. Н., Шитов Д. Д.	Об описании объектов анализа для оптико-электронных систем цветовой идентификации	12
Бобцов А. А., Пыркин А. А.	Алгоритм компенсации неизвестного синусоидального возмущения для нелинейной системы с запаздыванием в управлении	12
Загарских А. С., Безгодов А. А., Иванов С. В., Бухановский А. В.	Инструментальная технологическая среда для организации виртуальных полигонов на основе облачных вычислений	12
Карбовский В. А.	Интеллектуальная система активного мониторинга ресурсов облачной среды	12
Охтилев М. Ю., Зеленцов В. А., Потрясаев С. А., Соколов Б. В.	Концепция проактивного управления сложными техническими объектами и технологии ее реализации	12
Романов А. Н., Хаула Е. В., Фаттахова З. Т., Вебер А. А., Корчак В. Н., Цветков В. Б., Сулимов В. Б.	Лазерная активная среда на основе фторидного стекла ZBLAN, легированного висмутом	7
Ушаков А. В., Яицкая Е. С.	Модификация матриц систематических помехозащищенных кодов в задаче обеспечения скрытности передачи информации	3

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Фаронов М. В., Пыркин А. А., Фуртат И. Б., Колюбин С. А., Суров М. О., Ведяков А. А.	Робастное управление мобильными роботами с использованием технического зрения	12
Хоружников С. Э., Зудилова Т. В., Осипов Н. А., Прыгун В. В.	Использование облачных технологий в учебном процессе	12

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Акульшин Г. Ю., Бобырь М. В., Ширабакина Т. А.	Система фиксации деталей на основе электрореологического эффекта	2
Бехтин Ю. С., Титов Д. В.	Компрессия зашумленных изображений адаптивным вейвлет-кодеком	2
Головенков Е. В., Дегтярев С. В.	Метод распознавания показаний стрелочных индикаторов	2
Емельянов С. Г., Труфанов М. И., Титов Д. В.	Быстродействующая система технического зрения для поиска и определения характеристик очага возгорания	2
Жизняков А. Л., Привезенцев Д. Г.	Распределение самоподобия на цифровом изображении	2
Захаров А. А.	Автоматический синтез протяженных трехмерных сцен с использованием системы компьютерного зрения	2
Иванов В. И., Титов В. С., Голубов Д. А.	Преобразование параметров многоэлементных двухполюсников с уравниванием токов	2
Леньшин А. В., Перова А. В.	Инструментальная среда проектирования экспертных систем	2
Муха Ю. П., Литовкин Р. В., Угаров К. К.	Построение сложного фильтра для измерительного комплекса на базе процессора TMS320DSK6455	2
Николаев В. Н.	Принципы построения инновационной геоинформационной системы научно-промышленного предприятия	2
Орлов А. А.	Методы выделения и вычисления признаков структур на снимках промышленных изделий	2
Панищев В. С., Славкова О. Б.	Схема управления шаговым двигателем для автоматизированной системы нанесения этикетки на подвижный объект	2

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Садыков С. С., Белякова А. С., Евстигнеева О. И., Жолобов С. А.	Исследование корреляции окраски участков портрета сердца с параметрами электрокардиограммы	2
Садыков С. С., Савичева С. В.	Исследование наложенности плоских объектов в поле зрения системы технического зрения	2
Садыков С. С., Савичева С. В.	Предварительная обработка изображений плоских объектов в системах технического зрения	2
Сырямкин В. И., Бородин В. А., Осипов А. В., Васильев А. В., Глушков Г. С.	Анализ изображений, формируемых рентгеновскими микротомографами	2
Сырямкин В. И., Жданов Д. С., Буреев А. Ш., Осипов А. В., Осипова А. Ю.	Интеллектуальная телемедицинская система	2
Сырямкин В. И., Шидловский В. С., Глушков Г. С., Лунев С. О., Бурмантов С. И.	Интегрированные структурно-перестраиваемые корреляционно-экстремальные навигационные системы	2

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ОПТИКО-ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Абакшина О. А., Егоров Г. В., Латыев С. М., Митрофанов С. С.	Фотоэлектрические приборы и устройства, основанные на позиционно-чувствительных приемниках	4
Алеев А. М., Горбачёв А. А., Кортаев В. В.	Исследование схем построения базового блока оптико-электронного прогибомера	4
Алехин А. А., Горбунова Е. В., Кортаев В. В., Чертов А. Н.	Основные принципы настройки цветowych оптико-электронных систем технического зрения промышленного назначения	4
Бахолдин А. В., Коршикова Н. Ф., Черкасова Д. Н.	Компьютерное моделирование оптической системы глаза индивидуума	4
Бахолдин А. В., Цуканова Г. И.	Исследование систем несветосильных ортоскопических зеркальных объективов	4
Бударгина М. И.	Исследование характеристик солнцезащитных очковых линз и их влияние на остроту зрения	4

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Васильев А. С., Коротаев В. В., Краснящих А. В., Лашманов О. Ю., Ненарокомов О. Н.	Совмещение тепловизионного и телевизионного изображений при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений	4
Вознесенская А. О.	Амплитудный волоконно-оптический преобразователь отражательного типа для датчика давления	4
Губанова Л. А., Зверев В. А.	Создание интерференционных покрытий с улучшенными механическими свойствами на основе смесовых пленок	4
Ежова К. В., Ошурок Е. В.	Трехмерное моделирование поверхностей	4
Зленко А. Н., Колпаков А. К., Толстоба Н. Д., Злобина М. А.	Применение матрицы оптимизации решений для автоматизированного конструирования оптических приборов	4
Ишанин Г. Г., Челибанов В. П.	Физические основы работы фотодиодов в фотогальваническом и фотодиодном режимах	4
Макаричев Г. В.	Влияние толщины слоев, формирующих диэлектрическое зеркало, на его лучевую прочность	4
Мараев А. А., Тимофеев А. Н., Ярышев С. Н.	Исследование метода спектральной селекции при перекрестных связях в каналах цветных видеокамер	4
Назаров В. Н., Соколов Ю. А.	Дифракционный метод контроля угловых и линейных перемещений	4
Никандров Г. В., Путилин Э. С.	Фазокомпенсирующие покрытия для асферической оптики	4
Серикова М. Г., Лебедько Е. Г.	Решение задачи Райса при обнаружении сигналов в оптической локализации	4
Смирнов А. П., Латыев С. М., Марков Д. В., Чугунов С. А.	Сравнительный анализ допусков на первичные погрешности микрообъективов по методу Монте-Карло	4
Фисенко М. Г., Ежова К. В., Молев Ф. В.	Моделирование зарегистрированного многоэлементными оптическими приемниками изображения	4

**ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК****ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ НАДЕЖНОСТИ И ТОЧНОСТИ МАШИН И ПРИБОРОВ**

Амвросьева А. В.	Расчет коэффициентов интенсивности напряжений для пьезоэлектрических пластин	6
------------------	--	---

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Астафьев С. А., Лысенко Д. Ю., Широков А. С.	Моделирование процесса распространения лесного пожара с применением теории перколяции	6
Биндюк В. В.	Оптоэлектронный преобразователь положения сечения упругого элемента на подвижном интерфейсе	6
Воронцов Е. А.	К вопросу об аттестации поверителей оптико-электронных средств измерений	6
Гедько П. Ю., Смирнов А. Б., Пугачев С. И., Рытов Е. Ю.	Исследование пьезоэлектрических актюаторов микроробота	6
Ефремов Л. В.	Оценка метрологической надежности приборов по результатам групповых испытаний	6
Калапышина И. И.	Моделирование динамики станка для обработки стекол	6
Кузнецов А. О., Мусалимов В. М., Саенко А. П., Трамбицкий К. В.	Применение алгоритмов анализа изображений для обнаружения пожаров	6
Мусалимов В. М., Заморуев Г. Б., Перечесова А. Д.	Расчет физико-механических характеристик винтовых элементов спирально-анизотропных стержней	6
Мусалимов В. М., Коваленко П. П., Перепелкина С. Ю.	Перечислительная классификация сигналов сканирующей зондовой микроскопии	6
Ноздрин М. А., Красковский А. А., Монахов Ю. С.	Системные проблемы создания устройств для сканирования подземных камер	6
Резников С. С.	Метрологические аспекты имитационного моделирования процесса нарезания зубчатых колес	6
Ротц Ю. А.	Методика оценки динамической остроты зрения	6
Сычев С. В., Фадин Ю. А.	Формирование рельефа поверхности при трении	6
Тимофеев Б. П., Абрамчук М. В.	Проблемы совместимости новых российских стандартов с нормами ISO	6

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В СЕТЯХ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Александров А. В.	Устойчивость SMT-протокола к атакам противника в модели безопасности Долева—Яо	8
-------------------	--	---

Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Белоусов М. В., Александров А. В.	Особенности реализации SMT-протокола на базе языка Python 3	8
Горячев А. В., Монахов М. Ю.	Исследование качества беспроводных каналов связи распределенной телекоммуникационной среды передачи данных в плотной городской застройке	8
Груздева Л. М., Абрамов К. Г., Монахов Ю. М.	Экспериментальное исследование корпоративной сети передачи данных с адаптивной системой защиты информации	8
Груздева Л. М., Монахов М. Ю.	Повышение производительности корпоративной сети в условиях воздействия угроз информационной безопасности	8
Кисляков М. А., Мосин С. Г., Савенкова В. В.	Проектирование беспроводных сенсорных сетей	8
Крутин Д. В., Кисляков М. А., Мосин С. Г.	Методы оценки качества канала связи. Технология WCDMA	8
Меркутов А. С., Крутин Д. В., Цислав А. Н., Плетнев А. А.	Исследование возможности создания цифровой радиостанции на основе когерентного приема GMSK-сигналов	8
Мишин Д. В., Монахов М. Ю.	Об автоматизации процессов обеспечения функциональной устойчивости информационно-технологической инфраструктуры интегрированной АСУП	8
Мишин Д. В., Монахова М. М., Петров А. А.	Система администрирования корпоративной сети передачи данных АСУП	8
Монахов Ю. М.	Распределенный механизм управления перегрузками в сети передачи данных	8
Монахов М. Ю., Файман О. И.	Инвентаризация информационных ресурсов как основа безопасного функционирования АСУ	8
Мосин С. Г.	Методика тестопригодного проектирования аналого-цифровых схем	8
Полянский Д. А., Монахов М. Ю.	Модель оценки факторов изменения достоверности информации в корпоративной сети передачи данных	8
Полянский Д. А., Файман О. И., Кириллова С. Ю.	Инструментальный комплекс контроля достоверности информации в корпоративной сети передачи данных АСУ	8
Тельный А. В., Никитин О. Р., Храпов И. В.	Об организации информационной распределенной среды интегрированных систем охраны и безопасности	8

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
--------------------------	-----------------	---------------

### ТЕМАТИЧЕСКИЙ ВЫПУСК

#### ПЕРСПЕКТИВНЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И СИСТЕМЫ

Ануфриева Н. Ю., Мещеряков Р. В., Шевцова Г. А.	Оценивание результативности работы центра информационного обслуживания	11
Десницкий В. А., Котенко И. В.	Модель конфигурирования защищенных и энергоэффективных встроенных систем	11
Иванов В. О.	Оптико-электронное устройство автоматической посадки автономного летающего робота	11
Карпов А. А., Кипяткова И. С.	Методология оценивания работы систем автоматического распознавания речи	11
Кокорин С. В., Потрясаев С. А., Соколов Б. В.	Комбинированный метод планирования операций и распределения ресурсов системы управления активными подвижными объектами	11
Комашинский Д. В., Котенко И. В.	Метод извлечения структурных признаков вредоносного программного обеспечения в задаче его обнаружения	11
Костин А. А., Костина А. А., Латышев Д. М., Молдовян А. А.	Программные комплексы серии „Аура“ для защиты информационных систем персональных данных	11
Латухина Е. А.	Информационная система хранения и обработки гастроэнтерографических данных	11
Майданович О. В.	Динамическая интерпретация процессов управления жизненным циклом сложных объектов	11
Павлов А. Н.	Методологические основы решения проблемы планирования структурно-функциональной реконфигурации сложных объектов	11
Прищепа М. В., Баранов К. Ю.	Особенности разработки пользовательского интерфейса мобильного информационного робота	11
Ронжин А. Л., Будков В. Ю.	Анализ современных методов и систем диаризации дикторов	11
Титов В. В.	Алгоритм управления податливым движением манипулятора с упругими элементами в шарнирных сочленениях	11



Продолжение

Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
<b>СПЕЦИАЛЬНЫЙ ВЫПУСК</b>		
<b>К 75-ЛЕТИЮ КАФЕДРЫ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ НИУ ИТМО</b>		
Алиев Т. И.	Задачи синтеза систем с потерями	10
Алиев Т. И., Соснин В. В., Шинкарук Д. Н., Тихонов М. Ю., Бурмакин Н. Г.	САПР маршрутизируемой компьютерной сети на основе компонентов с открытыми исходными кодами	10
Бессмертный И. А.	Управление контекстом в информационных системах	10
Богатырев В. А., Богатырев С. В., Богатырев А. В.	Функциональная надежность вычислительных систем с перераспределением запросов	10
Болгаров И. С., Маковецкая Н. А., Платунов А. Е., Постников Н. П.	Проектирование приборных контроллеров	10
Косяков М. С., Шинкарук Д. Н., Торопов А. В., Шполянский Ю. А.	Применение технологии CUDA для ускорения расчета цен опционов европейского типа сеточным методом	10
Муравьева-Витковская Л. А.	Обеспечение качества обслуживания в мультисервисных компьютерных сетях за счет приоритетного управления	10
Николаенков А. В.	Аспектные технологии в системах с преобладающей программной компонентой	10
Ожиганов А. А.	Композиционные кодовые шкалы для преобразователей линейных перемещений	10
Ожиганов А. А., Захаров И. Д.	Система автоматизированного проектирования псевдорегулярных кодовых шкал	10
Поляков В. И., Скорубский В. И.	Преобразование моделей алгоритмов	10
Рубина И. С., Тропченко А. Ю.	Исследование алгоритмов кодирования преобразованием в рамках задач сжатия опорных и остаточных кадров видеопоследовательности	10
Тропченко А. А., Тропченко А. Ю.	Нейросетевые методы идентификации человека по изображению лица	10
Чураев С. О.	Метод реверсивной случайной выборки для измерения с пикосекундным разрешением времени задержки в элементах интегральных схем	10
Шинкарук Д. Н., Шполянский Ю. А., Косяков М. С.	Анализ эффективности применения технологии CUDA для решения систем линейных уравнений с трехдиагональными матрицами в задачах расчета цен опционов	10

<i>Продолжение</i>		
Фамилия, инициалы автора	Название статьи	Номер журнала
Щеглов К. А., Щеглов А. Ю.	Модель контроля доступа к создаваемым файловым объектам	10
<b>ИНФОРМАЦИЯ</b>		
—	Геннадий Николаевич Дульнев. К 85-летию со дня рождения	5
Шехонин А.А., Гвоздев С.С., Попова Е.В.	Сообщение о конкурсе выпускных квалификационных работ специалистов, бакалавров, магистров „Приборостроение. Опотехника. Фотоника и Оптоинформатика. Лазерная техника и лазерные технологии“ 2011 г.	3