
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор М.П. Батура

Редакционная коллегия:

А.П. Кузнецов (зам. главного редактора),
Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),

Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,
А.А. Кураев, В.А. Лабунев, В.В. Муравьев, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднар, С.В. Бордусов,
С.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов,
В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев,
Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков, Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, А.А. Петровский,
В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, В.А. Сокол, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль, В.В. Цегельник,
В.А. Чердынцев, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, к. 326
293-88-41

doklady@bsuir.by

www.doklady.bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Кураев А.А., Попкова Т.Л., Рак А.О. Возбуждение произвольно-нерегулярного волновода с неоднородным заполнением анизотропным диэлектриком	5
Чиркова А.Ю., Бахтизин В.В. Метод повышения качества спецификации требований к программному средству	10
Поляковский В.В., Бегун Д.Г., Дайняк И.В. Алгоритмизация бесколлизийных перемещений планарных позиционеров универсального сборочного модуля	17
Храменков А.С., Ярмолик С.Н. Выбор системы базисных функций для аппроксимации многомерных распределений решающей статистики байесовских радиолокационных классификаторов	23
Юрцев О.А., Бобков Ю.Ю., Кеда В.В. Новая модификация рамочной антенны	30
Котухов А.В., Красовский А.В., Шаплыко В.В., Дежнунов Н.В. Исследование зависимости активности акустической кавитации от температуры жидкости	36
Сидоренко А.В., Мулярчик К.С. Шифрование данных с использованием хаотической динамики в сенсорной сети	41

Альмияхи О.М., Цветков В.Ю., Макейчик Е.Г. Сегментация и компактное многомасштабное представление изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации.....	48
Власенко В.А., Прищепа С.Л. Разработка программы безопасности коммерческого предприятия	55
Руденко М.В., Гапоненко Н.В., Литвинов В.Г., Мухин Н.В., Хорошко Л.С., Ермачихин А.В., Алтынников А.Г. Формирование золь-гель методом и свойства тонких пленок танталата стронция висмута	61
Богуш Р.П., Тычко Д.А. Алгоритм комплексного обнаружения дыма и пламени на основе анализа данных систем видеонаблюдения	65
Хаджинов М.К., Шевелева В.А. Оценка и компенсация апостериорного математического ожидания случайных возмущений в системе модального управления в приложении к установкам мостовых кранов	72
Барановский О.К., Зеневич А.О., Тимофеев А.М., Горбадей О.Ю. Оценка коэффициента шума лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов	78
Пилиневич Л.П. Исследование процесса разделения твердых частиц по размерам, форме и массе под воздействием вибрации	84
Долбик А.В., Зубов А.Ю., Крисевич С.Н., Сычевич А.С., Короткевич А.В., Лазарук С.К., Лабунов В.А. Увеличение механического импульса в микроэлектромеханических системах, использующих энергию горения нанопористого кремния	90
Меламед А.Д., Черномзав И.З., Пека Г.С. Опыт и проблемы разработки и внедрения АСУТП ПГУ на электростанциях России и Белоруссии	94
КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ	
Левченко В.И., Постнова Л.И., Труханова Е.Л., Бондаренко В.П. Эпитаксиальные пленки селенида цинка на пористом кремнии	100
Штагалова В.В. Исследование монокристаллов тройного соединения $CuIn_7S_{11}$	103

Учредитель: учреждение образования
"Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

Редактор Т. В. МИРОНЕНКО
Компьютерный дизайн и верстка О. В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 30.09.2015. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 12,79. Уч.-изд. л. 11,5. Тираж 100 экз. Заказ 393.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2015

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief M.P. Batura

ADDRESS OF EDITORIAL OFFICE

220013, Minsk, P. Brovka Str., 6, Room 326

293-88-41

doklady@bsuir.by

www.doklady.bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Kurayev A.A., Popkova T.L., Rak A.O. Excitation of arbitrary irregular waveguide with an inhomogeneous anisotropic dielectric filling	5
Chirkova A.U., Bakhtizin V.V. Quality improving graph model and method for software requirements specification.....	10
Poliakovski V.V., Begun D.G., Dainiak I.V. Algorithmization of non-collision motions of planar positioners of universal assembly unit	17
Khramiankou A.S., Yarmolik S.N. Orthogonal polynoms choice for representation of a solving statistics multidimensional distribution of Bayesian radar recognition devices	23
Yurtsev O.A., Bobkov Y.Y., Keda V.V. New design modificatin of loop aerial.....	30
Kotukhov A.V., Krasovskiy A.V., Shaplyka V.V., Dezhkunov N.V. Study into dependence of cavitation activity on liquid temperature	36
Sidorenko A.V., Mulyarchik K.S. Data encryption using the chaotic dynamics in wireless sensor networks	41
Almiahi O.M., Tsviatkou V.Yu., Makeichik E.G. Segmentation and compact multiscale representation of the images based on progressive backward clustering	48
Ulasenka U.A., Prischepa S.L. Development of commercial enterprise security program.....	55
Rudenko M.V., Gaponenko N.V., Litvinov V.G., Mukhin N.V., Khoroshko L.S., Ermachikhin A.V., Altynnikov A.G. Sol-gel formation and properties of strontium bismuth tantalate thin films	61
Bohush R.P., Tychko D.A. Algorithm for complex smoke and flame detection based on video surveillance systems data analysis	65
Khajynau M.K., Sheveleva V.A. Estimation and compensation of posteriori mathematical expectation of random perturbations in modal control system in application of bridge cranes.....	72

Baranouski A.K., Zenevich A.O., Timofeev A.M., Gorbadey O.Y. Evaluation of avalanche photodetectors noise factor operating in photon counting mode.....	78
Pilinevich L.P. Researching the process of separation of solid particle by size, shape and mass due to vibration	84
Dolbik A.V., Zubov A.Yu., Krisevich S.N., Sychevich A.S., Korotkevich A.V., Lazarouk S.K., Labunov V.A. Mechanical impulse enhancement in MEMS using porous silicon combustion process...	90
Melamed A.D., Chernomzav I.Z., Peka G.S. Experience and problems in the development and implementation I&C of CCPP at power plants of Russia and Belarus.....	94
SHORT NOTES	
Levchenko V.I., Postnova L.I., Trukhanava E.L., Bondarenko V.P. Epitaxial films of zinc selenide on porous silicon	100
Shatalova V.V. Investigations of single crystals of the ternary compound $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$	103

УДК 621.385

ВОЗБУЖДЕНИЕ ПРОИЗВОЛЬНО-НЕРЕГУЛЯРНОГО ВОЛНОВОДА С НЕОДНОРОДНЫМ ЗАПОЛНЕНИЕМ АНИЗОТРОПНЫМ ДИЭЛЕКТРИКОМ

А.А. КУРАЕВ, Т.Л. ПОПКОВА, А.О. РАК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 23 марта 2015

Сформулированы в общей форме уравнения возбуждения произвольно-нерегулярного волновода с неоднородным заполнением анизотропным диэлектриком.

Ключевые слова: произвольно-нерегулярный волновод, резонатор, анизотропный диэлектрик, уравнения возбуждения.

Введение

Теория возбуждения нерегулярных волноводов электронными потоками (в общем случае непрямолинейными) является основой моделирования и оптимизации широкого класса мощных электронных приборов сверхвысоких и крайне высоких частот (СВЧ и КВЧ) – релятивистских ламп бегущей и обратной волны (ЛБВ и ЛОВ), гирорезонансных приборов, убитронов и гиротонов. К настоящему времени общие основы трехмерной теории возбуждения продольно-нерегулярных волноводов разработаны [1–7], однако необходимо их развитие в двух направлениях:

а) необходимо учесть возможность частичного заполнения волновода неоднородным анизотропным диэлектриком;

б) в уравнениях возбуждения необходимо учесть конечную проводимость стенок, что особенно важно в КВЧ-диапазоне. Обе задачи решаются в представленной работе.

Общая постановка и схема решения задачи возбуждения нерегулярного волновода

Рассмотрим задачу возбуждения неоднородно заполненного анизотропным диэлектриком с тензором диэлектрической восприимчивости $\hat{\epsilon}(\vec{r})$ нерегулярного волновода, боковая поверхность которого S_b отличается от регулярной цилиндрической поверхности. Эта задача сводится к решению системы уравнений Максвелла

$$\left. \begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} (\hat{\epsilon} \vec{E}) + \mathbf{J}; \\ \operatorname{rot} \mathbf{E} &= -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

с граничными условиями [7]:

$$[\mathbf{n}, \mathbf{E}]_{S_b} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\pi \sigma}} \int_0^t \frac{\partial [\mathbf{n}, [\mathbf{H}, \mathbf{n}]]_{S_b}}{\partial \tau} \frac{d\tau}{\sqrt{t-\tau}}, \quad (2)$$

где σ – удельная проводимость стенок волновода, μ_0 – ее магнитная проницаемость, $\tau \in [0, t]$ – аргумент интеграла,

и условиями излучения в начальном и конечном сечениях волновода.

Плотность электрического тока J определяется электронным потоком в приборе. Теория возбуждения нерегулярного волновода строится на основе метода преобразования координат. Для решения задачи введем криволинейную систему координат (r, φ, s) , связанную с геометрией волновода (r, φ – полярные координаты в плоскости поперечного сечения волновода, s – длина дуги оси волновода). Схема нерегулярного волновода приведена на рис. 1.

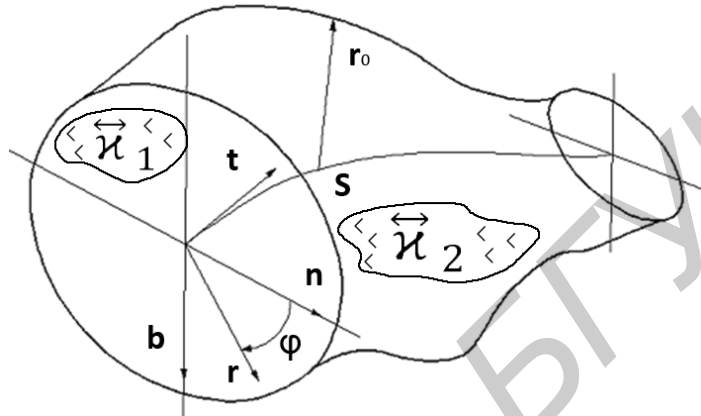


Рис. 1. Геометрия нерегулярного волновода

Здесь $\mathbf{t} = \mathbf{r}' / |\mathbf{r}'|$ – единичный вектор касательной к оси волновода, $(\mathbf{x}' = dx/ds)$; $\mathbf{n} = \mathbf{r}'' / |\mathbf{r}''| = \frac{1}{k} \mathbf{r}''$ – единичная нормаль к поверхности; $\mathbf{b} = \mathbf{t} \times \mathbf{n}$ – бинормаль к оси волновода. Эти три величины связаны с помощью формул Френе – Серре: $\mathbf{t}' = k\mathbf{n}$; $\mathbf{n}' = -k\mathbf{t} + \tau\mathbf{b}$; $\mathbf{b}' = -\tau\mathbf{n}$, где $k = 1/\rho_k = |\mathbf{r}''|$ – угловая скорость вращения касательной вокруг бинормали; ρ_k – радиус кривизны; $\tau = 1/\rho_\tau = \frac{1}{k} \mathbf{r}' \mathbf{r}'' \mathbf{r}'''$ – угловая скорость вращения бинормали вокруг касательной; ρ_τ – радиус кручения.

Уравнения возбуждения нерегулярного волновода

Для решения задачи как и в работах [1–7] введем неортогональную систему координат (ρ, φ, z) . Декартовы прямоугольные координаты произвольной точки (x, y, z) внутри волновода связаны с введенными координатами (ρ, φ, s) соотношением

$$\mathbf{r}(\rho, \varphi, s) = \mathbf{R}(s) + \rho \eta_b(\varphi, s) \{ \mathbf{n}(s) \cos(\varphi) + \mathbf{b}(s) \sin(\varphi) \}, \quad (3)$$

где \mathbf{r} – радиус-вектор произвольной точки внутри волновода; $\mathbf{R}(s)$ – уравнение оси волновода в декартовой системе координат; $\mathbf{n}(s)$ и $\mathbf{b}(s)$ – единичные векторы главной нормали и бинормали оси волновода, определенные как функции ее длины:

$$\rho = r / \eta_b(\varphi, s); \quad (4)$$

$r = \eta_b(\varphi, s)$ – уравнение контура поперечного сечения волновода в системе координат (r, φ, s) .

Тогда в системе координат (ρ, φ, s) уравнение боковой поверхности рассматриваемого волновода принимает вид

$$\rho = 1. \quad (5)$$

Это позволяет искать решение волновых уравнений (1) в виде разложений по системе базисных функций регулярного цилиндрического волновода. Например, для периодических во времени полей ($\omega = 2\pi/T$) можно искать решение (1) для электрической и магнитной напряженностей полей в виде

$$\left. \begin{aligned} E'_t &= \operatorname{Re} \sum_m \dot{\mathbf{E}}_{tm} e^{jm\omega t}; \\ E'_s &= \operatorname{Re} \sum_m \dot{\mathbf{E}}_{sm} e^{jm\omega t}; \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \text{где} \\ \mathbf{E}'_{tm} &= \sum_{i=1}^l \sum_{n=-N}^N \left(\dot{A}_{mni}^E \mathbf{e}_{ni}^E + \dot{A}_{mni}^M \mathbf{e}_{ni}^M \right); \\ \mathbf{E}'_{sm} &= \sum_{i=1}^l \sum_{n=-N}^N \dot{C}_{mni} \Phi_{ni}; \\ \mathbf{H}_m &= \frac{j}{m\omega\mu_0} g^{-1} \operatorname{rot} \mathbf{E}_m, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

а собственные функции регулярного волновода выражены следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} e_{rni}^E &= J'_n(\nu_m \rho) e^{-jn\varphi}; & e_{rni}^M &= -\frac{n}{\mu_{ni}\rho} J_n(\mu_m \rho) e^{-jn\varphi}; \\ e_{\varphi ni}^E &= -\frac{jn}{\nu_{ni}\rho} J_n(\nu_{ni} \rho) e^{-jn\varphi}; & e_{rni}^M &= jJ'_n(\mu_m \rho) e^{-jn\varphi}; \\ \Phi_{ni} &= J_n(\nu_m \rho) e^{-jn\varphi}. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

Здесь m – номер гармоники основной частоты ω ; n – азимутальный индекс; i – радиальный индекс; j – мнимая единица; ν_{ni} – корни функции Бесселя ($J_n(\nu_{ni})=0$); μ_{ni} – корни производной от функции Бесселя ($J'_n(\mu_{ni})=0$). Направляющие векторы новой (косоугольной) системы координат (ρ, φ, s) определяются следующим образом:

$$\mathbf{a}_1 = \mathbf{a}_\rho = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \rho} = \eta_b(\varphi, s) \cdot (n(s) \cdot \cos \varphi + b(s) \cdot \sin \varphi) = \eta_b \cdot \mathbf{r}_0, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_2 = \mathbf{a}_\varphi &= \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \varphi} = \rho \cdot \frac{\partial \eta_b}{\partial \varphi} \cdot (n(s) \cdot \cos \varphi + b(s) \cdot \sin \varphi) + \\ &+ \rho \cdot \eta_b \cdot (-n(s) \cdot \sin \varphi + b(s) \cdot \cos \varphi) = \rho \cdot \frac{\partial \eta_b}{\partial \varphi} \cdot \mathbf{r}_0 + \rho \cdot \eta_b \cdot \Phi_0, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_3 = \mathbf{a}_s &= \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial s} = \rho \cdot \frac{\partial \eta_b}{\partial s} \cdot (n(s) \cdot \cos \varphi + b(s) \cdot \sin \varphi) + \rho \cdot \eta_b \cdot \tau \cdot \\ &\cdot (-n(s) \cdot \sin \varphi + b(s) \cdot \cos \varphi) + \tau \cdot (1 - k \cdot \rho \cdot \eta_b) = \\ &= \rho \cdot \frac{\partial \eta_b}{\partial s} \cdot \mathbf{r}_0 + \rho \cdot \eta_b \cdot \tau \cdot \Phi_0 + \tau \cdot (1 - k \cdot \rho \cdot \eta_b \cdot \cos \varphi) \end{aligned}$$

Взаимная система контравариантных векторов записывается через основную:

$$\mathbf{a}^i = [\mathbf{a}_{i+1}, \mathbf{a}_{i+2}] / \mathbf{a}_i [\mathbf{a}_{i+1}, \mathbf{a}_{i+2}];$$

$$\mathbf{a}^1 = \mathbf{a}^\rho = \frac{1}{r_b} \mathbf{r}_0 - \frac{1}{r_b^2} \frac{\partial r_b}{r_b^2 \partial \varphi} \boldsymbol{\varphi}_0 + \frac{\rho}{r_b h_4} \left(\frac{\partial r_b}{\partial \varphi} \boldsymbol{\tau} - \frac{\partial r_b}{\partial s} \right) \mathbf{t}; \quad (10)$$

$$\mathbf{a}^2 = \mathbf{a}^\varphi = \frac{1}{\rho r_b} \boldsymbol{\varphi}_0 - \frac{\boldsymbol{\tau}}{h_4} \mathbf{t}; \quad \mathbf{a}^3 = \mathbf{a}^s = \mathbf{t}/h_4.$$

Уравнения Максвелла (1) в новых координатах (ρ, φ, s) в ковариантной форме имеют вид:

$$\begin{aligned} \text{rot} \mathbf{H}' &= \varepsilon_0 g \frac{\partial \mathbf{E}'}{\partial t} + g \mathbf{J}'; \\ \text{rot} \mathbf{E}' &= -\mu_0 g \frac{\partial \mathbf{H}'}{\partial t}. \end{aligned} \quad (11)$$

Здесь метрический тензор g записывается как

$$g = \sqrt{g} \begin{vmatrix} g^{11}/\rho, g^{12}, g^{13}/\rho \\ g^{21}, \rho g^{22}, g^{23} \\ g^{31}/\rho, g^{32}, g^{33}/\rho \end{vmatrix}, \quad (12)$$

$$\text{где } g^{ij} = (\mathbf{a}^i, \mathbf{a}^j); \sqrt{g} = \mathbf{a}^1 [\mathbf{a}^2, \mathbf{a}^3] = \rho r_b^2 h_4.$$

Составляющие метрического тензора следующие:

$$\begin{aligned} g^{11} &= \frac{1}{r_b^2} + \frac{1}{r_b^4} \left(\frac{\partial r_b}{\partial \varphi} \right)^2 + \frac{\rho^2}{r_b^2 h_4^2} \left[\boldsymbol{\tau}(s) \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} - \frac{\partial r_b}{\partial s} \right]^2; \quad g^{22} = \frac{1}{r_b^2 \rho^2} + \frac{\boldsymbol{\tau}^2(s)}{h_4^2}; \\ g^{12} &= -\frac{1}{r_b^3 \rho} \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} - \frac{\rho \boldsymbol{\tau}(s)}{r_b h_4^2} \left[\boldsymbol{\tau}(s) \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} - \frac{\partial r_b}{\partial s} \right]; \quad g^{23} = -\frac{\boldsymbol{\tau}(s)}{h_4^2}; \\ g^{13} &= \frac{\rho}{r_b h_4^2} \left[\boldsymbol{\tau}(s) \frac{\partial r_b}{\partial \varphi} - \frac{\partial r_b}{\partial s} \right]; \quad g^{33} = \frac{1}{h_4^2}, \end{aligned} \quad (13)$$

где $h_4 = 1 - \rho r_b(\varphi, s) k(s) \cos \varphi$; $k(s)$, $\boldsymbol{\tau}(s)$ – соответственно кривизна и кручение оси волновода. Реальные физические векторы определяются через расчетные (штрихованные) следующим образом:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= E'_\rho \mathbf{a}^1 + E'_\varphi \rho \mathbf{a}^2 + E'_s \mathbf{a}^3; \\ \mathbf{H} &= H'_\rho \mathbf{a}^1 + H'_\varphi \rho \mathbf{a}^2 + H'_s \mathbf{a}^3; \\ \mathbf{J} &= J'_\rho \mathbf{a}^1 + J'_\varphi \rho \mathbf{a}^2 + J'_s \mathbf{a}^3. \end{aligned} \quad (14)$$

Для решения (11) воспользуемся методом Галеркина, который заключается в том, что коэффициенты разложений (7) определяются из условия ортогональности невязок уравнения (11) собственным векторам разложения (8) при любом s :

$$\left. \begin{aligned} \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \left\{ \text{rot} \left(g^{-1} \text{rot} \mathbf{E}' \right) + \mu_0 g \left[\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}'}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 (\boldsymbol{\tau} \bar{\mathbf{E}}')}{\partial t^2} + \frac{\partial \mathbf{J}'}{\partial t} \right] \right\} \cdot \bar{\mathbf{e}}_{ni}^{E, M^*} \rho d\varphi d\rho e^{-im\omega t} d\omega t = 0, \\ \int_0^{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 \left\{ \text{rot} \left(g^{-1} \text{rot} \mathbf{E}' \right) + \mu_0 g \left[\varepsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}'}{\partial t^2} + \frac{\partial^2 (\boldsymbol{\tau} \bar{\mathbf{E}}')}{\partial t^2} + \frac{\partial \mathbf{J}'}{\partial t} \right] \right\} \cdot \boldsymbol{\varphi}_{ni} \rho d\varphi d\rho e^{-im\omega t} d\omega t = 0. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

Это наиболее общее решение задачи возбуждения волновода произвольной формы с неоднородным включением анизотропных диэлектрических элементов.

Заключение

Полученные общие уравнения (15) могут быть конкретизированы для любого частного случая. Кроме того, при $\vec{J} = 0$ они могут быть использованы для расчета пассивных элементов на нерегулярных волноводах с включениями анизотропных диэлектрических элементов.

EXCITATION OF ARBITRARY IRREGULAR WAVEGUIDE WITH AN INHOMOGENEOUS ANISOTROPIC DIELECTRIC FILLING

A.A. KURAYEV, T.L. POPKOVA, A.O. RAK

Abstract

A general form of the equation excitation arbitrary irregular waveguide with an inhomogeneous anisotropic dielectric filling is formulated.

Список литературы

1. *Кураев А. А.* // Известия АН БССР, Сер. ФТН. 1979. № 1. С. 121–127.
2. *Кураев А. А.* Теория и оптимизация электронных приборов СВЧ. Минск, 1979.
3. *Кураев А. А.* Мощные приборы СВЧ. Методы анализа и оптимизации параметров. М., 1986.
4. *Кураев А.А., Байбурын В.Б., Ильин Е.М.* Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ-приборов. Минск, 1990.
5. *Кураев А. А., Попкова Т.Л., Сеницын А.К.* Электродинамика и распространение радиоволн. Минск, 2004.
6. Методы нелинейной динамики и теории хаоса в задачах электроники сверхвысоких частот. Том I. Стационарные процессы / Под ред. А. А. Кураева и Д. И. Трубецкова. М., 2009.
7. *Кураев А. А.* // Весці НАН Беларусі. Сер. ФТН. 1999. №4. С. 60–65.

УДК [004.05 + 006.015.5 + 004.414.38] : 519.171.1

МЕТОД ПОВЫШЕНИЯ КАЧЕСТВА СПЕЦИФИКАЦИИ ТРЕБОВАНИЙ К ПРОГРАММНОМУ СРЕДСТВУ

А.Ю. ЧИРКОВА, В.В. БАХТИЗИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 27 марта 2015

Предложена графовая модель спецификаций требований. При построении графовой модели описаны действия, которые позволяют обеспечить соответствие требований критериям качества, что в совокупности представляет собой метод повышения качества спецификации требований к программному средству.

Ключевые слова: качество спецификаций требований, требования к программному средству, управление требованиями, граф.

Введение

Тщательно разработанные требования к программному средству (ПС) являются ключевым моментом, влияющим на успех проекта. Стоимость исправления ошибки после завершения проекта на несколько порядков выше, чем расходы по исправлению подобной ошибки на этапе анализа требований. Требования – это описанные возможности, которыми должно обладать ПС, а также ограничения, накладываемые на ПС [1]. Очевидно, чем сложнее разрабатываемое ПС, тем сложнее структурировать и управлять требованиями.

Управление требованиями представляет собой деятельность, где параллельно происходит сбор требований, их анализ, документирование и проверка. Это также процесс мониторинга и документирования изменений в требованиях, отслеживание их изменений в сопутствующих документах или программных продуктах, и доведения этой информации до проектной команды [1].

Хорошо налаженное управление требованиями гарантирует, что непредвиденными изменениями можно управлять в течение всего жизненного цикла программного продукта. Иначе высокого качества программного продукта невозможно достичь. Однако, несмотря на важность обеспечения качества спецификаций требований (СТ), этой проблеме уделяется мало внимания в настоящий момент. Существуют определенные техники выявления требований [2], методы моделирования требований, например, семантические методы [2], объектно-ориентированные методы [3], а также рекомендации и стандарты к содержанию СТ. Однако модели и методы, позволяющие оценивать и повышать качество требований, в литературе описаны недостаточно полно.

Критерии качества требований

Критерии качества требований по-разному определены различными источниками. Анализируя ряд стандартов, таких как ISO/IEC 9126-1:2001 [4], IEEE 830-1998 [5], ISO/IEC 25010:2011 [6], можно выделить общие критерии качества программных продуктов и требований к ним. Наиболее весомыми из них являются следующие критерии: однозначность, полнота, непротиворечивость, атомарность, трассируемость, актуальность, выполнимость,

недвусмысленность, обязательность (важность), проверяемость, изменяемость (стабильность), целостность, корректность.

Конкретное требование может соответствовать тому или иному критерию качества, при этом, качественное требование должно отвечать всем перечисленным выше критериям качества. Спецификация требований высокого качества должна состоять только из качественных требований.

Однако если такие критерии как выполнимость или недвусмысленность легко проверить, то определить соответствие требования такому критерию как полнота довольно сложно. Поэтому этот критерий можно разбить на два типа.

1. Соответствие первоначально заявленным требованиям, и/или описанным бизнес-требованиям, а также наличие первоначально не заявленных, но необходимых для реализации или функционирования ПС, требований

2. Описание всех аспектов, включающих функциональные возможности, условия выполнения, ограничения проектирования, характеристики, внешние интерфейсы, реакции ПС на как допустимые, так и недопустимые значения входных данных во всех возможных ситуациях.

Построение графовой модели спецификации требований

Первоначальный набор требований не является формализованной структурой, но представляет собой механизм взаимодействия сторон, т.е. заинтересованных лиц, вовлеченных в процесс разработки ПС. В связи с тем, что количество заинтересованных лиц достаточно велико, кроме того, они отвечают за разные этапы разработки ПС, выделяют различные уровни требований.

Бизнес-требования содержат высокоуровневые цели заказчиков ПС. Требования пользователей описывают цели и задачи, которые пользователям позволит решить разрабатываемое ПС. Системные требования описывают требования к системе, которая в общем случае состоит из аппаратных и программных средств, а также ручных операций. Исходя из этого, первоначальный набор требований может быть представлен в виде множества предписаний или ожидаемых возможностей ПС: $R_{init} = \{r_i = \overline{1, n}\}$, где n – количество предписаний, r_i – i -ое предписание.

Сюръективное отображение $f: R_{init} \rightarrow R$ при котором каждый элемент множества R является образом хотя бы одного элемента множества R_{init} , представляет собой функцию, которая преобразовывает первоначальный набор предписаний в формализованные требования. Сюръекция обеспечивает полноту первого типа, так как ни одно первоначальное предписание не должно быть опущено, наоборот, сходные предписания могут быть формализованы в одно требование.

Преобразованное множество R требований можно описать в иерархическом виде так, чтобы они были сгруппированы по общему тематическому признаку или по назначению. Будем использовать понятие «домен» для определения таких групп. Таким образом, СТ может быть представлена в виде древовидной структуры, где листьями дерева являются непосредственно требования, а ветвями – домены. Корнем дерева является вершина, которая объединяет все домены, то есть непосредственно СТ. Пример реализации древовидной структуры представлен на рис. 1.

Целью иерархического представления требований является их структуризация. Структуризация ускоряет процесс разработки требований, позволяет выявлять неточности, ошибки и прочие проблемы еще на этапе анализа требований, кроме того, в дальнейшем упрощает процесс управления требованиями.

На предлагаемую модель накладываются следующие ограничения. Ребра взвешенного графа определяют принадлежность конкретного требования определенному домену. Вес ребер между ветвями и листьями равен единице, т.к. их отношения однозначно определены принадлежностью требования домену. Минимальная степень графа $deg(G)$ должна быть равна единице, т.к. не должно существовать изолированных вершин, другими словами, каждое требование должно быть отнесено хотя бы к одному домену. Диаметр графа $diam(G)$ не может быть больше 4. Это ограничение выражает тот факт, что домен не может содержать поддоменов:

если домен можно разбить на поддомены, тогда каждый поддомен должен быть охарактеризован как самостоятельный домен. Также и требование не может иметь дочерние требования. На данном этапе построения графа листья графа должны иметь только одно инцидентное ребро. Если лист имеет несколько смежных вершин-доменов, следует проанализировать данное требование и разбить его на несколько вершин таким образом, чтобы выполнялось наложенное ограничение. Все ограничения накладывались на модель в соответствии с теорией графов [7].

Следующий этап построения графовой модели – это задание множества характеристик требования в виде семантической аннотации.

Опишем требования, представленные текстом на естественном языке, ограниченным набором свойств малой длины, то есть каждое свойство должно быть минимально возможным количеством слов. Каждое требование обязательно должно иметь следующие свойства: объект, субъект, действие, условие выполнения. Определение для каждого требования всех четырех свойств, перечисленных выше, служит залогом обеспечения такого критерия качества как полнота второго типа. Таким образом, множество требований может быть представлено через множество свойств в этом частном случае в следующем виде:

$$R = \{p_i \mid p = \{O_i, S_i, A_i, C_i\}, i = \overline{1, n}\},$$

где p_i – множество свойств, в котором O_i – совокупность объектов, над которыми субъекты S_i совершают действия A_i при выполнении условий C_i .

В общем случае, множество требований может быть представлено в следующем виде:

$$R = \{p_i \mid p = \{P_j, j = \overline{1, m}\}, i = \overline{1, n}\},$$

где m – количество свойств, описывающих требование, P_j – j -ое свойство i -го требования.

Если требование имеет больше одного значения какого-либо свойства, например, в требовании описаны два различных действия над одним объектом, следует разделить данное требование с тем, чтобы обеспечить его атомарность. Логично, что, имея атомарные требования, каждое требование может быть проверено на выполнимость. Ребра невыполнимых требований можно выставить вес, равный 0. Теперь и в дальнейшем ребра, имеющие нулевой вес, удаляются из графа, также удаляются изолированные листья графа.

Кроме того, для повышения качества спецификации требований предлагается квантифицировать требования, то есть определять количественные значения в требованиях. Очевидно, что не любое требование может быть квантифицировано, однако использование квантификации даже там, где выбираемые значения очевидны, исключает использование таких слов, как «несколько», «много», «быстро» и так далее, что препятствует возникновению двусмысленности и способствует улучшению проверяемости требований.

Следующий этап построения графа – это усиление его связности. Между всеми листьями графа проведем ребра. Вес ребра выражается различием двух требований.

Примем мерой различия двух требований семантическое расстояние, которое является показателем смыслового различия и является действительным числом в интервале от 0 до 1, где 1 – требования идентичны, 0 – требования совершенно не связаны. Исходными данными для вычисления являются характеристики, которыми аннотированы требования. Для вычисления семантического расстояния между двумя требованиями используем расстояние Хэмминга [8] в следующем виде:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n (a \mid a = 0 : P_{i_1} \diamond P_{i_2}, a = 1 : P_{i_1} = P_{i_2})}{N}, \quad (1)$$

где L – семантическое расстояние, a принимает значения 0, когда свойства двух требований не равны, или 1 в противном случае, $P_{i(1,2)}$ – i -ое свойство каждого из двух требований, N – число свойств требования.

Ребра с нулевым весом удаляются из графа. Чем больше связей между вершинами, тем сложнее допустить ошибку при последующем изменении требований. Смежность листьев служит показателем того, что в СТ следует указывать связь этих требований. Таким образом осуществляется соответствие требования такому критерию качества требования как

трассируемость. Вес ребра в таком случае служит вероятностью добавления связей между требованиями. Для исключения избыточных связей (т.е. для того, чтобы граф не был перегружен большим количеством ребер) каждому свойству требования можно добавлять вес. Тогда формула (1) может быть представлена в следующем виде:

$$L = \frac{\sum_{i=1}^n (a | a=0: P_{i_1} \diamond P_{i_2}, a=1: P_{i_1} = P_{i_2}) * w_i}{N}, \quad (2)$$

где w – вес i -го свойства каждого из двух требований.

Если найдется такое ребро, что его вес будет равен единице, то велика вероятность того, что смежные листья этого ребра являются дубликатами одного и того же требования. Такие требования следует дополнительно анализировать.

Полученная графовая модель представлена на рис. 1, где корнем дерева является вершина, называемая SRS (от английского Software Requirements Specification), объединяющая в себе все домены D_i , которые включают в себя листья – конкретные требования, помеченные как R_i . Ребра, инцидентные вершинам D_i , имеют вес, равный единице в соответствии с ограничениями, наложенными на модель. Ребра, соединяющие вершины R_i , имеют вес, рассчитанный по формуле (2).

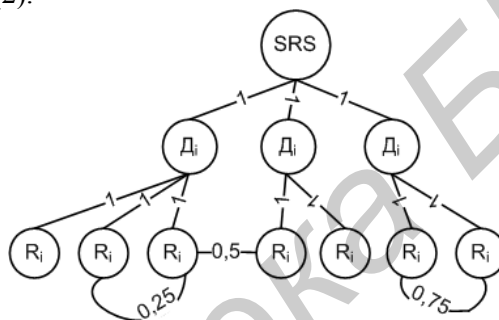


Рис. 1. Графовая модель представления спецификации требований

Приведем пример расчета весов ребер, соединяющих листья графа. Пусть существует два требования: «Непривилегированный пользователь может просматривать свои заказы», «Администратор может просматривать все заказы». Выделим свойства каждого из требований. Для первого требования объектом является заказ, субъектом – пользователь, действием – просмотр, условием – «только свои заказы». Для второго требования объектом является заказ, субъектом – администратор, действием – просмотр, условием – «все заказы». Пусть вес каждого свойства равен единице. Свойства «объект» и «действие» двух требований одинаковы, остальные различны. Таким образом, производя расчет по формуле (2), получаем вес ребра, равный 0,5.

Действия, выполняемые на каждом шаге построения предложенной модели СТ, в совокупности представляют собой метод, повышающий значения некоторых критериев качества, следовательно, повышающий качество спецификации требований.

Проблема определения противоречивых требований

Выявление противоречий в СТ является сложной задачей. Проблема заключается в том, что не только два атомарных требования могут противоречить друг другу, но и группа требований может противоречить одному требованию в то время, как по отдельности рассматриваемые требования не противоречат друг другу.

Рассмотрим случай, когда необходимо выявить два противоречивых требования. Требования являются противоречивыми по отношению друг к другу тогда и только тогда, когда они описывают действия над одним объектом, и хотя бы одна пара свойств другого типа, например, свойство «субъект», имеют значения, которые могут быть выражены в следующем виде: $P_{i_1} \Leftrightarrow \neg P_{i_2}$, т.е., когда значение свойства одного требования равносильно отрицанию значения того же свойства второго требования.

Таким образом, необходимо проанализировать все смежные листья графа. Если любая пара смежных листьев имеет противоречивые значения свойств одного типа, то вес их ребра становится отрицательным. Следует различать отличающиеся значения свойств от противоречивых значений. Отрицательное значение веса ребра указывает на то, что либо изначальные требования противоречивы, либо в СТ отсутствует связующее их требование, либо любое значение свойства противоречивых требований несправедливо.

Рассмотрим случай, когда необходимо выявить требование, противоречащее группе требований. Для этого удалим из графа все шарниры, являющиеся вершинами-доменами. Оставшиеся компоненты связности представляют собой наборы требований, связанные по каким-либо свойствам требования. Тщательному анализу должны быть подвержены циклы, так как именно в циклах вероятность возникновения противоречия выше.

На рис. 2 изображен граф, у которого удалены шарниры, то есть домены, которые связывают требования, а компоненты связности представлены в виде вершин (требований), соединенных дугами, и для наглядности обведены. Требования, которые не попали в компоненты, являются независимыми, следовательно, не должны вступать в противоречия с другими требованиями.

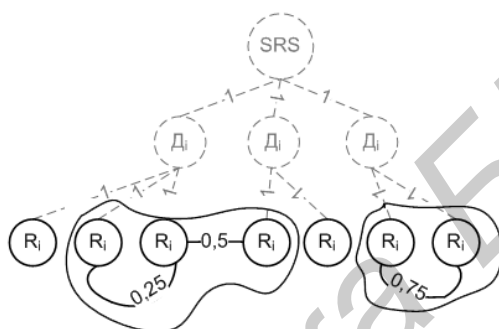


Рис. 2. Разбиение графа на компоненты путем удаления шарниров

Меры качества, основанные на предложенной графовой модели

Мера качества – производная мера, определяемая как результат функции измерения двух или более величин, входящих в нее элементов, определяемых в терминах свойств и методах измерения их количественных оценок [9]. Используя ограничения, наложенные на модель, а также свойства описанной модели, можно выделить следующие меры качества спецификации требований к программным средствам.

Данные меры можно использовать для оценки некоторых критериев качества спецификаций требований.

1. Полнота описания всех аспектов требования, включающих функциональные возможности, условия выполнения, ограничения проектирования, характеристики, внешние интерфейсы, реакции ПС на как допустимые, так и недопустимые значения входных данных во всех возможных ситуациях:

$$M_{compl} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij}}{nm},$$

где n – количество требований в спецификации, m – заданное количество характеристик каждого требования, P_{ij} – j -ое свойство i -го требования, которое в формуле принимает значение, равное единице, если свойство присутствует, и нуль в противном случае.

2. Показатель обеспечения трассируемости связанных требований:

$$M_{trace} = \frac{N_{traced}}{N_{related}},$$

где $N_{related}$ – количество всех связанных требований, N_{traced} – количество требований, для которых указана ссылка на связанное с ним требование.

Диапазон значений предложенных мер лежит в отрезке [0;1].

Экспериментальное подтверждение повышения качества при помощи предложенной модели и мер качества

Для проведения эксперимента были рассмотрены три спецификации требований к разным программным средствам, составленные профессиональными бизнес-аналитиками.

Требования были реструктурированы и аннотированы. Для каждой спецификации требований был построен свой граф, а при построении графа по предложенной модели некоторые требования были переформулированы. Также было посчитано общее количество требований до и после преобразований; количество некачественных требований, выявленных во время построения модели: дубликаты, неатомарные требования, противоречивые требования; первоначальные и измененные спецификации требований были оценены по предложенным мерам.

В таблице приведены результаты эксперимента. После применения предложенной модели количество некачественных требований уменьшилось: дубликаты были удалены, неатомарные требования были перефразированы и разбиты на более детальные требования. Также были выявлены противоречивые требования. Такие требования были проанализированы, а противоречия разрешены.

После применения модели было подсчитано количество связанных требований, однако, не все связанные требования были трассированы в рассматриваемых спецификациях. Сильно связанные требования были протрассированы. Также спецификации были оценены предложенными мерами качества до и после применения модели. Из таблицы видно, что после применения модели полученные значения мер увеличились, что говорит о том, что уровень качества СТ повысился.

Результаты эксперимента

№ п/п	Всего требований (до/после)	Дубликаты/ Неатомарные/ Противоречивые	M_{compl} , $m = 4$ (до/после)	Количество связанных требований	Трассируемые требования (до/после)	M_{trace} (до/после)
1	100/116	2/17/1	0,613/0,765	86	25/50	0,291/0,581
2	200/221	3/15/2	0,688/0,881	72	19/46	0,264/0,639
3	150/155	0/3/0	0,875/0,934	52	30/42	0,577/0,808

Заключение

Предложенная графовая модель представления требований к ПС может быть применена при выявлении, сборе и анализе требований. Использование модели упрощает документирование требований, а также способствует выявлению ошибок при дальнейшем управлении требованиями. Применяя предложенный метод на практике, аналитик получает дополнительную возможность повысить качество требований как на начальном этапе создания СТ, так и на протяжении всего жизненного цикла ПС при изменяющихся требованиях. Проведенный эксперимент доказал, что значения некоторых критериев качества спецификаций требований могут быть повышены при применении предложенной модели. Очевидно, что применение модели к уже созданным спецификациям требований дает хорошие результаты, более того, применение метода на начальных этапах создания СТ должно упрощать работу с требованиями и исключать появление требований с низким качеством, повышая тем самым качество СТ в целом.

QUALITY IMPROVING GRAPH MODEL AND METHOD FOR SOFTWARE REQUIREMENTS SPECIFICATION

A.U. CHIRKOVA, V.V. BAKHTIZIN

Abstract

The graph model for software requirements specification is proposed. Besides, there are possible actions of improving the quality characteristics of software requirements described. In total proposed model and actions represent a method of the quality improvement of the software requirement specification.

Список литературы

1. *Вигерс К.* Разработка требований к программному обеспечению. М., 2004.
2. *Kotonya G., Sommerville I.* Requirements Engineering. Processes and techniques. New York, 1998.
3. *Hull E., Jackson K., Dick J.* Requirements engineering. London, 2005.
4. ISO/IEC 9126-1:2001. Software engineering – Product quality – Part 1: Quality model.
5. 830-1998. IEEE Recommended Practice for Software Requirements Specifications. 1998.
6. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE). System and software quality models.
7. *Оре О.* Теория графов. М., 1980.
8. *Блейхут Р.* Теория и практика кодов, контролирующих ошибки. М., 1986.
9. *Бахтизин В.В., Глухова Л.А., Неборский С.Н.* Метрология, стандартизация и сертификация в информационных технологиях. Минск, 2013.

УДК 62–83

АЛГОРИТМИЗАЦИЯ БЕСКОЛЛИЗИОННЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ПЛАНАРНЫХ ПОЗИЦИОНЕРОВ УНИВЕРСАЛЬНОГО СБОРОЧНОГО МОДУЛЯ

В.В. ПОЛЯКОВСКИЙ, Д.Г. БЕГУН, И.В. ДАЙНЯК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 2 апреля 2015

Описана структура универсального сборочного модуля, включающего шесть и более планарных позиционеров, перемещающихся на одном статоре в общем рабочем пространстве. Для планирования траекторий одновременного движения нескольких планарных позиционеров предложен алгоритм бесколлизийных перемещений, основанный на анализе шлейфов движения, конфигурации запрещенных зон и правиле приоритетов, предназначенный для реализации в системе управления сборочного модуля. Описаны особенности реализации и преимущества системы управления сервоприводом и прецизионных систем перемещений на основе технологии EtherCAT.

Ключевые слова: бесколлизийные перемещения, планарный позиционер, сборочное оборудование, микроэлектроника.

Введение

Системы перемещений современного технологического оборудования производства изделий микроэлектроники строятся, как правило, на базе поворотных серводвигателей, линейных шаговых двигателей и планарных позиционеров [1, 2]. Основным параметром систем перемещений является точность, которая может быть обеспечена либо за счет конструктивных особенностей их компонентов, либо путем компенсации погрешностей средствами системы управления [3].

Целью настоящей статьи является разработка алгоритма бесколлизийной работы многокоординатных планарных систем перемещений и структуры системы управления универсального сборочного модуля, содержащего в своем составе несколько параллельно работающих планарных позиционеров, требующих построения программируемых движений в едином рабочем пространстве.

Структура универсального сборочного модуля

Универсальный сборочный модуль, разработанный на предприятии «Рухсервомотор» для работы с микроэлектромеханическими сборками (МЭМС) состоит из базового статорного основания, по которому одновременно перемещаются до 6 и более (в зависимости от технологии сборки) двухкоординатных позиционеров на магнитовоздушной подвеске [4]. По периферии статорного основания установлены технологические посты (макроассемблеры), на которых производятся технологические операции. Такая структура позволяет реализовать все межоперационные транспортные перемещения с повторяемостью в пределах 1 мкм, а выполнение технологических операций возможно с точностью до 1 мкм (в зоне площадью до 10 см²). По вышеприведенному принципу можно организовать производство прецизионных изделий любой сколь угодно сложной конфигурации.

Структурная схема системы управления сборочным модулем, содержащим шесть позиционеров, с использованием технологии EtherCAT, приведена на рис. 1.

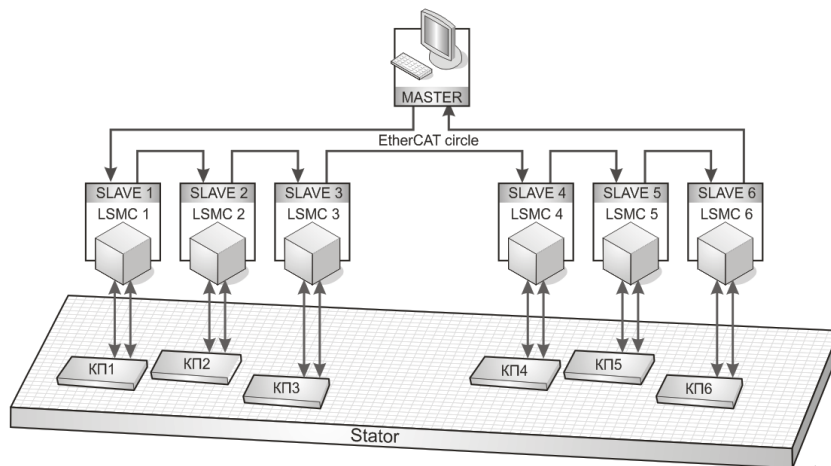


Рис. 1. Структура универсального сборочного модуля

Каждый из позиционеров в составе сборочного модуля включает планарный двигатель PF28HS с функцией управляемого разворота в пределах 1 углового градуса и две технологические подачи инструментов: практически 3 интерполируемые и 2 независимые оси подачи.

В технологических зонах применяются обратные связи на базе интерферометров или голографических оптических решеток с разрешением в единицы нанометров. В транспортном режиме двигатель работает с обратной связью по положению на базе датчика Холла с повторяемостью позиции в пределах 1 мкм.

Каждый позиционер управляется контроллером на базе LSMC-5 [4], который в режиме EtherCAT-Slave решает задачу реального времени по генерации траектории внутрисплайновой интерполяции, обработки сигналов датчика, расчета положения и скорости объекта управления с учетом возможных коллизий с другими пятью позиционерами, имеющими общую базовую статорную плиту. Промышленный компьютер PC Master обеспечивает траекторный расчет точек пересечения сплайнов по 12 позиционным осям, обработку сигналов прецизионных датчиков рабочих постов и поддержку технологии и алгоритма бесколлизийной работы позиционеров сборочного модуля.

Алгоритм бесколлизийных перемещений планарных позиционеров на одном статоре

Конструктивная особенность построения представленного выше универсального сборочного модуля характеризуется необходимостью реализации технологических перемещений одновременно несколькими планарными позиционерами в общей рабочей зоне неподвижного статора. При этом могут возникать ситуации, в дальнейшем называемые коллизиями, характеризующиеся зонами пересечений «шлейфов» движения отдельных планарных позиционеров, зоны, в которых необходимо обеспечивать их требуемые перемещения без столкновений. В настоящей работе представлен разработанный алгоритм бесколлизийных перемещений нескольких планарных позиционеров на одном статоре, предназначенный для реализации в системе управления универсальным сборочным модулем, которая разработана на основе технологии EtherCAT. При разработке алгоритма анализа коллизий ставилась задача получения рекуррентных аналитических выражений, позволяющих формировать алгоритмы управления бесколлизийными движениями двух и более планарных позиционеров на одном статоре. Проведенный анализ различных конфигураций системы перемещений на планарных позиционерах показал, что алгоритмизацию необходимо проводить на базе конфигурации из трех планарных позиционеров, для которой алгоритм бесколлизийной работы двух позиционеров является частным случаем, а расширение конфигурации на четыре и более планарных позиционеров может выполняться программно в автоматическом режиме по рекуррентным формулам.

Расчетная геометрическая модель системы перемещений на трех планарных позиционерах показана на рис. 2.

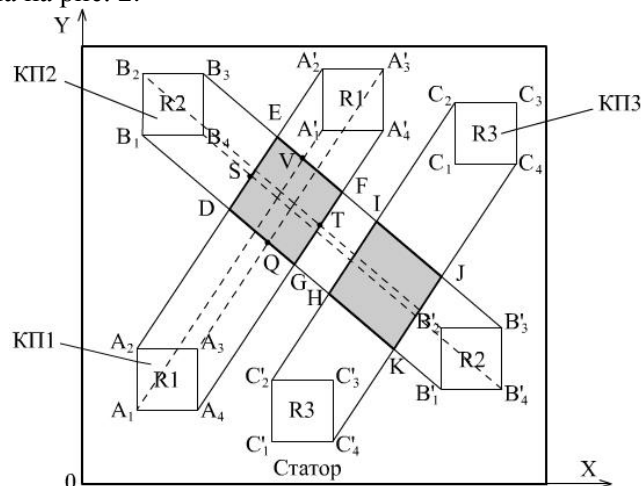


Рис. 2. Расчетная геометрическая модель анализа коллизий трех планарных позиционеров на одном статоре

Планарные позиционеры КП1, КП2, КП3 на рис. 2 представлены их проекциями на плоскость статора соответственно $A_1A_2A_3A_4$, $B_1B_2B_3B_4$ и $C_1C_2C_3C_4$ в начальный момент движения, и $A'_1A'_2A'_3A'_4$, $B'_1B'_2B'_3B'_4$ и $C'_1C'_2C'_3C'_4$ – в конечный момент движения.

Параметрические уравнения перемещения любой точки позиционера в выбранной системе координат XOY (рис. 2) имеют следующий вид:

$$\begin{cases} x = x_0 + v_x t; \\ y = y_0 + v_y t, \end{cases} \quad (1)$$

где $v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}$ – скорость позиционера на траектории в виде прямой, а уравнение траектории – вид

$$y = k \cdot x + b, \quad (2)$$

где $k = \operatorname{tg} \varphi = \frac{v_x}{v_y}$ – угловой коэффициент траектории движения.

Если заданы начальная и конечная точки перемещения позиционера, то постоянные параметры прямой (2) рассчитываются по формулам

$$k = \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0}; \quad b = y_0 - \frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} x_0, \quad (3)$$

где x_0, y_0 – координаты начальной точки перемещения; x_1, y_1 – координаты конечной точки перемещения.

Значения скоростей v_x и v_y при этом определяются по формулам

$$\begin{cases} v_x = v \cdot \cos \varphi, \\ v_y = v \cdot \sin \varphi, \end{cases} \quad (4)$$

где угол φ с учетом формул (3) равен

$$\varphi = \begin{cases} \operatorname{arctg} \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right), & y_1 \geq y_0; \\ \pi + \operatorname{arctg} \left(\frac{y_1 - y_0}{x_1 - x_0} \right), & y_1 < y_0. \end{cases}$$

В параметрической форме уравнения траекторий для позиционеров КП1, КП2 и КП3 на основании формулы (1) имеют следующий вид:

– для позиционера КП1:

$$\begin{cases} x^{(1)} = x_0^{(1)} + v_x^{(1)}t, \\ y^{(1)} = y_0^{(1)} + v_y^{(1)}t; \end{cases}$$

– для позиционера КП2:

$$\begin{cases} x^{(2)} = x_0^{(2)} + v_x^{(2)}t, \\ y^{(2)} = y_0^{(2)} + v_y^{(2)}t; \end{cases}$$

– для позиционера КП3:

$$\begin{cases} x^{(3)} = x_0^{(3)} + v_x^{(3)}t, \\ y^{(3)} = y_0^{(3)} + v_y^{(3)}t. \end{cases}$$

где $v_x^{(1)}$, $v_y^{(1)}$, $v_x^{(2)}$, $v_y^{(2)}$ и $v_x^{(3)}$, $v_y^{(3)}$ вычисляются по формуле (4).

Как следует из рис. 2, областью, в которой возможно столкновение позиционеров, является геометрическое место пересечения их шлейфов движения. Так, общей зоной для позиционеров КП1 и КП2 является четырехугольник DEFG, для КП2 и КП3 – HIJK. При движении позиционеров производится анализ их местоположения относительно этих участков. Алгоритм построен таким образом, что при нахождении одного из позиционеров в общей зоне остальным вход в нее запрещен.

Далее для удобства изложения информации алгоритм анализа и предотвращения коллизий будем рассматривать на примере движения позиционеров КП1 и КП2.

Для позиционера КП1 точкой входа в запрещенную зону является точка Q, точкой выхода – точка V. Позиционер КП2 входит в запрещенную зону в точке S и выходит из нее в точке T. Координаты всех этих точек определяются из следующих выражений:

$$X_S = \frac{b_{E_4E_4'} - b_{A_2A_2'}}{k_1 - k_2}; Y_S = \frac{b_{E_4E_4'} - b_{A_2A_2'}}{k_1 - k_2} \cdot k_1 + b_{A_2A_2'};$$

$$X_T = \frac{b_{E_2E_2'} - b_{A_4A_4'}}{k_1 - k_2}; Y_T = \frac{b_{E_2E_2'} - b_{A_4A_4'}}{k_1 - k_2} \cdot k_1 + b_{A_4A_4'};$$

$$X_Q = \frac{b_{A_3A_3'} - b_{B_1B_1'}}{k_2 - k_1}; Y_Q = \frac{b_{A_3A_3'} - b_{B_1B_1'}}{k_2 - k_1} \cdot k_2 + b_{B_1B_1'};$$

$$X_V = \frac{b_{A_1A_1'} - b_{B_3B_3'}}{k_2 - k_1}; Y_V = \frac{b_{A_1A_1'} - b_{B_3B_3'}}{k_2 - k_1} \cdot k_2 + b_{B_3B_3'}.$$

В приведенных выражениях X_S , Y_S – координаты точки S; X_T , Y_T – координаты точки T; X_Q , Y_Q – координаты точки Q; X_V , Y_V – координаты точки V; $b_{A_1A_1'}$, $b_{A_2A_2'}$, $b_{A_3A_3'}$, $b_{A_4A_4'}$, $b_{B_1B_1'}$, $b_{B_2B_2'}$, $b_{B_3B_3'}$, $b_{B_4B_4'}$ – постоянные параметры реализуемой прямолинейной траектории, выражаемые через прямые A_1A_1' , A_2A_2' , A_3A_3' , A_4A_4' , B_1B_1' , B_2B_2' , B_3B_3' , B_4B_4' соответственно; k_1 , k_2 – угловые коэффициенты реализуемой прямолинейной траектории каждого из позиционеров КП1 и КП2 соответственно.

Правило приоритетов движения следующее: преимущество при движении имеет тот позиционер, который первым войдет в общую зону. Для определения моментов времени, в которые позиционеры КП1 и КП2 войдут в общую зону, используем следующие выражения:

$$t_{1in} = \frac{\sqrt{(X_{A_3} - X_Q)^2 + (Y_{A_3} - Y_Q)^2}}{v_1};$$

$$t_{2in} = \frac{\sqrt{(X_{B_4} - X_S)^2 + (Y_{B_4} - Y_S)^2}}{v_2},$$

где X_{B_4}, Y_{B_4} – координаты точки B_4 ; X_{A_3}, Y_{A_3} – координаты точки A_3 ; v_1, v_2 – скорость движения позиционеров КП1 и КП2 соответственно.

Из сравнения значений t_{1in} и t_{2in} определяется позиционер, который имеет приоритет. Предположим, что $t_{1in} < t_{2in}$. Тогда приоритет движения имеет позиционер КП1, то есть он может двигаться без остановок. Позиционер КП2 не может войти в общую зону, пока в ней находится позиционер КП1. Момент времени, в который позиционер КП1 покинет общую зону, определяется из выражения

$$t_{1out} = \frac{\sqrt{(X_{A_1} - X_V)^2 + (Y_{A_1} - Y_V)^2}}{v_1},$$

где X_{A_1}, Y_{A_1} – координаты точки A_1 .

Если $t_{2in} < t_{1out}$, то позиционер КП2 должен остановиться на время, равное

$$\Delta t = t_{1out} - t_{2in}.$$

В момент времени $t = t_{2in} + \Delta t$ позиционер КП2 может продолжить свое движение.

Аналогично производятся расчет моментов времени входа и выхода позиционеров КП1, КП2 и КП3 в другие общие зоны, анализ этих моментов и принятие решения о разрешении или запрещении движения соответствующего позиционера.

На основе предложенной математической модели разработан аналитический алгоритм решения задачи коллизии для трех позиционеров при их равномерном движении. Приведем последовательность шагов полученного алгоритма предотвращения коллизий:

- 1) расчет шлейфов движения позиционеров;
- 2) определение зон пересечения шлейфов (общих зон) для всех пар позиционеров;
- 3) расчет координат точек входа в общие зоны и выхода из них для всех позиционеров системы;
- 4) определение моментов времени входа в общую зону и выхода из нее для всех позиционеров системы перемещений;
- 5) принятие решения о наличии или отсутствии коллизий на основе анализа рассчитанных моментов времени;
- 6) определение действий для предотвращения коллизий.

Особенности построения системы управления универсального сборочного модуля на основе технологии EtherCAT

Вычислительные процедуры, осуществляющие построение программируемых движений, реализуются, как правило, в контроллере системы управления, аппаратная часть которого строится на базе процессора цифровой обработки сигналов. При этом на один контроллер возложены и функции интерпретации и обработки команд управления верхнего уровня, и учета информационных сигналов датчиков обратных связей, и формирования управляющих сигналов для большого числа выходных контуров модулей движения, что приводит к ограниченному быстродействию системы управления. Современная технология EtherCAT [5] позволяет преодолеть эти ограничения.

EtherCAT – это промышленная шина на базе Ethernet, в которой не используется такой режим, когда пакет Ethernet сначала принимается, потом интерпретируется, а затем формируется ответный пакет от устройства ввода/вывода, содержащий данные технологического процесса. Каждое ведомое (управляемое) EtherCAT-устройство считывает адресованные ему данные во

время передачи кадра следующему устройству. Кадр, отправленный ведущим устройством, передается каждому следующему устройству, пока не достигнет конца сегмента, и последнее устройство отправляет кадр назад ведущему устройству по второй витой паре. Ведущие (управляющие) EtherCAT-устройства обычно реализуются программно с использованием стандартного оборудования Ethernet, а ведомые (управляемые) устройства содержат встроенные контроллеры, обеспечивающие обработку пакета.

В сети EtherCAT один-единственный Ethernet-кадр включает входные и выходные данные многих устройств, при этом реальное использование полосы пропускания достигает 90 % и более. Типичное время цикла шины EtherCAT составляет 50...250 мкс, в то время как в традиционных промышленных шинах на каждое обновление требуется 5...15 мс, то есть медленнее от 20 до 300 раз.

При использовании EtherCAT для управления сервоприводом во всех трех режимах его работы («циклический синхронный момент», «циклическая синхронная скорость» и «циклическая синхронная позиция») контур управления замыкается через EtherCAT. Планирование перемещения и координация программируемых движений при этом выполняются внутри центрального процессора контроллера сети, реализованного, например, на базе персонального компьютера. Приводы, поддерживающие эти режимы, имеют очень маленький набор локальных параметров и весьма просты в конфигурировании и обслуживании.

В приводах с классическими способами управления или при использовании низкопроизводительных промышленных шин формирование траектории и планирование пути осуществляются в самом приводе, и для координации движения по разным осям зачастую требуются специальные каналы связи между приводами, скорость обмена по которым не превосходит нормальную частоту сканирования. Эти приводы сами по себе гораздо сложнее и, как следствие, дороже в разработке по сравнению с типовым приводом на основе EtherCAT, который может быть менее «интеллектуальным», но более быстрым.

ALGORITHMIZATION OF NON-COLLISION MOTIONS OF PLANAR POSITIONERS OF UNIVERSAL ASSEMBLY UNIT

V.V. POLIAKOVSKI, D.G. BEGUN, I.V. DAINIAK

Abstract

The structure of universal assembly unit was described; the unit includes six or more planar positioners moving on one stator in the general workspace. The algorithm of non-collision displacements was proposed for the trajectory planning of simultaneous motion of several positioners; the algorithm is built on the analysis of trajectories, the configuration of forbidden zones and the priority rule, it is intended for implementation in the control system of assembly unit. The features and benefits of control system of servo-drives and precision motion systems which is realized using EtherCAT technology were described.

Список литературы

1. Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В. // Докл. БГУИР. 2014. № 2 (80). С. 60–72.
2. Системы многокоординатных перемещений и исполнительные механизмы для прецизионного технологического оборудования / Под ред. С.Е. Карповича. Минск, 2013.
3. Карпович С.Е., Жарский В.В., Дайняк И.В. Системы перемещений на основе привода прямого действия. Минск, 2008.
4. Жарский В.В. // Оборудование: рынок, предложение, цены: промышленный журнал. 2006. № 02 (110). С. 90–97.
5. Бегун Д.Г. // Матер. Междунар. науч.-техн. конф., приуроченной к 50-летию МРТИ-БГУИР, Минск, 18–19 мар. 2014 г. С. 101–103.

УДК 621.396.96

ВЫБОР СИСТЕМЫ БАЗИСНЫХ ФУНКЦИЙ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ МНОГОМЕРНЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ РЕШАЮЩЕЙ СТАТИСТИКИ БАЙЕСОВСКИХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ

А.С. ХРАМЕНКОВ, С.Н. ЯРМОЛИК

Военная академия Республики Беларусь
Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь

Поступила в редакцию 25 марта 2015

Для аппроксимации многомерного распределения решающей статистики устройства радиолокационного распознавания в качестве весовой функции предлагается использовать оценки одномерных сечений анализируемой плотности. Приведена методика получения оценок одномерных распределений квадратичной формы, используемых в качестве весовых функций. Описан способ получения системы неклассических ортогональных полиномов по заданной весовой функции. Представлены результаты аналитического расчета условных вероятностей распознавания при использовании предложенных весовых функций для аппроксимации многомерного распределения решающей статистики и результаты, полученные с помощью математического моделирования.

Ключевые слова: многомерная плотность вероятности, весовая функция, полиномиальная аппроксимация, характеристическая функция.

Введение и постановка задачи

Байесовское устройство радиолокационного распознавания объектов M классов включает в себя многоканальное устройство обработки сигналов и устройство принятия решения [1]. В большинстве практических случаев наблюдаемые случайные реализации принятых сигналов характеризуются гауссовской плотностью вероятности [2, 3]. В этом случае на выходе каждого из M каналов обработки формируется значение смещенного квадратичного функционала [2]. При наблюдении объекта g -го класса выходной сигнал k -го канала обработки определяется выражением $z_{k/g} = \xi_{g0} \mathbf{R}^k \xi_{g0}^{*T} + a_k$, где $\xi_{g0} = (\xi_1, \dots, \xi_N)$ – дискретная выборка принятого сигнала размером N , состоящая из аддитивной смеси сигнала, отраженного от объекта g -го класса $\xi_g = (\xi_{1g}, \dots, \xi_{Ng})$ и фона $\xi_0 = (\xi_{10}, \dots, \xi_{N0})$; ξ_i , $i = \overline{1, N}$ – i -я комплексная амплитуда входной реализации ξ_{g0} , распределенная по нормальному закону, с корреляционной матрицей $\mathbf{R}_{g+0} = \mathbf{R}_g + \mathbf{R}_0$, $\mathbf{R}_g = \overline{\xi_g^{*T} \xi_g}$ (индекс $*$ – комплексное сопряжение; T – операция транспонирования, $g = \overline{1, M}$) – корреляционная матрица сигнала, $\mathbf{R}_0 = \overline{\xi_0^{*T} \xi_0}$ – корреляционная матрица фона; \mathbf{R}^k – матрица обработки; a_k – смещение ($k = \overline{1, M}$). Правило принятия решения о наблюдении объекта k -го класса имеет вид:

если $z_{k/g} > z_{l/g}$ для всех $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то верно A_k^* .

Эффективность функционирования устройств радиолокационного распознавания объектов характеризуется значениями условных вероятностей правильного и ложного распознавания [1, 2]. Значения рассматриваемых вероятностей принимаемых решений определяются путем интегрирования многомерных плотностей решающей статистики. Для анализа характеристик распознавания решающее правило представляют в следующем виде [2]:

если $z_{kl/g} > 0$ для всех $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$, то верно A_k^* ,

где $z_{kl/g} = z_{k/g} - z_{l/g} = \xi_{g0} \mathbf{R}^{kl} \xi_{g0}^{*T} + a_{kl}$ – межканальная разность; $\mathbf{R}^{kl} = \mathbf{R}^k - \mathbf{R}^l$ – межканальная матрица обработки; $a_{kl} = a_k - a_l$ – межканальная разность смещений.

В этом случае вероятности правильного и ложного распознавания объекта k -го класса при наблюдении цели g -го класса определяются выражениями:

$$D_k = \int_0^{+\infty} \cdots \int_0^{+\infty} p_{k/g}(z_{k1/g}, \dots, z_{kl/g}, \dots, z_{kM/g}) dz_{k1/g} \dots dz_{kl/g} \dots dz_{kM/g}, \quad k, g = \overline{1, M}, l \neq k, \quad (1)$$

$$F_{k/g} = \int_0^{+\infty} \cdots \int_0^{+\infty} p_{k/g}(z_{k1/g}, \dots, z_{kl/g}, \dots, z_{kM/g}) dz_{k1/g} \dots dz_{kl/g} \dots dz_{kM/g}, \quad k, g = \overline{1, M}, l \neq k, \quad (2)$$

где $p_{k/g}(\mathbf{z}) = p_{k/g}(z_{k1/g}, \dots, z_{kl/g}, \dots, z_{kM/g})$ – условная плотность вероятности случайных величин $z_{kl/g}$, формируемых при наблюдении объекта g -го класса.

Отсутствие точного аналитического описания закона распределения $p_{k/g}(\mathbf{z})$ обуславливает необходимость приближенного представления многомерной плотности вероятности случайной величины \mathbf{z} с помощью усеченного ряда, основанного на семействе ортогональных полиномов и их весовых функциях [3, 4].

На основе известного разложения двумерного распределения в ряды по ортогональным полиномам [3, 4] в [5] приведено выражение для многомерной плотности вероятности $p_{k/g}(\mathbf{z})$:

$$p_{k/g}(\mathbf{z}) = \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq k}}^M \varphi_l(z_{kl/g}) \sum_{t_1=0}^{\infty} \cdots \sum_{t_M=0}^{\infty} c_{t_1 \dots t_M} Q_{t_1}(z_{k1/g}) \dots Q_{t_M}(z_{kM/g}), \quad (3)$$

где $\varphi_l(z_{kl/g})$, $l = \overline{1, M}$, $l \neq k$ – весовые функции используемого полинома;

$Q_n(z_{kl/g}) = \sum_{p=0}^n q_{n/p}^{kl/g} z_{kl/g}^p$ – n -й ортонормированный полином; $q_{n/p}^{kl/g}$ – коэффициенты n -го ортонормированного полинома, стоящего у переменной $z_{kl/g}$ в степени p ; $c_{t_1 \dots t_M}$ – весовые коэффициенты разложения в ряд.

Методика использования полиномиальных рядов для аппроксимации многомерного распределения (3) характеризуется относительной простотой и доступностью. В связи с этим на первый план выходит выбор наиболее предпочтительной системы базисных функций для обеспечения максимальной скорости сходимости ряда. На сегодняшний момент не существует оптимального правила выбора весовых функций $\varphi_l(z_{kl/g})$, однако известно, что скорость сходимости полиномиального ряда напрямую определяется степенью соответствия выбранной системы весовых функций аппроксимируемому распределению [3, 4]. В статье предлагается способ получения наиболее предпочтительных весовых функций и рассматривается методика синтеза соответствующей системы ортогональных полиномов, обеспечивающих высокое качество аппроксимации многомерных распределений $p_{k/g}(\mathbf{z})$ и быструю сходимость степенного ряда.

Основная часть

Выбор весовой функции. Для качественной аппроксимации многомерного распределения $p_{k/g}(\mathbf{z})$ целесообразно каждой одномерной плотности вероятности $p_l(z_{kl/g})$ максимально точно подобрать подходящую систему ортогональных полиномов со своей весовой функцией $\varphi_l(z_{kl/g})$. Чаще всего, исходя из имеющихся априорных сведений о типе распределения, при аппроксимации ограничиваются рассмотрением разложений, основанных на использовании полиномов с весовой функцией в виде нормального закона распределения (ряд Грама-Шарлье, ряд Эджворта, разложение Мелера в ряд Эрмита, разложение Корниша-Фишера) [3–5]. Исследования показали, что применительно к радиолокационным

классификаторам одномерные сечения многомерной плотности $p_{k/g}(\mathbf{z})$ значительно отличаются от нормального закона распределения, что существенно затрудняет практическое использование названных систем полиномов. Для подтверждения сказанного выше на рис. 1 приведены результаты аппроксимации распределения $p_l(z_{kl/g})$ с помощью ряда Эрмита, рассчитанного для следующих условий: отраженный сигнал характеризуется дисперсией $\sigma_c^2 = 25$ и экспоненциальной нормированной корреляционной функцией флуктуаций, межканальная матрица обработки \mathbf{R}^{kl} размером $N = 10, 100$ формируется с шагом дискретизации $\Delta t = 4$ мс; отношение сигнал-шум $\rho = 10$.

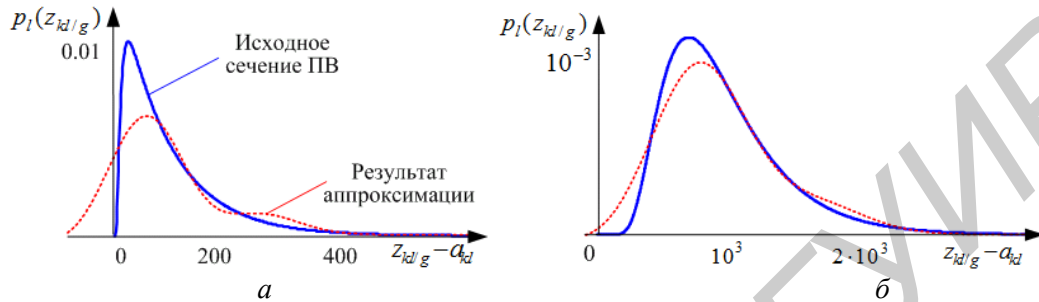


Рис. 1. Аппроксимация $p_l(z_{kl/g})$ с помощью полиномов Эрмита ($n = 4$) для: $a - N = 10$; $b - N = 100$

При аппроксимации унимодальных распределений, отличных от нормального, возможно использовать ряд, основанный на полиномах Лагерра [3, 5] (рис. 2). Рассматриваемые полиномы характеризуются положительным интервалом ортогональности, что в значительной мере затрудняет их практическое использование. К тому же, для обеспечения качественной аппроксимации усеченным рядом Лагерра требуется большое число членов ряда.

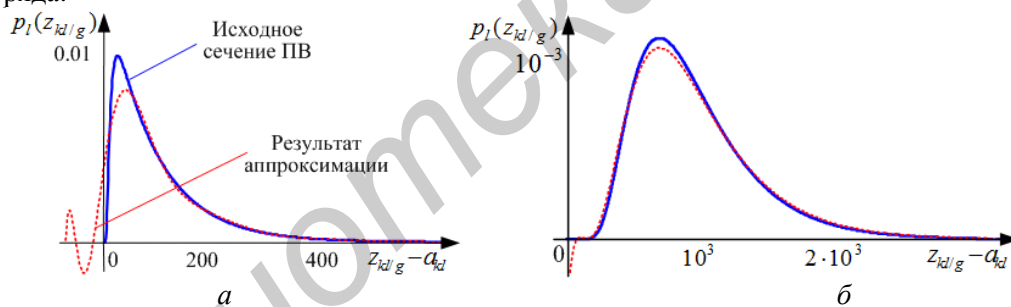


Рис. 2. Аппроксимация $p_l(z_{kl/g})$ с помощью полиномов Лагерра ($n = 30$) для: $a - N = 10$; $b - N = 100$

В [6] рассматриваются неклассические полиномы Поллачека, использование которых позволяет приемлемо аппроксимировать любой двусторонний закон распределения, значительно отличающийся от нормального (рис. 3). Недостатком предлагаемого подхода является необходимость поиска оптимальных значений двух параметров функции Поллачека [6]. При этом имеющийся диапазон изменения параметров весовой функции в ряде практически важных случаев не позволяет обеспечить требуемое качество аппроксимации.

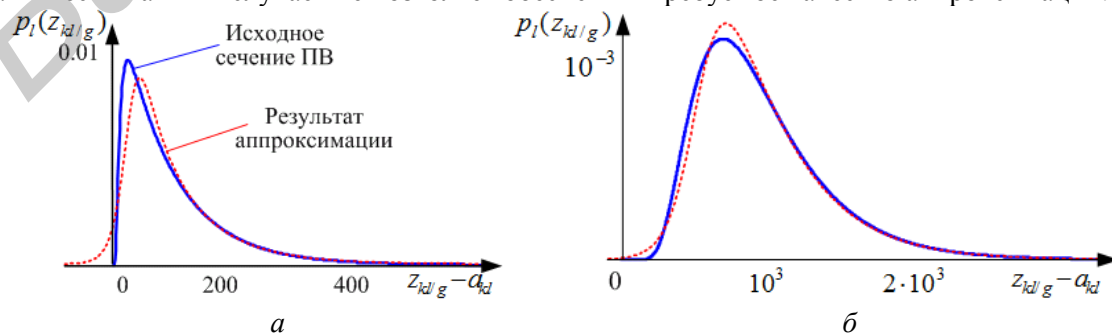


Рис. 3. Аппроксимация $p_l(z_{kl/g})$ с помощью полиномов Поллачека ($n = 1$) для: $a - N = 10$; $b - N = 100$

Анализ выражений усеченного аппроксимирующего ряда (3) показывает, что весовые функции $\varphi_l(z_{kl/g})$ могут рассматриваться как одномерные сечения многомерной плотности $p_{k/g}(\mathbf{z})$. Поэтому в качестве весовой функции $\varphi_l(z_{kl/g})$ предлагается использовать оценки одномерных сечений многомерной плотности $\hat{p}_l(z_{kl/g})$, формируемые для анализируемых условий наблюдения. Одна из первых попыток получения аналитического выражения для распределения квадратичной формы от стационарного гауссовского процесса $\hat{p}_l(z_{kl/g})$ предпринята в [7] и базируется на вычислении значений характеристической функции $\theta_z(v)$ с помощью теории вычетов. Однако полученная методика характеризуется сложностью реализации и не нашла практического применения. В [8] предложен способ получения оценки $\hat{p}_l(z_{kl/g})$, также основанный на преобразовании ее характеристической функции. Описанный подход характеризуется относительной простотой и позволяет получить оценку распределения, наиболее точно соответствующую анализируемой плотности вероятности $p_l(z_{kl/g})$.

Представление одномерных распределений решающей статистики в устройствах радиолокационного распознавания.

В основу получения оценок плотности вероятности одномерной случайной величины $z_{kl/g}$ положим методику, приведенную в [8]. Известно [3, 4], что плотность вероятности выражается через ее характеристическую функцию:

$$\hat{p}_l(z_{kl/g}) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \theta_z(v) \exp(-jvz_{kl/g}) dv.$$

На основе формулы Эйлера это выражение может быть представлено в виде

$$\hat{p}_l(z_{kl/g}) = \frac{1}{2\pi} \left(\int_{-\infty}^0 \theta_z(v) (\cos(vz_{kl/g}) - j \sin(vz_{kl/g})) dv + \int_0^{+\infty} \theta_z(v) (\cos(vz_{kl/g}) - j \sin(vz_{kl/g})) dv \right).$$

Заменив в первом слагаемом переменную интегрирования v на $-v$ и с учетом того, что $\theta_z^*(v) = \theta_z(-v)$, получим:

$$\hat{p}_l(z_{kl/g}) = \frac{1}{2\pi} \left(\int_0^{+\infty} (\theta_z(v) + \theta_z^*(v)) \cos(vz_{kl/g}) dv - j \int_0^{+\infty} (\theta_z(v) - \theta_z^*(v)) \sin(vz_{kl/g}) dv \right). \quad (4)$$

Характеристическая функция случайной величины $z_{kl/g}$ на выходе канала обработки при нормальнораспределенном комплексном входном сигнале ξ_{g0} определяется выражением [9]:

$$\theta_z(v) = \frac{\exp(jva_{kl})}{\det[\mathbf{I} - jv\boldsymbol{\chi}]} = A(v) + jB(v), \quad (5)$$

где v – некоторая вещественная переменная; \mathbf{I} – единичная матрица; $\boldsymbol{\chi} = \mathbf{R}_{g0} \mathbf{R}^{kl}$ – определяющая матрица; $A(v)$ – действительная часть характеристической функции; $B(v)$ – мнимая часть характеристической функции.

Подставив (5) в (4), получим окончательное выражение для одномерного распределения:

$$\hat{p}_l(z_{kl/g}) = \frac{1}{\pi} \left(\int_0^{+\infty} A(v) \cos(vz_{kl/g}) dv + \int_0^{+\infty} B(v) \sin(vz_{kl/g}) dv \right), \quad -\infty \leq z_{kl/g} \leq +\infty. \quad (6)$$

Таким образом, оценка $\hat{p}_l(z_{kl/g})$ сводится к поиску реальной и мнимой частей характеристической функции и затрудняется лишь нахождением определителя $\det[\mathbf{I} - jv\boldsymbol{\chi}]$. Расчет $\det[\mathbf{I} - jv\boldsymbol{\chi}]$ при каждом значении v может быть организован по-разному [9]. В [8] предлагается представить определяющую матрицу $\boldsymbol{\chi}$ в виде диагональной. При этом определитель такой матрицы будет равен произведению ее диагональных элементов

(собственных значений c): $\det[\mathbf{I} - j\nu\boldsymbol{\chi}] = \prod_{n=1}^N (1 - j\nu c_n)$, где N – размерность определяющей матрицы $\boldsymbol{\chi}$; c – собственные значения определяющей матрицы $\boldsymbol{\chi}$.

С учетом вышеизложенного, выражения для $A(\nu)$ и $B(\nu)$ принимают следующий вид:

$$A(\nu) = \operatorname{Re} \left[\frac{\exp(j\nu a_{kl})}{\prod_{n=1}^N (1 - j\nu c_n)} \right], \quad B(\nu) = \operatorname{Im} \left[\frac{\exp(j\nu a_{kl})}{\prod_{n=1}^N (1 - j\nu c_n)} \right]. \quad (7)$$

Таким образом, для получения оценки одномерной плотности вероятности $\hat{p}_l(z_{kl/g})$ требуется найти собственные значения c определяющей матрицы $\boldsymbol{\chi}$, получить действительную и мнимую части характеристической функции (7) и подставить их в выражение (6). На рис. 4 приведены оценки распределения $\hat{p}_l(z_{kl/g})$, найденные по указанной методике и гистограммы анализируемой плотности вероятности $p_l(z_{kl/g})$.

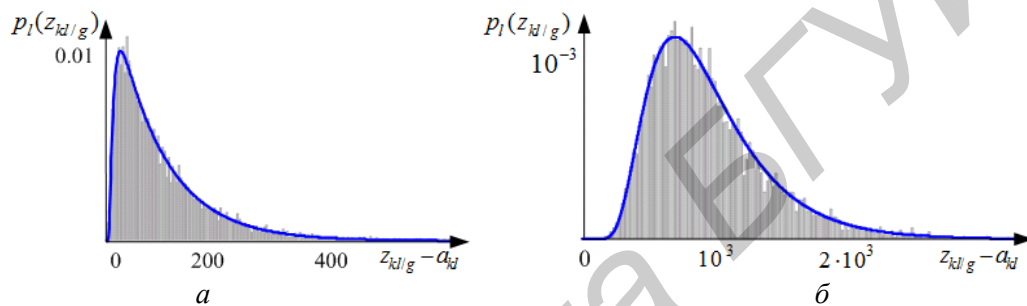


Рис. 4. Оценка $\hat{p}_l(z_{kl/g})$ и гистограмма $p_l(z_{kl/g})$ для: $a - N = 10$; $b - N = 100$.

Сформированные оценки одномерных распределений предлагается использовать в качестве весовых функций для каждого анализируемого сечения многомерной плотности вероятностей: $\varphi_l(z_{kl/g}) = \hat{p}_l(z_{kl/g})$. Выбранная весовая функция обеспечивает наилучшее качество среди рассмотренных и максимальную скорость сходимости ряда.

Синтез неклассических ортогональных полиномов, соответствующих выбранной весовой функции.

Используемые для аппроксимаций вероятностных распределений семейства полиномов (3) неразрывно связаны с соответствующими весовыми функциями [3, 4, 10]. Выбранная весовая функция $\varphi_l(z_{kl/g})$, в свою очередь, полностью определяет соответствующую систему ортогональных многочленов. Для их определения предлагается использовать возможность представления многочлена на основе определителей Грама n -го порядка ($n \geq 1$) и степенных моментов весовой функции [10]. В этом случае искомым n -й ортогональный полином, соответствующий оцененной одномерной плотности вероятности $\hat{p}_l(z_{kl/g})$, выступающей в роли весовой функция $\varphi_l(z_{kl/g})$, определяется выражением:

$$Q_n(z_{kl/g}) = \frac{1}{\sqrt{\Delta_{n-1} \cdot \Delta_n}} \cdot \begin{vmatrix} m_0 & m_1 & \dots & m_n \\ m_1 & m_2 & \dots & m_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_{n-1} & m_n & \dots & m_{2n-1} \\ 1 & z_{kl/g} & \dots & z_{kl/g}^n \end{vmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\Delta_{n-1} \cdot \Delta_n}} (r_{n/n}^{kl/g} z_{kl/g}^n + \dots + r_{n/1}^{kl/g} z_{kl/g} + r_{n/0}^{kl/g}) =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{\Delta_{n-1} \cdot \Delta_n}} \cdot R_n(z_{kl/g}), \quad (8)$$

где $\Delta_n = \begin{vmatrix} m_0 & m_1 & \dots & m_n \\ m_1 & m_2 & \dots & m_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_n & m_{n+1} & \dots & m_{2n} \end{vmatrix}$ – определитель Грама n -го порядка ($\Delta_n \neq 0$);

$m_i = \int_{-\infty}^{+\infty} \hat{p}_l(z_{kl/g}) z_{kl/g}^i dz_{kl/g}$, ($i = 0, \dots, 2n$) – i -й момент используемого одномерного распределения.

Для нахождения коэффициентов $r_{n/p}^{kl/g}$ полинома $R_n(z_{kl/g})$ (8) можно воспользоваться алгебраическим свойством ортогональных многочленов [10]. Для этого необходимо провести нормировку полинома $R_n(z_{kl/g})$ так, чтобы коэффициент при главном члене $r_{n/n}^{kl/g} = 1$, тогда полиномы вычисляются по трехчленной рекуррентной формуле:

$$R_{n+1}(z_{kl/g}) = (z_{kl/g} - \alpha_n)R_n(z_{kl/g}) - \gamma_n R_{n-1}(z_{kl/g}),$$

где $\alpha_n = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} z_{kl/g} p_l(z_{kl/g}) R_n(z_{kl/g}) R_n(z_{kl/g}) dz_{kl/g}}{\int_{-\infty}^{+\infty} p_l(z_{kl/g}) R_n(z_{kl/g}) R_n(z_{kl/g}) dz_{kl/g}}$, $\gamma_n = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} p_l(z_{kl/g}) R_n(z_{kl/g}) R_n(z_{kl/g}) dz_{kl/g}}{\int_{-\infty}^{+\infty} p_l(z_{kl/g}) R_{n-1}(z_{kl/g}) R_{n-1}(z_{kl/g}) dz_{kl/g}}$ –

коэффициенты нормировки. При этом для $n=0$ $R_{-1}(z_{kl/g}) = 0$.

Приведенные выражения (6) и (8) позволяют синтезировать требуемое семейство неклассических ортонормированных полиномов, соответствующее текущим условиям наблюдения.

Результаты расчета показателей качества распознавания объектов.

Для проверки качества аппроксимации многомерного распределения $p_{k/g}(\mathbf{z})$ с помощью предложенной системы весовых функций был произведен расчет вероятностей распознавания объектов 3-х классов. При этом наблюдались зашумленные 10-элементные коррелированные радиолокационные портреты объектов, характеризующиеся экспоненциальной формой корреляционной функции. Полуширина главного лепестка корреляционной функции каждого из классов соответственно равнялась $\tau_{c1} = 200$ мс, $\tau_{c2} = 80$ мс и $\tau_{c3} = 30$ мс. Для анализируемого диапазона отношений сигнал-шум при расчетах условных вероятностей правильного D_k (1) и ложного распознавания $F_{k/g}$ (2) использована методика, основанная на оценивании распределений одномерных сечений и синтезе системы ортогональных полиномов. Результирующие показатели качества распознавания определялись известными [2] выражениями:

$$D_k = F_{k/k}, F_k = \frac{1}{2} \sum_{g=1, g \neq k}^3 F_{k/g}, k=1..3.$$

Результаты аналитических расчетов в виде зависимости вероятностей распознавания от значения отношения сигнал-шум, приведены на рис. 5, а.

Полученные результаты были подтверждены методом статистического моделирования процесса принятия решения системой распознавания, работающей по реализациям входных портретов с аналогичными параметрами наблюдаемых объектов. Результаты численного математического моделирования приведены на рис. 5, б. Высокая степень схожести результатов аналитического расчета и статистического моделирования подтверждают высокое качество аппроксимации результирующего закона распределения при использовании весовых функций в форме оценок одномерных распределений решающей статистики.

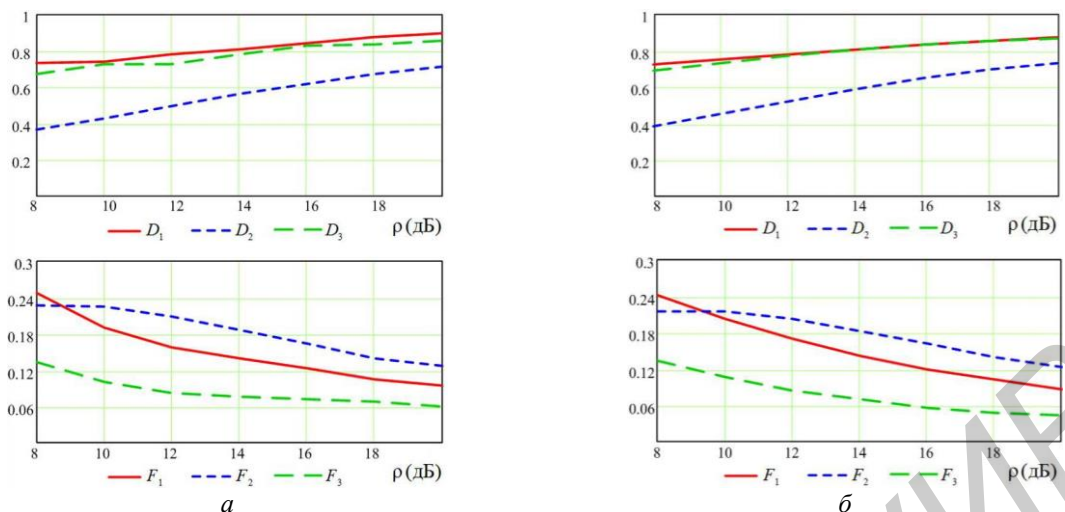


Рис. 5. Условные вероятности принятия решений при радиолокационном распознавании объектов: *a* – результаты аналитического расчета; *б* – результаты статистического моделирования

Заключение

Полученные результаты позволяют утверждать, что предложенная методика получения весовой функции и синтеза соответствующей системы ортогональных полиномов существенно расширяет возможности известных полиномиальных разложений многомерных распределений, обеспечивает высокое качество аппроксимации за счет оптимизации базисных весовых функций, является практически реализуемой и позволяет определять вероятностные показатели качества устройств радиолокационного распознавания.

ORTHOGONAL POLYNOMS CHOICE FOR REPRESENTATION OF A SOLVING STATISTICS MULTIDIMENSIONAL DISTRIBUTION OF BAYESIAN RADAR RECOGNITION DEVICES

A.S. KHRAMIANKOU, S.N. YARMOLIK

Abstract

For approximation of a solving statistics multivariant distribution in the radar-tracking recognition device as a weight function is used evaluations of one-dimensional cuts analyzed denseness. The deriving technique of weight function estimation is reduced. The getting method of nonclassical orthogonal polynomials system on the set weight function is described. Analytical calculation results of recognition conditional probabilities are presented at use of the offered weight function for approximation of solving statistics multivariant distribution and results getting by means of statistical modelling.

Список литературы

1. Горелик А.Л., Барабаш Ю.Л., Кривошеев О.В. Селекция и распознавание на основе локационной информации. М., 1990.
2. Охрименко А. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации. М., 1983.
3. Левин Б.Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М., 1989.
4. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М., 1982.
5. Шалютин С.В. // Электромагнитные волны и электронные системы. 2000. Т. 1. № 1. С. 12–21.
6. Ярмолик С.Н., Шалютин С.В. // Докл. БГУИР. 2003. Т. 1. № 3. С. 28–32.
7. Проскурин В.И. // Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30. № 7. С. 1335–1340.
8. Леховицкий Д.И., Флексер П.М., Полишко С.В. // Прикладная радиоэлектроника. 2011. Т. 10. № 4. С. 456–461.
9. Миддлтон Д. Введение в статистическую теорию связи. Т. 2. М., 1962.
10. Суетин П.К. Классические ортогональные многочлены. М., 1976.

УДК 621.391.82

НОВАЯ МОДИФИКАЦИЯ РАМОЧНОЙ АНТЕННЫ

О.А. ЮРЦЕВ, Ю.Ю. БОБКОВ, В.В. КЕДА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 19 января 2015

Описывается новая конструкция рамочной антенны, в которой можно получить 4 линейных поляризации: вертикальную, горизонтальную и две наклонных с плоскостью поляризации под углом $\pm 45^\circ$ по отношению к горизонту. Приводятся результаты численного моделирования.

Ключевые слова: рамочная антенна, переключение поляризации, метод интегральных уравнений.

Введение

Управление поляризацией излучения используется в радиолокационных станциях для повышения помехоустойчивости. Такая возможность реализуется в антеннах определенной конструкцией. Обычно для этого используются линейные вибраторы, расположенные по отношению друг друга под углом 90° и возбуждаемые по развязанным входам. Используются также рупорные антенны, возбуждаемые на волнах H_{10} и H_{01} по развязанным входам. Рамочные антенны превосходят вибраторные антенны по своим диапазонным свойствам и коэффициенту направленного действия. Однако рамочные антенны с управляемой поляризацией в литературе, насколько известно, не описаны, кроме работы [1]. Настоящая статья является продолжением работы [1]. Более подробно описывается конструкция антенны и результаты ее численного моделирования методом интегральных уравнений в тонкопроволочном приближении.

Конструкция антенны

На рис. 1 и 2 схематически показана конструкция рамочной антенны с управляемой поляризацией в системе координат X, Y, Z . Плоскость рамок совпадает плоскостью XY .

На рис. 1 обозначено: 1 – четырехэлементная рамка; 2 – согласующие элементы антенны; 3 – металлические стойки; 4 – рефлектор. Короткие прямолинейные проводники, соединяющие соседние стороны рамок в центре системы рамок и на периферии этой системы, называются далее перемычками. Перемычки показаны на рис. 2 (обозначены только на верхней рамке).

На рис. 2 обозначено: D – длина перемычек в углах рамок; A_0 – радиус проводников антенны; L – длина стороны рамок; L_e – длина согласующего элемента; Y_e – координата места включения согласующего элемента относительно центра антенны; D_z – расстояние между плоскостью рамок и плоскостью рефлектора (на рис. 1 не показано); D_e – длина стороны квадратного рефлектора; N_e – число проводников рефлектора, кроме внешних (на рис. 1 и 2 $N_e = 3$); A – центральная часть антенны, в которой производится переключение поляризации. Схемы возбуждения рамок для получения различных видов поляризации показаны на рис. 3.

Согласующие элементы гальванически связаны со сторонами рамок, и все элементы антенны имеют гальванический контакт с рефлектором. Поэтому узел возбуждения может быть сделан так же, как в рамочных антеннах с двумя рамками и одной линейной поляризацией: кабель питания должен проходить по металлической стойке, по двум сторонам одной рамки к

переключателю поляризации, обеспечивающему коммутацию входов, показанных на рис.3. Буквами «*m*» и «*n*» обозначены точки подключения внешнего и внутреннего проводников коаксиального кабеля питания.

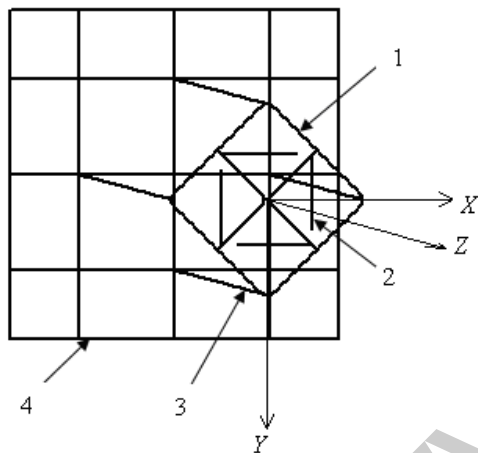


Рис. 1. Рамочная антенна

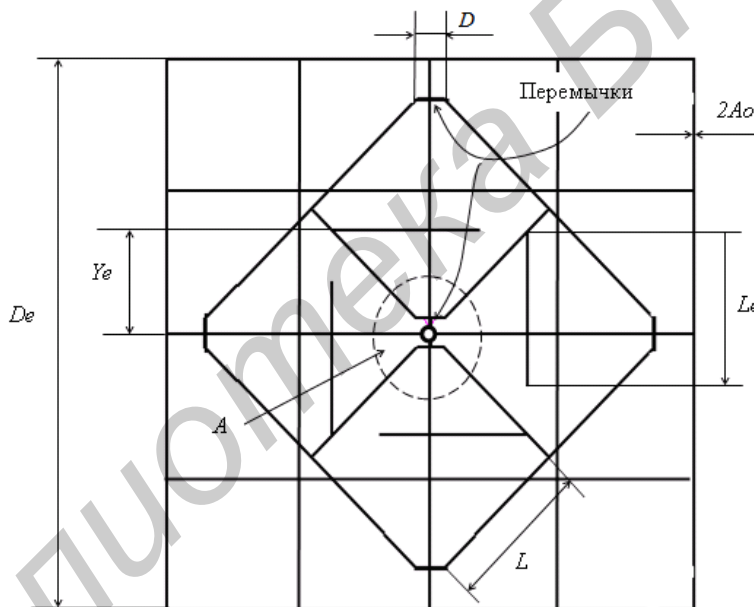


Рис. 2. Элементы рамочной антенны

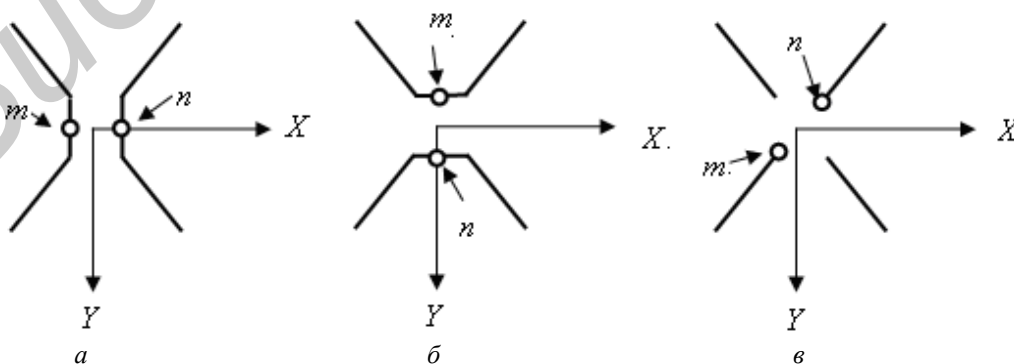


Рис. 3. Схемы возбуждения антенны для получения различной поляризации: *a* – линейная горизонтальная; *б* – линейная вертикальная; *в* – линейная наклонная

Метод анализа

Анализ предлагаемой конструкции проводился численно с помощью разработанной программы. В программе использован метод моментов применительно к интегральному уравнению для тока в тонких проводниках Поклингтона [2]. В результате применения метода моментов с использованием кусочно-постоянных базисных и весовых функций интегральное уравнение сводится к системе линейных алгебраических уравнений:

$$\sum_{m=1}^M I_m K_{mn} = -iU, \quad (1)$$

где M – число сегментов, на которые разделен весь проводник длиной L ; m – номер сегмента, на котором расположена точка определения тока в проводнике ($1 \leq m \leq M$); I_m – комплексная амплитуда тока в центре сегмента с номером m ; n – номер сегмента, на котором расположена точка выполнения граничного условия, из которого выводится интегральное уравнение, и номер уравнения системы уравнений ($1 \leq n \leq M$).

$$K_{mn} = A_{mn} + B_{mn} + i(C_{mn} + D_{mn}); \quad (2)$$

$$A_{mn} = 30k \int_{\Delta L_p} \int_{\Delta L_q} \frac{\cos kR}{R} dl_p \cdot dl_q; \quad C_{mn} = -30k \int_{\Delta L_p} \int_{\Delta L_q} \frac{\sin kR}{R} dl_p \cdot dl_q; \quad (3)$$

$$B_{mn} = -30k \left[\frac{\cos(kR_{22})}{R_{22}} - \frac{\cos(kR_{12})}{R_{12}} - \frac{\cos(kR_{21})}{R_{21}} + \frac{\cos(kR_{11})}{R_{11}} \right]; \quad (4)$$

$$D_{mn} = -30k \left[\frac{\sin(kR_{22})}{R_{22}} - \frac{\sin(kR_{12})}{R_{12}} - \frac{\sin(kR_{21})}{R_{21}} + \frac{\sin(kR_{11})}{R_{11}} \right], \quad (5)$$

где

$$R_{11} = \sqrt{(Xp1 - Xq1)^2 + (Yp1 - Yq1)^2 + (Zp1 - Zq1)^2 + A_o^2}, \quad (6)$$

$$R_{12} = \sqrt{(Xp1 - Xq2)^2 + (Yp1 - Yq2)^2 + (Zp1 - Zq2)^2 + A_o^2}, \quad (7)$$

$$R_{21} = \sqrt{(Xp2 - Xq1)^2 + (Yp2 - Yq1)^2 + (Zp2 - Zq1)^2 + A_o^2}, \quad (8)$$

$$R_{22} = \sqrt{(Xp2 - Xq2)^2 + (Yp2 - Yq2)^2 + (Zp2 - Zq2)^2 + A_o^2}, \quad (9)$$

U – напряжение возбуждения проводника.

В выражениях (6)–(9) под знаком корня стоят координаты начала (с индексом 1) и конца (с индексом 2) сегмента ΔL_p – сегмента, на поверхности которого выполняется граничное условие, использованное при выводе интегрального уравнения, и сегмента ΔL_q – сегмента, в котором определяется ток в проводнике; A_o – радиус проводника.

Математическая модель, описывающая рамочную антенну, включает также ряд соотношений, описывающих: геометрию элементов антенны; поле антенны по основной поляризации и по кроссполяризации, определяемое по току в проводниках; диаграмму направленности; коэффициент направленного действия; входное сопротивление.

Результаты численного моделирования

Разработанная программа позволяет моделировать описанную рамочную антенну и решетки из таких антенн с учетом взаимодействия излучателей. Для тестирования результатов моделирования в программе предусмотрено формирование файла геометрии в формате программы MMANA, построенной с использованием ядра NEC [3]. Эта программа и ядро NEC подвергались тщательному и обширному тестированию на протяжении многих лет, в том числе и сравнением результатов численного моделирования с результатами эксперимента. Использование непосредственно программы MMANA для моделирования описанной антенны проблематично, так как описание ее геометрии в редакторе MMANA практически невозможно

из-за сложности геометрии и необходимости многократного изменения геометрических размеров при поиске оптимизации параметров.

Численное моделирование показало, что все радиотехнические характеристики и параметры антенны – диаграмма направленности (ДН), коэффициент усиления (КУ), отношение КУ в направлении максимума ДН к КУ в обратном направлении (F/B – front to back) зависят от указанных на рис. 2 размеров элементов. Поэтому оптимизация по одному радиотехническому параметру (например, по входному сопротивлению) требует изменения всех геометрических размеров и параметров. При этом меняются и другие характеристики антенны.

Далее приводятся результаты моделирования и оптимизации антенны по входному сопротивлению. В качестве примера рассматривается задача оптимизации геометрических размеров антенны, обеспечивающих получение входного сопротивления 50 Ом на средней частоте 175 МГц при возбуждении линейной вертикальной или горизонтальной поляризации. Приведенные результаты могут быть пересчитаны на другую частоту с использованием известных закономерностей электродинамического масштабирования. Далее рассматривается случай возбуждения горизонтальной поляризации (рис. 3, а). В этом случае плоскостью E (электрической плоскостью) является плоскость XZ , а плоскостью H (магнитной плоскостью) – плоскость YZ . Характеристики антенны для случаев возбуждения рис. 3, а и рис. 3, б одинаковы. Различия только в том, что плоскости E и H меняются местами. В связи с этим далее рассматриваются только случаи рис. 3, а и рис. 3, в.

На рис. 4, а показаны зависимости активной (R) и реактивной (X) частей входного сопротивления антенны от частоты, а на рис. 4, б – зависимость коэффициента стоячей волны (КСВ) в линии передачи с волновым сопротивлением 50 Ом от частоты. Как видно, антенна по уровню КСВ = 2 имеет относительную полосу пропускания

$$\delta f = (f_{\min} - f_{\max}) / f_o = 15 \% .$$

Частота f_o – средняя в диапазоне $f_{\min} \dots f_{\max}$. В этом диапазоне частот активная часть входного сопротивления слабо зависит от частоты, поэтому полосу можно расширить путем компенсации реактивного сопротивления. Такие же результаты по входному сопротивлению – параметра, наиболее сильно зависящего от точности моделирования, дает и программа MMANA.

На рис. 5 показаны ДН в плоскости E для случая рис.3, а по основной и ортогональной поляризации поля на трех частотах, а на рис. 6 – в плоскости H по основной и по ортогональной поляризации. Поле по ортогональной поляризации нормировано к максимуму поля по основной поляризации.

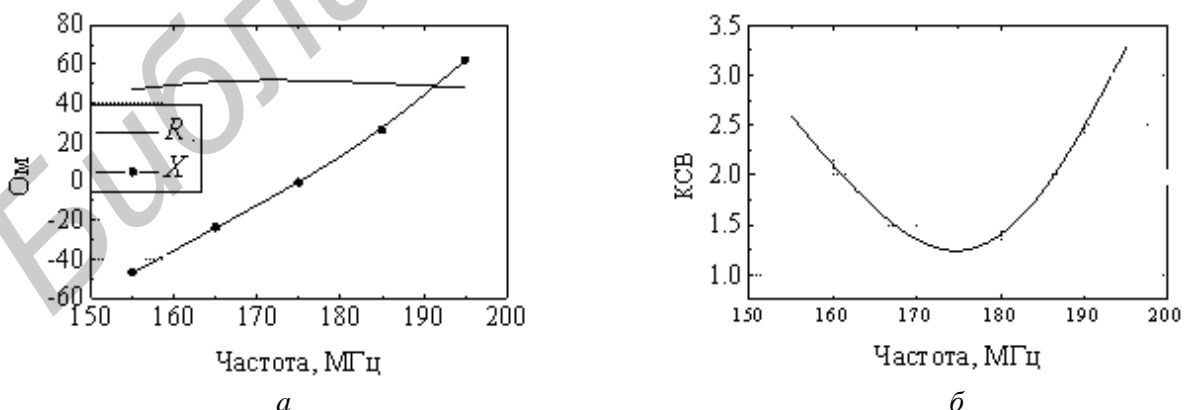


Рис. 4. Зависимость входного сопротивления (а) и КСВ (б) от частоты

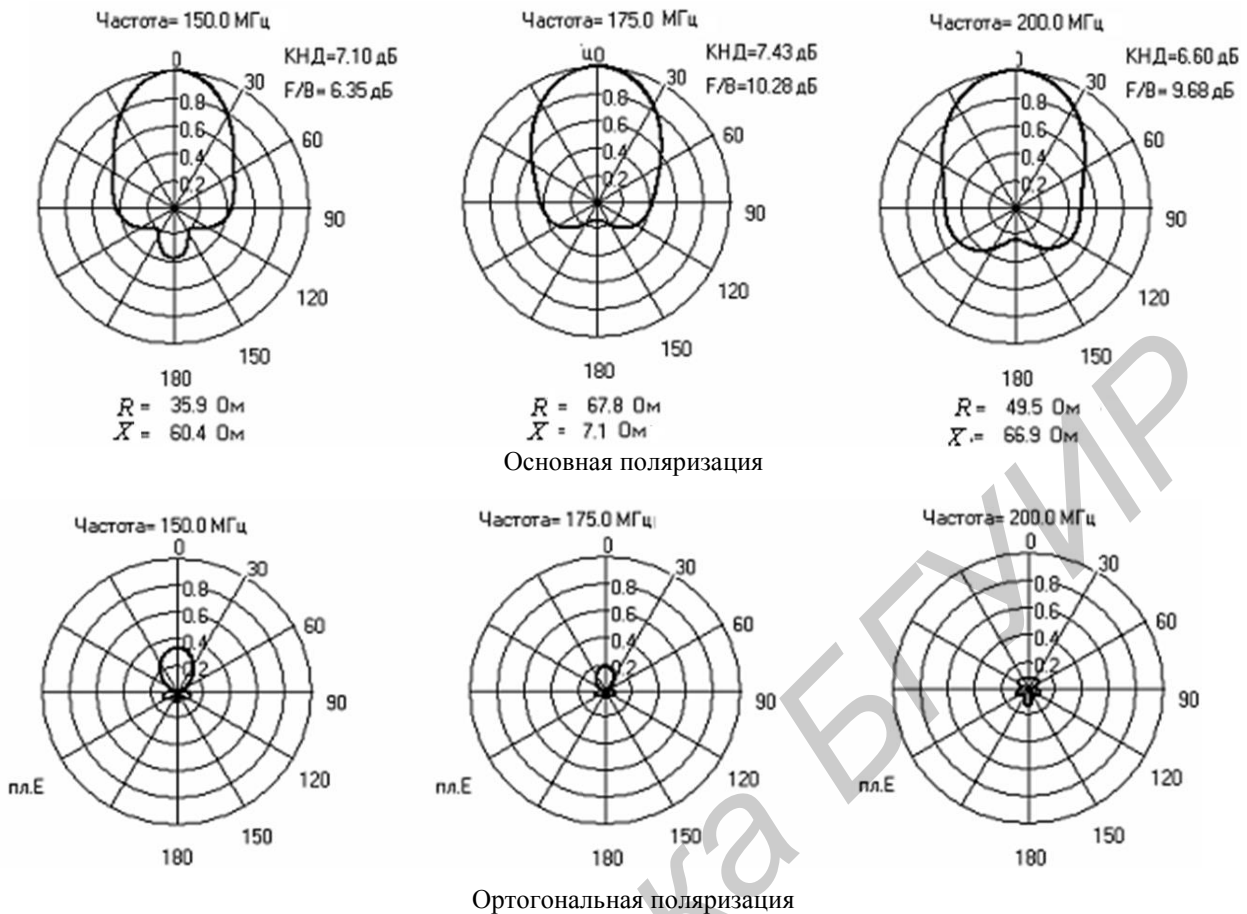


Рис. 5. Диаграммы направленности в плоскости E на трех частотах

Размеры элементов антенны, параметры которой представлены на рис. 4–6: $L = 310$ мм; $L_e = 300$ мм; $Y_e = 175$ мм; $D = 60$ мм; $D_z = 480$ мм; $D_e = 1000$ мм; $A_o = 5$ мм; $N_e = 3$.

Довольно высокий уровень поля по ортогональной поляризации на низких частотах – свойство антенны, так как при возбуждении основной вертикальной (или горизонтальной) поляризации в определенной степени возбуждаются элементы, предназначенные для создания поля по основной поляризации в ортогональной плоскости. Заднее излучение можно уменьшить, варьируя размеры и структуру рефлектора.

При возбуждении наклонной поляризации (рис. 3, в) возрастает КСВ за счет более резкого изменения входного сопротивления в диапазоне частот, что показано на рис. 6. Уровень заднего излучения и излучения по ортогональной поляризации сохраняется таким же, как при линейной горизонтальной поляризации.

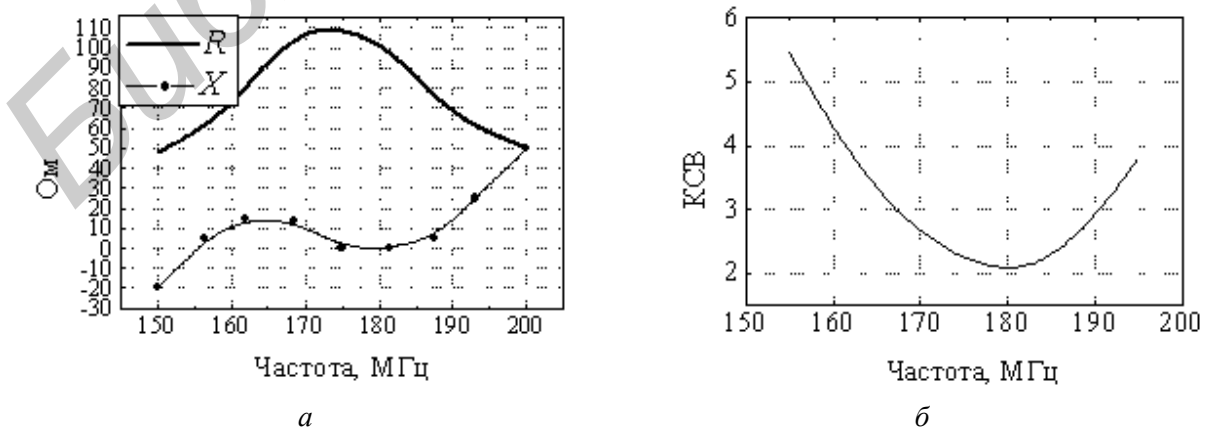


Рис. 6. Зависимость входного сопротивления (а) КСВ (б) от частоты при возбуждении наклонной поляризации

Для проверки достоверности полученных результатов проведено повторное численное моделирование с помощью известной программы MMANA. В этой программе использовано вычислительное ядро NEC, проверенное путем сравнения получаемых результатов с экспериментом на многочисленных конструкциях проволочных антенн. Программа MMANA требует разработки дополнительной программы, описывающей геометрию рамочной антенны. Такая программа авторами сделана и проведено сравнение результатов численного моделирования, полученных с помощью оригинальной программы и программы MMANA. Расхождение результатов близко к погрешностям эксперимента.

Заключение

Предложена и численно исследована новая конструкция рамочной антенны, в которой путем переключения входов можно получить 4 линейных поляризации, отличающихся ориентацией плоскости поляризации в пространстве. Эти 4 положения описываются углом преимущественной поляризации $\gamma = 0, 45, 90, 135^\circ$. Проведенное исследование показывает, что предлагаемая рамочная антенна довольно диапазонна и может быть использована в качестве самостоятельной антенны в системах радиосвязи и в качестве излучателя в антенных решетках. Переключение поляризации увеличивает помехозащищенность радиотехнической системы с антенной решеткой и уровень принимаемого полезного сигнала.

NEW DESIGN MODIFICATIN OF LOOP AERIAL

O.A. YURTSEV, Y.Y. BOBKOV, V.V. KEDA

Abstract

The work is deal with one new design of loop antenna in which the 4 linear polarizations can be achieved: vertical, horizontal and two oblique polarization with angle $\pm 45^\circ$ to horizontal plane. The numerical simulation results are present in the work.

Список литературы

1. *Yurtsev O., Sadovsky I., Ptashinsky G.* // IX International Conference on Antenna Theory and Techniques. Proceedings. Odessa, 2013. P. 361–363.
2. Вычислительные методы в электродинамике / Под ред. Р. Митры. М., 1977.
3. *Гончаренко И.* Компьютерное моделирование антенн. Все о программе MMANA. М., 2002.

УДК 532.528

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ АКТИВНОСТИ АКУСТИЧЕСКОЙ КАВИТАЦИИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ ЖИДКОСТИ

А.В. КОТУХОВ, А.В. КРАСОВСКИЙ, В.В. ШАПЛЫКО, Н.В. ДЕЖКУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 20 января 2015

Исследовалась активность кавитации в неоднородном ультразвуковом поле. Показано, что характер зависимости активности кавитации от температуры существенно зависит от того, в какой точке поля проводится измерение. В частности, вблизи поверхности излучателя и вблизи границы раздела жидкость–газ активность кавитации уменьшается с ростом температуры, а в объеме жидкости имеются точки, в которых зависимости активности кавитации от температуры имеют вид кривой с максимумом.

Ключевые слова: кавитация, ультразвук, активность кавитации, температура.

Введение

Ультразвук используется в настоящее время довольно широко для интенсификации физико-химических процессов в жидкостях [1–3]. Ключевым фактором при этом, как правило, является кавитация – явление образования, пульсаций и захлопывания микропузырьков газа в жидкости под действием переменного давления [4].

Активность кавитации, или другими словами степень ее воздействия на тот или иной процесс определяется концентрацией кавитационных полостей в жидкости и эффективностью, с которой они преобразуют энергию ультразвука в другие виды энергии, в частности, в энергию ударных волн, тепловую или энергию микроструй жидкости. Активность кавитации может оцениваться с использованием различных кавитационных эффектов. Наиболее широко применяется метод эрозионных тестов, когда измеряется убыль массы ΔG металлических тест-образцов, помещаемых на некоторое время в кавитационную область. Индикатором активности кавитации может служить также интенсивность свечения, генерируемого в кавитационной области – звуколюминесценции (ЗЛ).

Влияние температуры на активность кавитации исследовалось многими авторами. В работе [5] отмечалось, что интенсивность ЗЛ увеличивается с ростом температуры. Авторами [6] получены зависимости интенсивности ЗЛ от температуры в виде кривых с максимумом. Большинство авторов указывает на уменьшение интенсивности ЗЛ с ростом температуры [7–9]. В недавней работе [10] сравнивались температурные зависимости различных эффектов. Измерялась убыль массы эрозионных тестов, интенсивность ЗЛ и интенсивность субгармоники $\frac{1}{2}f_0$ в спектре кавитационного шума. При этом, однако, разброс измеренных величин был настолько большим, что однозначно выявить какую-либо тенденцию не удалось.

В данной работе впервые показано, что зависимости активности кавитации от температуры жидкости в неоднородном ультразвуковом поле существенно различаются для различных точек поля.

Установка и методика

Рабочая емкость использовавшейся установки представляет собой цилиндрический стакан из нержавеющей стали с толщиной стенок 0,5 мм. Высота стакана – 87 мм, диаметр – 80 мм. Пьезокерамический излучатель диаметром 50 мм прикреплен к днищу стакана с тыльной стороны клеем на эпоксидной основе. Резонансная частота излучателя – 34,45 кГц.

Уровень жидкости при проведении испытаний поддерживался равным 80 мм, что на 7 мм меньше длины волны в воде на частоте 34,4 кГц. Для измерений активности кавитации использовался кавитометр ИСА-3М. Прибор состоит из гидрофона и электронного блока. Приемная часть гидрофона, т.е. элемент волновода, контактирующий с жидкостью и принимающий акустический сигнал из кавитационной области, представляет собой цилиндр диаметром 3 мм и длиной 5 мм.

Принцип действия кавитометра основан на спектральном анализе акустического сигнала, генерируемого кавитационной областью. Этот сигнал называют обычно кавитационным шумом [4]. Кавитационный шум преобразуется пьезоэлементом гидрофона в электрический сигнал, который обрабатывается электронным блоком. Алгоритм обработки состоит в выделении и интегрировании непрерывной составляющей кавитационного шума в выбранном диапазоне частот.

Прибор, в частности, позволяет измерять полную активность кавитации $A_{\text{полн.}}$ и активность нестационарной кавитации $A_{\text{нест.}}$. Полная активность кавитации определяется как интегральная интенсивность кавитационного шума, генерируемого пульсирующими (стационарными) и захлопывающимися (нестационарными) кавитационными полостями. Активность нестационарной кавитации – интенсивность кавитационного шума, генерируемого захлопывающимися полостями.

Использовались два способа варьирования температуры. В первом разогретую до кипения воду заливали в рабочую емкость (ультразвуковую ванну), а охлаждение происходило за счет теплообмена с окружающей средой. Во втором – ванну заполняли жидкостью при комнатной температуре, а разогрев осуществлялся под действием ультразвука за счет преобразования энергии ультразвука в тепло. Температура рабочей жидкости измерялась хромель-копелевой термопарой и поддерживалась в ходе измерения точно не ниже $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 представлены зависимости от температуры полного выходного сигнала гидрофона N активности стационарной кавитации – 1 и нестационарной кавитации – 2. Гидрофон во всех случаях размещался на оси излучателя. Данные на рисунке 1, *a* получены при медленном нагреве жидкости (вследствие преобразования энергии ультразвука в тепловую энергию). Расстояние от излучателя до приемного элемента гидрофона – 40 мм. Графики, представленные на рис. 1, *б–г* получены при охлаждении жидкости для точек на расстоянии от излучателя соответственно 70, 40 и 10 мм.

Сравнение данных на рисунках 1, *a* и 1, *в* позволяет сделать вывод, что способ нагрева не влияет существенно на характер зависимости полного выходного сигнала гидрофона (1) и активности кавитации (2, 3) от температуры. Далее, как видно из представленных данных, (рис. 1, *б* и *г*), температурные зависимости активности кавитации для разных точек поля имеют различный характер. На расстоянии 70 мм от излучателя, т.е. вблизи поверхности жидкости, $A_{\text{полн}}$ и $A_{\text{нест}}$ монотонно уменьшаются с ростом температуры, а на расстоянии 40 мм от излучателя вначале растут, достигают некоторого максимального значения и затем начинают уменьшаться. Отметим, что при нагреве жидкости в диапазоне температур 30...40 °C (рис. 1, *a*) активность кавитации меняется незначительно.

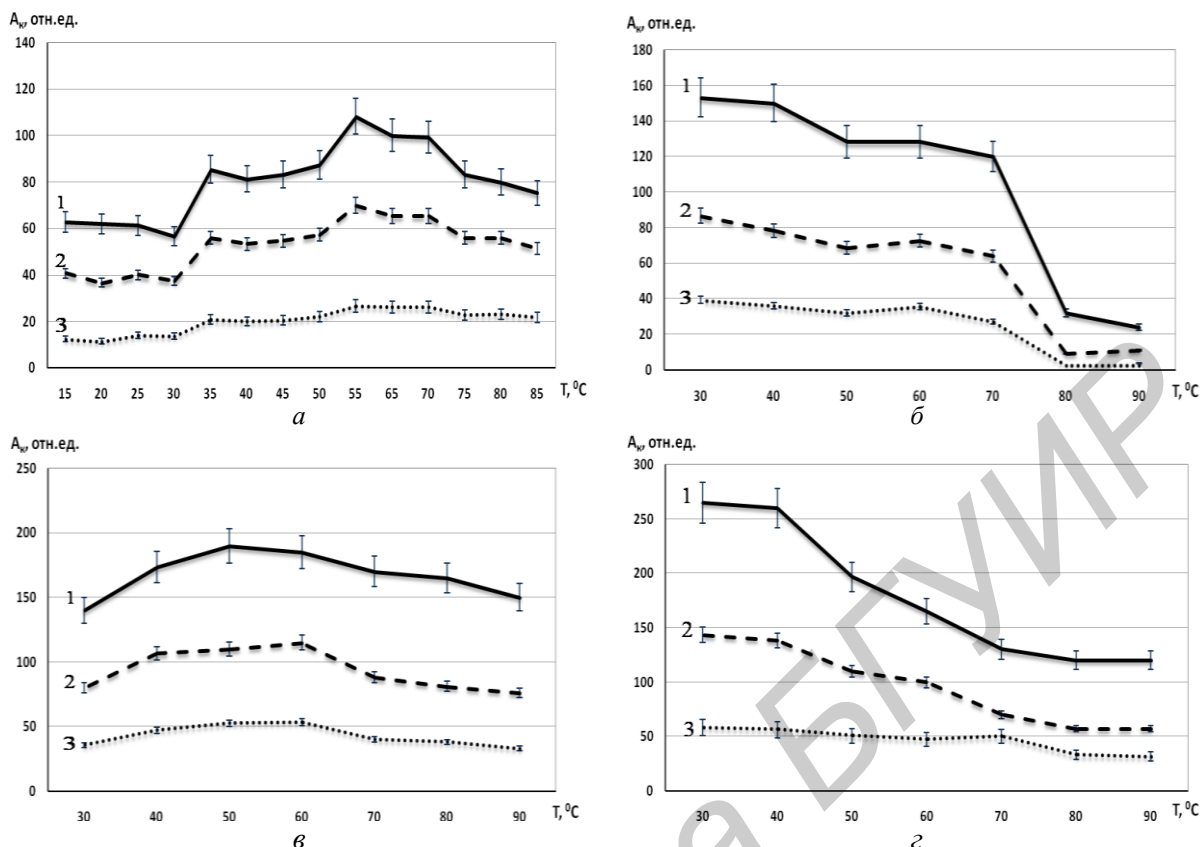


Рис. 1. Зависимость активности кавитации от температуры рабочей жидкости для различных расстояний от датчика до излучателя:
 а – 40 мм; б – 70 мм; в – 40 мм; з – 10 мм (1 – режим «Н», 2 – режим «1», 3 – режим «2»)

Для объяснения полученных зависимостей обратимся к уравнению, описывающему динамику кавитационной полости в ультразвуковом поле [11]:

$$R \frac{d^2 R}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{dt} \right)^2 + \frac{1}{\rho} \left[P_{\infty} - P_{п} - P_a + P_{кав} + \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\mu}{R} \frac{dR}{dt} - \left(P_{\infty} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} \right] = 0,$$

где R – текущий радиус пузырька, ρ – плотность жидкости, σ – поверхностное натяжение, $P_{п}$ – давление насыщенного пара, μ – вязкость жидкости, R_0 – начальный радиус пузырька – давление ультразвукового поля, P_{∞} – гидростатическое давление в жидкости.

При увеличении температуры воды от 23 °C до 80 °C плотность и вязкость изменяются соответственно: плотность уменьшается на 3,5 % а вязкость – в 2 раза. В соответствии с [11], изменения ρ и μ в таких диапазонах не может сколько-нибудь существенно повлиять на динамику и захлопывание кавитационной полости.

Поверхностное натяжение в указанном выше диапазоне температур уменьшается на 14 %, а давление насыщенного пара увеличивается в 20 раз. При прочих равных условиях оба эти фактора воздействуют на захлопывание пузырька в одном направлении, уменьшая скорость сжатия пузырька, что должно приводить к уменьшению эффективности концентрации энергии ультразвука и преобразованию ее в другие виды энергии. Это, в свою очередь, будет вызывать уменьшение интенсивности ударных волн, генерируемых при захлопывании пузырька, а следовательно – и уменьшение активности кавитации.

Точки на расстоянии 70 и 10 мм от излучателя находятся вблизи максимумов переменного давления в стоячей волне. Очевидно, вследствие только этого концентрация пузырьков здесь будет более высокой, чем в других участках звукового поля. Кроме того, как известно [12], пузырьки размером меньше или порядка резонансного под действием радиационного давления (сила Бьеркнесса) перемещаются в места максимального давления. Это обстоятельство является еще одним фактором увеличения концентрации C пузырьков в данных точках поля. Можно ожидать, что в этих точках концентрация пузырьков близка к

предельной, после которой наступает состояние перенасыщения [12], когда дальнейшее увеличение C приводит уже не к увеличению, а к уменьшению активности кавитации. В результате все три фактора в данных точках поля при увеличении температуры действуют в одном направлении, приводя к уменьшению активности кавитации с ростом температуры.

Далее следует отметить, что кроме упомянутых выше свойств жидкости, с ростом температуры уменьшается растворимость газов (в данном случае – воздуха). Растворимость непосредственно не влияет на динамику пузырька, однако свойства кавитационной области при этом могут изменяться существенно. Происходит это за счет увеличения концентрации зародышей кавитации и их размеров в рабочей жидкости, а также за счет уменьшения скорости роста пузырьков в ультразвуковом поле. Вследствие уменьшения растворимости по мере нагрева жидкости газ (в данном случае воздух) будет выделяться в виде микропузырьков, увеличивая таким образом концентрацию зародышей кавитации, а следовательно – и плотность пузырьков в кавитационной области. Ясно, что в точках, близких к максимуму давления в стоячей волне (10 мм и 70 мм) концентрация пузырьков близка к максимальной. Поэтому в таких местах все упомянутые выше факторы действуют в одном направлении, а именно – способствуют снижению активности кавитации. Уменьшение σ и увеличение P_n способствует уменьшению скорости захлопывания пузырьков. Увеличение концентрации пузырьков приводит к усилению интенсивности их взаимодействий и уменьшению в результате этого эффективности преобразования и концентрации энергии ультразвука, т.е. к перенасыщению кавитационной области пузырьками. В результате этого активность кавитации уменьшается довольно быстро с ростом температуры.

Как известно [4], зародыши с размером меньше резонансного или равным резонансному, т.е., реально кавитирующие с образованием ударных волн, перемещаются из области меньшего давления в область более высокого давления под действием радиационного давления (сила Бьеркнеса). Поэтому в области минимального давления стоячей волны концентрация зародышей будет существенно ниже предельной по двум причинам: собственно из-за низкого давления пузырьки вырастают медленнее и, во-вторых, они мигрируют в область повышенного давления. Поэтому дополнительное выделение пузырьков при нагреве будет вызывать повышение активности кавитации по крайней мере на начальном этапе нагрева, несмотря на уменьшение эффективности захлопывания вследствие повышения давления насыщенного пара и уменьшения поверхностного натяжения. По мере роста температуры концентрация полостей стремится к предельной, а уменьшение σ и увеличение P_n вносят все более существенный вклад. Поэтому, начиная с некоторой температуры эти факторы могут стать преобладающими и тогда активность кавитации будет уменьшаться.

Таким образом в областях вблизи минимумов звукового давления на активность кавитации оказывают воздействие два конкурирующих фактора: увеличение концентрации кавитационных полостей, с одной стороны и уменьшение эффективности их захлопывания вследствие снижения поверхностного натяжения жидкости и повышения давления насыщенного пара. Характер зависимостей, представленных на рис. 1, а, в позволяет предположить, что при низких температурах (≤ 60 °С) преобладающим является первый фактор и активность кавитации в этом диапазоне растет с ростом температуры. При высоких температурах все большую роль играет уменьшение скорости захлопывания пузырьков, что приводит к уменьшению активности кавитации.

Заключение

Установлено, что зависимости активности кавитации от температуры жидкости хорошо коррелируют с полным выходным сигналом гидрофона во всем исследованном диапазоне температур. Показано, что характер зависимости активности кавитации от температуры существенно зависит от того, в какой точке поля проводится измерение. В частности, вблизи поверхности излучателя и вблизи границы раздела жидкость–газ активность кавитации уменьшается с ростом температуры, а в объеме жидкости имеются точки, в которых зависимость активности кавитации от температуры имеют вид кривой с максимумом.

Анализ изменения свойств жидкости, влияющих на динамику кавитационных полостей, позволяет сделать вывод, что основными факторами, определяющими характер зависимости

активности кавитации от температуры, является увеличение давления насыщенного пара, уменьшение поверхностного натяжения жидкости и уменьшение растворимости газа в жидкости с ростом температуры. Полученные в работе результаты объяснены исходя из закономерностей влияния упомянутых выше свойств жидкостей на захлопывание полостей и их миграцию в кавитационной области.

STUDY INTO DEPENDENCE OF CAVITATION ACTIVITY ON LIQUID TEMPERATURE

A.V. KOTUKHOV, A.V. KRASOVSKIY, V.V. SHAPLYKA, N.V. DEZHKUNOV

Abstract

Cavitation activity in non-homogeneous ultrasonic field have been studied. It has been shown that the character of temperature dependencies of cavitation activity is different for different points of the field. For example, cavitation activity at the surface of the radiator and at the liquid – gas surface decreases with temperature. There are points in the volume of the liquid where temperature dependencies are curves with maximum, i.e. it grows with temperature, achieves maximal value and then decreases.

Список литературы

1. Келлер О.К., Кратыш Г.С., Лубяницкий Г.Д. Ультразвуковая очистка. М., 1977.
2. Абрамов В.О., Абрамов О.В., Артемьев В.В. и др. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. М., 2006.
3. Маргулис М.А. Звукохимические реакции и сонолюминисценция. М., 1986.
4. Сиротюк М.Г. Акустическая кавитация. М., 2008.
5. Iernetti G. // Temperature dependence of sonoluminescence and cavitation erosion in water. *Acustica*. 1972. № 26. P.168–169.
6. Sehgal C., Sutherland R.G., Verrall R.E. // *The Journal of Physical Chemistry*. 1980. № 84 (5). P. 525–528.
7. Verral R.E., Sehgal C.M., Suslick K. // Sonoluminescence. *Ultrasound: Its chemical, physical and biological effects*. 1988. P. 227–286.
8. Hiller R., Putterman S.J., Barber B.P. // Spectrum of synchronous picosecond sonoluminescence. *Physical Review Letters*. 24 August 1992. № 69. P. 1182–1184.
9. Barber B.P., Wu C.C., Paul H.R. et.al. Sensitivity of sonoluminescence to experimental parameters. *Physical Review Letters*. 28 February 1994. № 72. P. 1380–1383.
10. Jischke M., Koch C. // Model processes and cavitation indicators for a quantitative description of an ultrasonic cleaning vessel: Part I: Experimental results. *Ultrasonics Sonochemistry*. 2012. № 19. C. 787–795.
11. Акулчев В.А. Кавитация в криогенных и кипящих жидкостях. М., 1978.
12. Dezhkunov N.V. // *Ultrasonics Sonochemistry*. 2002. № 2. P. 103–106.

УДК 004.056: 061.068

ШИФРОВАНИЕ ДАННЫХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКИ В СЕНСОРНОЙ СЕТИ

А.В. СИДОРЕНКО, К.С. МУЛЯРЧИК

Белорусский государственный университет
Независимости, 4, 220050, Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 10 марта 2015

Приводится структурная схема передачи зашифрованной информации в беспроводной сенсорной сети. Алгоритм шифрования основан на схеме блочного симметричного алгоритма и использует хаотические системы и отображения. Алгоритм шифрования на динамическом хаосе имеет преимущества: увеличение степени защиты информации о маршрутизации, надежности и пропускной способности передачи данных, что расширяет функциональные возможности в решении криптографических задач. Аппаратно-программное обеспечение реализуется в сверхширокополосных приемопередатчиках типа ППС-40А. Особенности программной и аппаратной реализации алгоритма приводятся. Выполнена инсталляция программного обеспечения в микроконтроллеры приемопередатчиков ППС-40А. Приводятся характеристики программного кода микроконтроллера приемопередатчика до и после реализации функции шифрования.

Ключевые слова: шифрование, информация, алгоритм, хаотическая динамика.

Введение

В настоящее время интенсивное развитие получает «концепция Интернет-вещей» – концепция вычислительной сети физических объектов («вещей»), оснащенных встроенными технологиями для взаимодействия друг с другом или с внешней средой. При этом организация таких сетей возможна как в области экономики, так и в развитии общественных отношений.

В рамках данной концепции можно выделить особый класс сетей – беспроводные сенсорные сети, которые используются преимущественно для решения широкого круга задач мониторинга и управления [1, 2]. Эти сети являются распределенными и самоорганизующимися и состоят из множества миниатюрных узлов (сенсоров). Основным требованием, предъявляемым к узлам такой сети, является длительное время их автономной работы, что приводит к использованию в них элементов с малыми вычислительными возможностями и режимов работы с низким энергопотреблением. Так, объем памяти микроконтроллера, используемого в таких устройствах, как правило, находится в пределах 1–4 Кбайт, а частота его работы составляет 8–20 МГц [3].

Наиболее важной задачей защиты информации при разработке систем передачи на базе беспроводных сенсорных сетей является обеспечение конфиденциальности передаваемых данных. В отсутствие данной возможности, злоумышленник может перехватывать и обрабатывать передаваемые по сети пакеты с целью извлечения такой информации, как идентификаторы узлов или непосредственно передаваемые данные, что возможно в силу широкополосной природы беспроводных сенсорных сетей [4].

Зашифрованная передача информации в сенсорной сети

Задача обеспечения конфиденциальности передаваемых по сети данных решается внедрением функций шифрования непосредственно в приемопередатчики, что позволяет

установить безопасное соединение между отдельными приемопередатчиками и передавать друг другу информацию, которая не может быть перехвачена «внешними наблюдателями».

Типичный пример взаимодействия устройств в беспроводной сенсорной сети включает в себя следующую последовательность действий (рис. 1).

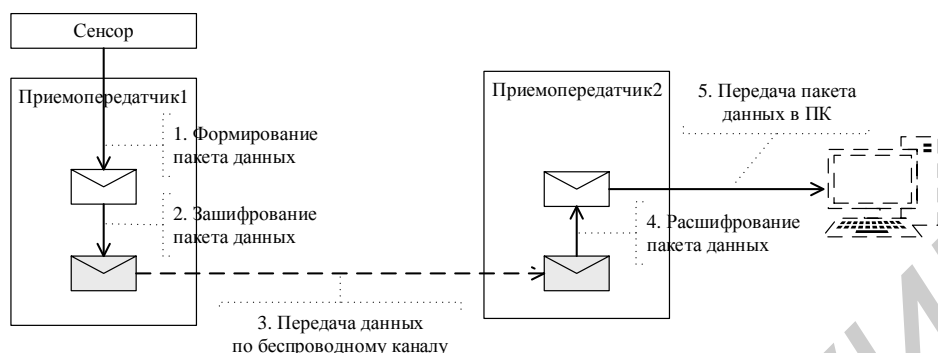


Рис. 1. Схема зашифрованной передачи информации в сенсорной сети

Приемопередатчик 1 производит снятие текущих показателей с сенсора и формирует информационный пакет для отправки в эфир, зашифровывает его, используя текущие в узле настройки шифрования, и отправляет в эфир. Приемопередатчик 2 принимает пакет из эфира, расшифровывает его, используя текущие в узле настройки шифрования, и осуществляет его дальнейшую обработку: передачу в компьютер или дальнейшую ретрансляцию в эфир.

Следует отметить, что функция шифрования данных в приемопередатчике осуществляет шифрование всего тела пакета данных целиком, не затрагивая при этом заголовок пакета и байты контрольной суммы. Выбор такой схемы преобразования продиктован необходимостью защиты информации о маршрутизации, поскольку одной из целей пассивного прослушивания является извлечение идентификаторов узлов, что позволит построить схему маршрутизации и выявить расположение узлов в сети.

Таким образом, шифрование на физическом уровне позволяет осуществлять безопасную передачу информации между узлами сети, устраняя возможность пассивного прослушивания и связанных с ним атак.

Установлено, что для обеспечения функции шифрования в приемопередатчиках сенсорных сетей следует использовать блочный симметричный алгоритм шифрования, с одной стороны, требующий для своей реализации не более 25 % доступного объема оперативной памяти микроконтроллера, а с другой стороны, позволяющий легко изменять длину блока текста, что будет способствовать повышению надежности передачи и увеличению полезной пропускной способности канала связи при передаче зашифрованной информации. Дополнительным требованием является предельный объем программного кода – 10 % от доступной памяти для хранения программ.

Существующие алгоритмы шифрования, такие как СТБ 34.101.31-2007 (BelT), AES, ГОСТ 28147-89, DES и другие, обладая известными достоинствами, не соответствуют описанным выше требованиям и не подходят для реализации в беспроводных сенсорных сетях. Основными причинами тому являются отсутствие в приемопередатчиках достаточного объема памяти для функционирования алгоритма шифрования, низкая вычислительная мощность устройства, при которой временная продолжительность процесса шифрования оказывается достаточно высокой, ограниченные коммуникационные возможности. Так, примерный объем оперативной памяти микроконтроллера, необходимый для реализации алгоритма BelT, составляет от 544 до 1152 байт.

Алгоритм шифрования на основе хаотической динамики

Для обеспечения функции шифрования данных в приемопередатчиках, с учетом вышеизложенного, разработан новый алгоритм шифрования, использующий в своей основе принципы динамического хаоса, а именно – хаотические отображения. Так, хаотические отображения являются «дешевыми» с точки зрения потребности в вычислительных ресурсах. В силу своей нелинейности такие отображения являются хорошими кандидатами на

использование вместо таблиц подстановки (в традиционных алгоритмах), что значительно снижает требования к объему оперативной памяти. Кроме этого, выражение для вычисления хаотического отображения инвариантно по отношению к множеству, на котором определены его аргументы, что позволяет использовать одну и ту же структуру отображения для реализации различных его вариантов в зависимости от доступности ресурсов. А это приводит к возможности изменять длину блока в алгоритме шифрования.

В основу структуры разработанного блочного симметричного алгоритма шифрования с использованием хаотической динамики (рис. 2) положена итеративная схема Шеннона, в которой в качестве базового преобразования использована сеть Фейстеля.

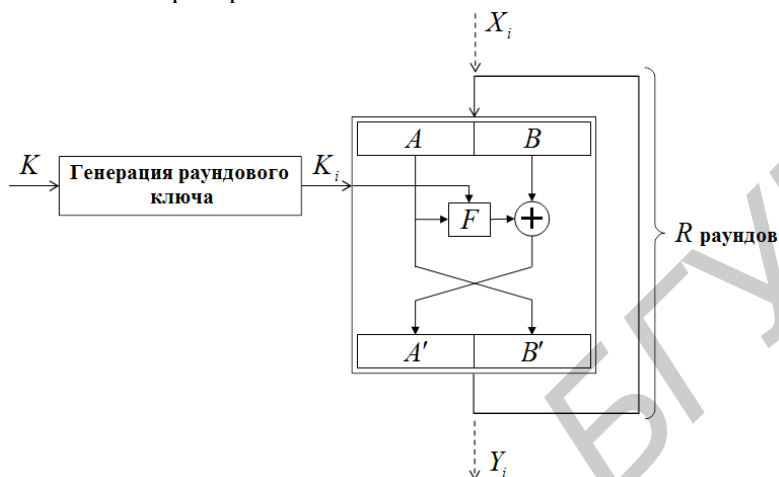


Рис. 2. Схема алгоритма шифрования на основе динамического хаоса с использованием сети Фейстеля

Принципиальным отличием разработанного алгоритма от известных, основанных на сети Фейстеля, является использование в качестве нелинейного блока F дискретного хаотического отображения – преобразования, заданного на конечном целочисленном множестве мощностью M , обладающего хаотической динамикой и управляемого параметром (раундовым ключом) K_i :

$$F = F(A, K_i, M), \quad (1)$$

где A – входное значение отображения (левый входной подблок в сети Фейстеля); K_i – управляющий параметр отображения; M – мощность множества, на котором определено отображение.

Можно выделить следующие преимущества использования дискретных хаотических отображений вместо таблиц подстановки в алгоритмах шифрования, ориентированных на применение в устройствах с ограниченными ресурсами.

1. Уменьшение объема оперативной памяти, требуемой для реализации алгоритма шифрования ввиду отсутствия необходимости хранения таблиц подстановки. В современных традиционных алгоритмах шифрования размер таблиц подстановки достигает 70 % всего объема памяти, необходимой для реализации алгоритма шифрования.

2. Возможность менять мощность множества, на котором определено нелинейное преобразование (дискретное хаотическое отображение), что влечет за собой возможность устанавливать необходимую длину ключа и длину обрабатываемого блока текста, например, 32 бита, 64 бита и т.д.

Другими словами, дискретное хаотическое отображение можно представить как совокупность множества различных таблиц подстановки, причем выбор и использование конкретной таблицы зависит от значения управляющего параметра.

Также отметим, что, поскольку раундовый ключ непосредственно является неотъемлемой частью нелинейного преобразования (дискретного хаотического отображения), а не складывается побитно с блоком текста, дифференциальный криптоанализ такого преобразования затрудняется. Кроме этого, конкретный вид нелинейного преобразования, реализуемого дискретным хаотическим отображением, определяется значением раундового ключа на каждом раунде базового преобразования. Все это в целом способствует повышению криптостойкости разработанного алгоритма шифрования.

Совместное использование в разработанном алгоритме шифрования таких структурных элементов, как итеративная схема Шеннона, сеть Фейстеля и дискретное хаотическое отображение, делает возможным выбор и установление требуемой длины ключа шифрования и длины блока обрабатываемого текста, при этом длина блока текста должна быть кратна двум. Это является существенным преимуществом разработанного алгоритма при его использовании в узлах беспроводной сенсорной сети, поскольку в зависимости от характера передаваемой информации (размера пакета), а также условий передачи (например, зашумленность канала, вероятность возникновения ошибки при передаче) может выбираться та или иная длина блока текста [5, 6].

Аппаратно-программная реализация алгоритма шифрования

Аппаратно-программная реализация предложенного алгоритма шифрования была выполнена на базе сверхширокополосных прямохаотических приемопередатчиков серии ППС-40А, используемых в качестве узлов при построении беспроводных сенсорных сетей. Внешний вид и структурная схема приемопередатчика серии ППС-40А представлены на рис. 3 и 4 соответственно, а технические характеристики приведены в табл. 1.

Центральным узлом цифрового блока является микроконтроллер Atmel ATmega 168, обладающий следующими характеристиками:

- 8-разрядная архитектура;
- тактовая частота – до 20 МГц;
- объем памяти для хранения данных (RAM) – 1 Кбайт;
- объем памяти для хранения программного кода (ROM) – 16 Кбайт;
- объем энергонезависимой памяти EEPROM – 512 байт.

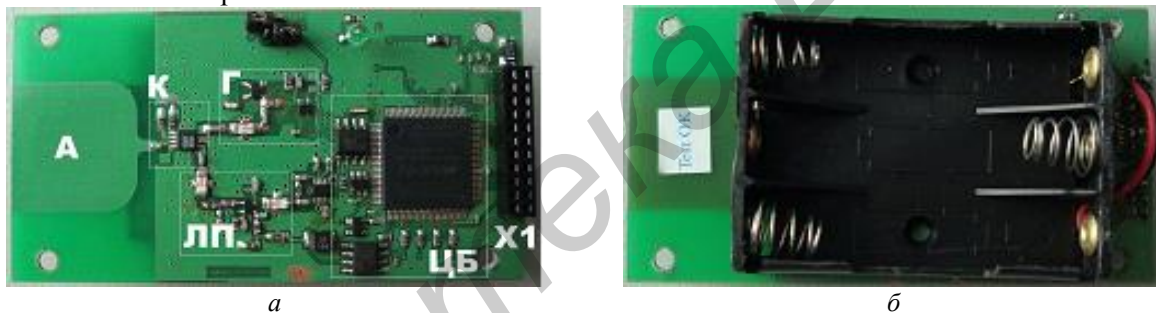


Рис. 3. Приемопередатчик для беспроводных сенсорных сетей: *а* – вид сверху; *б* – вид снизу

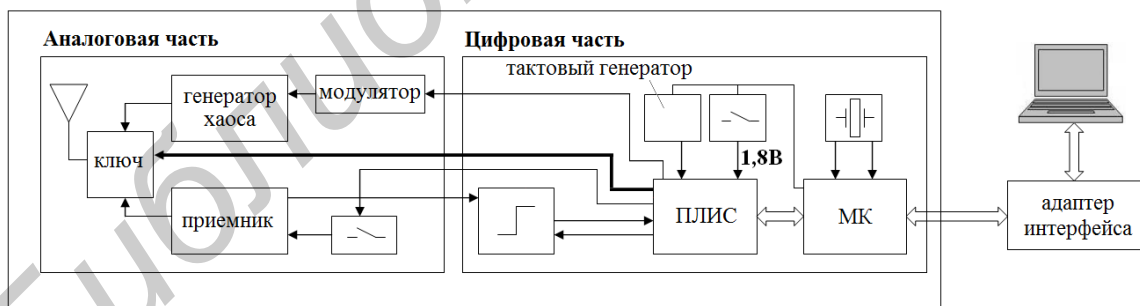


Рис. 4. Структурная схема приемопередатчика серии ППС-40А

Таблица 1. Технические характеристики приемопередатчика

Наименование характеристики	Значение
Полоса выходного сигнала	3,1–5,1 ГГц
Средняя мощность излучаемого сигнала (скорость 2,5 Мбит/с)	–10 дБм
Средняя мощность излучаемого сигнала (скорость 0,1 Мбит/с)	–21 дБм
Дальность приема	до 20 м
Физическая скорость передачи/приема данных	2,5/2,5 Мбит/с
Интерфейс сопряжения с ПК и датчиками	UART
Напряжение питания	4,5 В

На основании анализа приведенных характеристик можно заключить, что приемопередатчик серии ППС-40А относится к классу устройств с ограниченными ресурсами и коммуникационными возможностями, а, следовательно, для обеспечения в нем функций шифрования требуется использовать специально предназначенные для этого алгоритмы, к числу которых относится разработанный алгоритм шифрования.

Для проверки работоспособности алгоритма, а также получения его количественных характеристик было проведено компьютерное моделирование реализации разработанного алгоритма шифрования для 8-разрядных микроконтроллеров Atmel. Результаты исследования количественных характеристик данной реализации разработанного алгоритма шифрования в зависимости от размера блока текста приведены в таблицах 2, 3.

Таблица 2. Характеристики реализации алгоритма шифрования в режиме работы CFV на эмуляторе 8-разрядных микроконтроллеров Atmel

Размер блока текста, байт	Объем памяти для хранения данных, байт		Количество тактов микроконтроллера для зашифрования блока текста	
	суммарный	на один байт блока текста	суммарное	на один байт блока текста
4	223	56	12911	3228
8	241	30	14167	1771
12	259	22	15423	1285
16	277	17	16679	1042
20	295	15	17935	897
24	313	13	19191	800
28	331	12	20447	730
32	349	11	21703	678

Таблица 3. Максимальная скорость обработки данных алгоритмом шифрования в зависимости от тактовой частоты микроконтроллера и размера блока текста

Размер блока текста, байт	Максимальная скорость обработки данных алгоритмом шифрования (Кбит/с) при частоте микроконтроллера			
	5 МГц	10 МГц	15 МГц	20 МГц
4	12,1	24,2	36,3	48,4
8	22,1	44,1	66,2	88,2
12	30,4	60,8	91,2	121,6
16	37,5	74,9	112,4	149,9
20	43,6	87,1	130,7	174,2
24	48,9	97,7	146,6	195,4
28	53,5	107,0	160,5	214,0
32	57,6	115,2	172,8	230,4

Объем памяти для хранения программного кода не изменяется в зависимости от размера блока текста и равен 762 байтам. В целом приведенные скоростные характеристики соответствуют типичным скоростным характеристикам беспроводных сенсорных сетей, в которых «брутто» скорость (включая служебную информацию) составляет порядка 250 Кбит/с, а средняя скорость передачи полезных данных, в зависимости от загрузки сети и числа ретрансляций, составляет от 5 до 40 Кбит/с. Использование предложенной реализации разработанного алгоритма шифрования обеспечивает уменьшение требуемого для реализации алгоритма объема памяти в микроконтроллере как минимум в два раза по сравнению с алгоритмом шифрования BelT, в 3,5 раза по сравнению с алгоритмом AES и в 4,9 раз по сравнению с алгоритмом ГОСТ 28147-89.

Аппаратно-программная реализация алгоритма шифрования

Для экспериментального исследования реализуемых средств защиты была построена опытная беспроводная сенсорная сеть, использующая в качестве узлов приемопередатчики серии ППС-40А. Обобщенная структура такой сети представлена на рис. 5. Сеть организована таким образом, что в ней осуществляется однонаправленная передача данных от сенсорных узлов к координатору сети (базовой станции) напрямую либо через промежуточные узлы – ретрансляторы [7].

В ходе экспериментальной проверки разработанной аппаратно-программной реализации алгоритма шифрования была выполнена инсталляция (прошивка) разработанного программного обеспечения в микроконтроллеры приемопередатчиков серии ППС-40А. Было проанализировано изменение характеристик программного кода микроконтроллера приемопередатчика до и после реализации функции шифрования. Результаты анализа представлены в табл. 4.

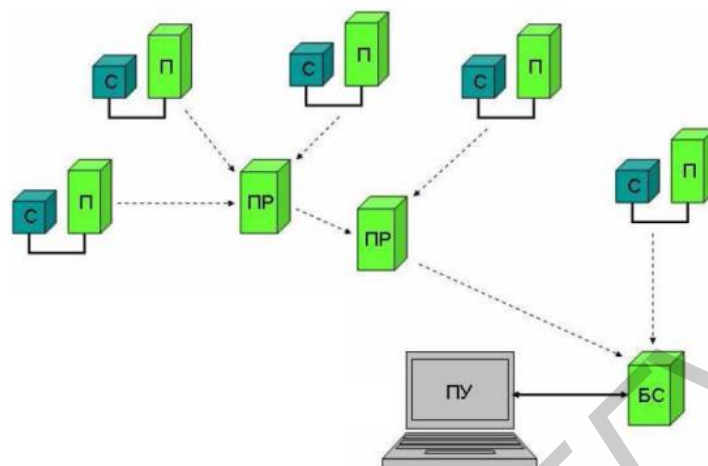


Рис. 5. Структура беспроводной сенсорной сети

Таблица 4. Характеристики реализации функции шифрования в микроконтроллере приемопередатчика

Объем памяти для хранения:	До реализации	После реализации	Изменение (увеличение)
– программного кода, байт	3194	4190	996
– данных в RAM, байт	427	476	49
– данных в EEPROM, байт	20	28	8

Заключение

Результаты выполнения работы сводятся к следующему/

1. Приведена структурная схема передачи зашифрованной информации в сенсорной сети. В указанной схеме обеспечивается защита передаваемой информации о маршрутизации, повышении надежности передачи и увеличение полезной пропускной способности данных.
2. Предложен блочный симметричный алгоритм шифрования на основе динамического хаоса, в котором обоснованно используется сеть Фейстеля в качестве базового преобразования.
3. Аппаратно-программная реализация алгоритма шифрования осуществляется на базе сверхширокополосных приемопередатчиков серии ППС-40А. Выполнена инсталляция разработанного программного обеспечения в микроконтроллеры приемопередатчиков. Приведены характеристики программного кода микроконтроллера приемопередатчика до и после реализации функции шифрования.

DATA ENCRYPTION USING THE CHAOTIC DYNAMICS IN WIRELESS SENSOR NETWORKS

A.V. SIDORENKO, K.S. MULYARCHIK

Abstract

The block-diagram for transmission of the encrypted information in wireless sensor networks is presented. For the encryption algorithm based on the symmetric algorithmic diagram the chaotic systems and maps are used. The dynamic chaos based encryption algorithm features the advantages (higher level of defense of the information about the routing; better reliability and data carrying capacity) which extend the scope of the cryptographic problems solved. The hardware and the software are realized with an ultra wideband transmitter- receiver of the PPS-40A type. Installation of

the software in microcontroller of the PPS-40A type transmitter-receiver is illustrated. The characteristics of the transmitter-receiver microcontroller code before and after the encryption function realization are given. The peculiarities in implementation of the hard- and software for the encryption algorithm are considered.

Список литературы

1. *Панасенко С., Смагин С.* // Мир ПК. 2011. № 7. С. 50–52.
2. *Сидоренко А.В., Мулярчик К.С., Ходасевич А.И. и др.* // Матер. 7-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение –2014». Минск, 19–21 ноября 2014. С. 379–380.
3. *Yick J., Mukherjee B., Ghosal D.* // Computer Networks. 2008. № 52. P. 2292–2330.
4. *Алферов А.П.* Основы криптографии. М., 2002.
5. *Сидоренко А.В., Мулярчик К.С.* // Докл. БГУИР. 2013. № 1. С. 62–67.
6. *Дмитриев А.С., Сидоренко А.В., Андреев Ю.В. и др.* // Электроника инфо. № 6. 2013. С. 36–37.
7. *Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Клецов А.В. и др.* // Радиотехника и электроника. 2008. № 53 (10). С. 1278–1289.

Библиотека БГУИР

УДК 621.391

СЕГМЕНТАЦИЯ И КОМПАКТНОЕ МНОГОМАСШТАБНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ПРОГРЕССИВНОЙ ОБРАТНОЙ КЛАСТЕРИЗАЦИИ

О.М. АЛЬМИЯХИ, В.Ю. ЦВЕТКОВ, Е.Г. МАКЕЙЧИК

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 30 июня 2015

Разработан метод сегментации и компактного многомасштабного представления изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации. Метод обеспечивает точную сегментацию, многомасштабное представление и сжатие сегментированного изображения, адаптацию к ограничению на время сегментации.

Ключевые слова: сегментация изображений, многомасштабное представление изображений, компактное представление изображений, прогрессивная обратная кластеризация.

Введение

Сегментация изображений находит широкое применение в картографировании, видеонаблюдении, распознавании и других областях. В некоторых случаях, например для совмещения изображений, требуются точная сегментация, многомасштабное представление и сжатие сегментированного изображения, адаптация к ограничению на время сегментации. Известны методы сегментации, основанные на формировании областей с использованием водораздела [1], квантования по гистограмме [2], разделении и слиянии областей с использованием квадрата-дерева [3], выращивании областей [4]. Однако данные методы не удовлетворяют указанным выше требованиям. Сегментация с использованием водораздела не обеспечивает выделение сложных по структуре областей и эффективна для узкого класса изображений, например медицинских. Сегментация на основе квантования по гистограмме не обеспечивает точное разделение областей из-за присвоения одинаковых номеров сегментам с одинаковой яркостью. Методы на основе разделения и слияния областей с использованием квадрата-дерева и на основе выращивания областей позволяют точно сегментировать изображения. Однако данные методы не обеспечивают многомасштабное представление и сжатие сегментированного изображения, адаптацию к ограничению на время сегментации. В этой связи актуальна задача разработки метода сегментации изображений, учитывающего перечисленные недостатки.

Метод сегментации и компактного многомасштабного представления изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации

Предлагается метод сегментации и компактного многомасштабного представления изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации (Progressive Backward Clustering Segmentation and Compact Representation – PBCS&CR). Сущность метода состоит в древовидной кластеризации однородных по яркости областей пикселей и формировании множества кратномасштабных кластерных образов исходного изображения (прямая кластеризация); присвоении номеров кластеризованным однородным областям на всех уровнях кратномасштабного представления исходного изображения и поиске избыточных границ однородных областей (прогрессивная обратная кластеризация); объединении соседних

однородных по яркости кластеризованных областей (уточнение границ сегментов).

Алгоритм прямой кластеризации состоит из следующих шагов.

1. Формирование множества $\{A(l)\}_{(l=\overline{0,L})}$ матриц $A(l) = \|a^{(l)}(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y/2^l-1}, x=\overline{0, X/2^l-1})}$

аппроксимации и инициализация элементов матрицы $A(0)$ аппроксимации 0-го уровня в соответствии с выражением $a^{(0)}(y, x) \Leftarrow p(y, x)$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$, где \Leftarrow – операция присваивания; $p(y, x)$ – пиксель сегментируемого изображения $P = \|p(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$; $Y = 2^{f_Y}$, $X = 2^{f_X}$ – размеры сегментируемого изображения P ; $f_Y > 0$, $f_X > 0$ – целые; $l = \overline{0, L}$ – номер итерации (уровня) сегментации; $L = \min(f_Y, f_X)$ – число итераций, определяемое минимальным из значений f_Y и f_X . В результате в качестве аппроксимированного образа $A(0)$ используется сегментируемое изображение P .

2. Формирование множества $\{C(l)\}_{(l=\overline{0,L})}$ матриц $C(l) = \|c^{(l)}(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y/2^l-1}, x=\overline{0, X/2^l-1})}$

кластеризации и инициализация элементов матрицы $C(0)$ кластеризации 0-го уровня в соответствии с выражением $c^{(0)}(y, x) \Leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$. В результате матрица $C(0)$ кластеризации нулевого уровня определяется нулевой.

3. Инициализация счетчика l циклов согласно выражению $l \Leftarrow 1$.

4. Начало цикла кластеризации. Формирование матрицы $C(l)$ кластеризации l -го уровня, элементы которой вычисляются с помощью выражений

$$\forall (j = \overline{0, 1}) \forall (i = \overline{0, 1}) \left(a^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = a^{(l)}(y, x) \right) \wedge \left(c^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 0 \right) \rightarrow \left(c^{(l)}(y, x) \Leftarrow 0 \right),$$

$$\exists (j = \overline{0, 1}) \exists (i = \overline{0, 1}) \left(a^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) \neq a^{(l)}(y, x) \right) \vee \left(c^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 1 \right) \rightarrow \left(c^{(l)}(y, x) \Leftarrow 1 \right)$$

при $y = \overline{0, Y/2^l - 1}$, $x = \overline{0, X/2^l - 1}$,

где $a^{(l)}(y, x) = \frac{1}{4} \sum_{j=0}^1 \sum_{i=0}^1 a^{(l-1)}(2y + j, 2x + i)$ – среднее арифметическое элементов кластера с координатами $(2y, 2x)$ в матрице $A(l-1)$ аппроксимации нижнего $(l-1)$ -го уровня.

5. Приращение счетчика циклов согласно выражению $l \Leftarrow l + 1$.

6. Окончание цикла кластеризации. Проверка условия $l \leq L$. Если оно выполняется – переход на шаг 4, иначе – выход из цикла и завершение алгоритма.

Алгоритм прогрессивной обратной кластеризации состоит из следующих шагов.

1. Формирование множества $\{S(l)\}_{(l=\overline{0,L})}$ матриц $S(l) = \|s^{(l)}(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y/2^l-1}, x=\overline{0, X/2^l-1})}$

сегментации и множества $\{E(l)\}_{(l=\overline{0,L})}$ матриц $E(l) = \|e^{(l)}(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y/2^l-1}, x=\overline{0, X/2^l-1})}$ границ однородных областей. Инициализация элементов матриц $S(l)$ сегментации и $E(l)$ границ однородных областей уровней $\overline{0, L}$ в соответствии с выражениями $s^{(l)}(y, x) \Leftarrow 0$ и $e^{(l)}(y, x) \Leftarrow 1$ при $l = \overline{0, L}$, $y = \overline{0, Y/2^l - 1}$, $x = \overline{0, X/2^l - 1}$. В результате выполнения данного шага матрицы $S(l)$ сегментации и $E(l)$ границ однородных областей уровней $\overline{0, L}$ определяются нулевой и единичной соответственно.

2. Инициализация счетчика N_A однородных областей согласно выражению $N_A \Leftarrow 1$.

3. Инициализация матриц $S(L) = \|s^{(L)}(y, x)\|_{(y=0, x=0)}$ сегментации и $E(L) = \|e^{(L)}(y, x)\|_{(y=0, x=0)}$

границ однородных областей L -го уровня, значения единственных элементов которых (вершин деревьев) вычисляются с помощью выражений

$$\left(c^{(L)}(0, 0) = 0 \right) \rightarrow \left(s^{(L)}(0, 0) \Leftarrow N_A, N_A \Leftarrow N_A + 1 \right). \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что для однородного изображения $s^{(L)}(0,0)=1$, а для неоднородного $s^{(L)}(0,0)=0$. Для обоих вариантов $e^{(L)}(0,0)=1$.

4. Инициализация счетчика l циклов согласно выражению $l=L$.

5. Начало цикла прогрессивной сегментации. Формирование значений элементов матрицы $S(l-1)$ сегментации $(l-1)$ -го уровня с помощью выражения (масштабирование областей)

$$(c^{(l)}(y,x)=0) \rightarrow (s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \leftarrow s^{(l)}(y,x))$$

при $y = \overline{0, Y/2^l - 1}, x = \overline{0, X/2^l - 1}, j = \overline{0, 1}, i = \overline{0, 1}$.

В результате формируется $(l-1)$ -й уровень для кластерных нуль-деревьев.

Возможны четыре комбинации соответствующих значений матрицы кластеризации на l -м и $(l-1)$ -м уровнях. Для каждой из них предполагается следующая обработка на $(l-1)$ -м уровне: $(0,0)$ – масштабирование области (кластер $(l-1)$ -го уровня наследует номер сегмента соответствующего элемента l -го уровня); $(1,0)$ – формирование нового сегмента (элемент $(l-1)$ -го уровня получает новый номер сегмента) или присоединение к существующему соседнему сегменту (элемент $(l-1)$ -го уровня получает номер соседнего элемента $(l-1)$ -го уровня); $(1,1)$ – не обрабатывается; $(0,1)$ – невозможная комбинация.

6. Формирование новых областей (разделение областей) согласно выражению

$$\begin{aligned} & (c^{(l)}(y,x)=1) \wedge (c^{(l-1)}(2y+j, 2x+i)=0) \wedge \\ & \wedge \neg \exists (k \in [-1,1]) \neg \exists (m \in [-1,1]) \left(a^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = a^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m) \wedge \right. \\ & \left. \wedge s^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m) \neq 0 \right) \rightarrow \\ & \rightarrow (s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \leftarrow N_A, N_A \leftarrow N_A + 1) \end{aligned}$$

при $y = \overline{0, Y/2^l - 1}, x = \overline{0, X/2^l - 1}, j = \overline{0, 1}, i = \overline{0, 1}, k = \overline{-1, 1}, m = \overline{-1, 1}, |k| + |m| \neq 0$.

7. Нарастивание областей путем их присоединения к существующим однородным областям согласно выражению

$$\begin{aligned} & (c^{(l)}(y,x)=1) \wedge (c^{(l-1)}(2y+j, 2x+i)=0) \wedge (s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i)=0) \wedge \\ & \wedge \exists (k \in [-1,1]) \exists (l \in [-1,1]) \left(a^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = a^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m) \wedge \right. \\ & \left. \wedge s^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m) \neq 0 \right) \rightarrow \\ & \rightarrow (s^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \leftarrow s^{(l-1)}(2y+j+k, 2x+i+m)) \end{aligned}$$

при $y = \overline{0, Y/2^l - 1}, x = \overline{0, X/2^l - 1}, j = \overline{0, 1}, i = \overline{0, 1}, k = \overline{-1, 1}, m = \overline{-1, 1}, |k| + |m| \neq 0$.

8. Пространственно-ориентированный поиск правых и нижних границ однородных областей на уровне l в соответствии с выражением

$$(c^{(l)}(y,x)=1) \wedge (c^{(l-1)}(2y+j, 2x+i)=0) \rightarrow (e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) \leftarrow 4), \quad (2)$$

$$(e^{(l)}(y,x)=4) \rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x+1) \leftarrow 11, \\ e^{(l-1)}(2y+1, 2x) \leftarrow 22, e^{(l-1)}(2y+1, 2x+1) \leftarrow 3 \end{array} \right), \quad (3)$$

$$(e^{(l)}(y,x)=0) \rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x+1) \leftarrow 0, \\ e^{(l-1)}(2y+1, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y+1, 2x+1) \leftarrow 0 \end{array} \right), \quad (4)$$

$$(e^{(l)}(y,x)=11) \rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x+1) \leftarrow 11, \\ e^{(l-1)}(2y+1, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y+1, 2x+1) \leftarrow 11 \end{array} \right), \quad (5)$$

$$(e^{(l)}(y,x)=22) \rightarrow \left(\begin{array}{l} e^{(l-1)}(2y, 2x) \leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x+1) \leftarrow 0, \\ e^{(l-1)}(2y+1, 2x) \leftarrow 22, e^{(l-1)}(2y+1, 2x+1) \leftarrow 21 \end{array} \right), \quad (6)$$

$$(e^{(l)}(y, x) = 21) \rightarrow \begin{cases} e^{(l-1)}(2y, 2x) \Leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x+1) \Leftarrow 0, \\ e^{(l-1)}(2y+1, 2x) \Leftarrow 21, e^{(l-1)}(2y+1, 2x+1) \Leftarrow 21 \end{cases}, \quad (7)$$

$$(e^{(l)}(y, x) = 3) \rightarrow \begin{cases} e^{(l-1)}(2y, 2x) \Leftarrow 0, e^{(l-1)}(2y, 2x+1) \Leftarrow 11, \\ e^{(l-1)}(2y+1, 2x) \Leftarrow 21, e^{(l-1)}(2y+1, 2x+1) \Leftarrow 3 \end{cases}. \quad (8)$$

Выражения (2)–(8) описывают процедуру пространственно-ориентированного поиска границ однородных областей. Комбинации значений $\{c^{(l)}(y, x) = 0, c^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 1\}$ и $\{e^{(l)}(y, x) = 0, e^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 1\}$ согласно выражениям (2) – (8) представлены на рис. 1.

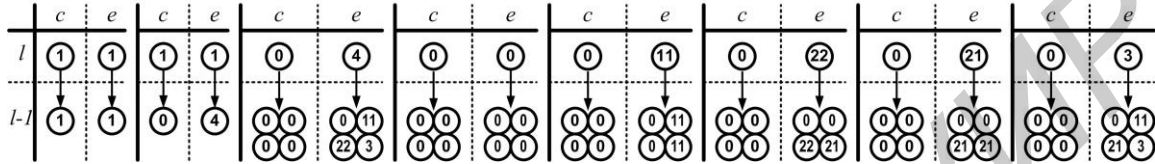


Рис. 1. Комбинации значений элементов матриц кластеризации и выделения границ областей

9. Инициализация матриц $N_B = \|n_B(p, q)\|_{(p=0, N_A-1, q=0, M_A-1)}$ номеров и количества $V_B = \|v_B(p)\|_{(p=0, N_A-1)}$ смежных одинаковых областей согласно выражениям $n_B(p, q) \Leftarrow 0$, $v_B(p) \Leftarrow 0$ при $p = 0, N_A - 1, q = 0, M_A - 1$, где M_A – максимальное число смежных одинаковых областей.

10. Слияние однородных областей согласно выражению

$$\left((e^{(l)}(y, x) = 1) \vee (e^{(l)}(y, x) > 1) \wedge (e^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) > 0) \right) \wedge$$

$$\left(\begin{array}{l} a^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = a^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \wedge \\ \wedge s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \neq 0 \wedge \\ \wedge s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \neq s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) \wedge \\ \wedge \neg \exists (q \in [0, v_B(s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i))]) n_B(s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i), q) = \\ = s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m) \end{array} \right) \rightarrow$$

$$\rightarrow \left(\begin{array}{l} n_B(s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i), v_B(s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i))) \Leftarrow s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m), \\ v_B(s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i)) \Leftarrow v_B(s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i)) + 1, \\ n_B(s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m), v_B(s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m))) \Leftarrow s^{(l-1)}(2y + j, 2x + i), \\ v_B(s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m)) \Leftarrow v_B(s^{(l-1)}(2y + j + k, 2x + i + m)) + 1 \end{array} \right)$$

$$\text{при } y = 0, Y/2^l - 1, x = 0, X/2^l - 1, j = \overline{0, 1}, i = \overline{0, 1}, k = \begin{cases} \overline{0, 1} \text{ при } e^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = \{1, 3, 4\}, \\ 0 \text{ при } e^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = 11, \\ 1 \text{ при } e^{(l-1)}(2y + j, 2x + i) = \{21, 22\} \end{cases},$$

$$m = \begin{cases} \overline{-1,1} & \text{при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = \{1,4\}, \\ \overline{-1,0} & \text{при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 22, \\ 0 & \text{при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 21, \\ \overline{0,1} & \text{при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 3, \\ 1 & \text{при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = 11, \end{cases}$$

$$k + m \neq -1 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = \{1,4\}, |k| + |m| \neq 0 \text{ при } e^{(l-1)}(2y+j, 2x+i) = \{1,3,4\}.$$

Ограничения, накладываемые на индексы k и m , обеспечивают конфигурации пространства поиска значимых элементов в матрице и $S(l-1)$, представленные на рис. 2.

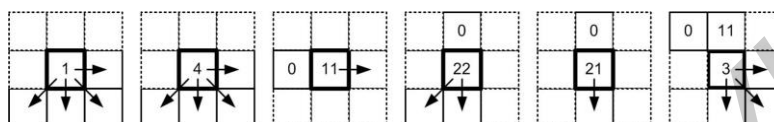


Рис. 2. Конфигурации пространства поиска значимых элементов в матрице $S(l-1)$

11. Уменьшение счетчика циклов согласно выражению $l \Leftarrow l-1$.

12. Окончание цикла прогрессивной сегментации. Проверка условия $l > 0$. Если оно выполняется – переход на шаг 5, иначе – выход из цикла и завершение алгоритма.

В результате уточнения границ сегментов формируется результирующая матрица сегментации, размер которой совпадает с размером исходного изображения или кратен ему. Каждый элемент результирующей матрицы – некоторый пиксель изображения или его кратномасштабного представления, который имеет в качестве значения номер соответствующего сегмента.

Основными шагами алгоритма уточнения границ сегментов являются следующие.

1. Формирование номеров изолированных однородных областей согласно выражению

$$\exists(p \in [0, N_A]) (v_B(p) = 0) \rightarrow ((n_X(N_S, 0) \Leftarrow p), (n_C(p) \Leftarrow N_S), (N_S \Leftarrow N_S + 1))$$

при $p = \overline{0, N_A - 1}$,

где $N_X = \|n_X(p, q)\|_{(p=\overline{0, N_A-1}, q=\overline{0, M_A-1})}$ – матрица номеров объединяемых областей;

$N_C = \|n_C(p)\|_{(p=\overline{0, N_A-1})}$ – матрица замены номеров объединяемых областей; N_S – счетчик номеров сегментов (при инициализации $N_S \Leftarrow 0$).

2. Определение номера первой объединяемой области согласно выражению

$$(n_X(N_S, 0) \Leftarrow p), (v_X(N_S) \Leftarrow 1), (n_C(p) \Leftarrow N_S),$$

где $V_X = \|v_X(p)\|_{(p=\overline{0, N_A-1})}$ – матрица количества объединяемых областей.

3. Обработка стека согласно выражениям

$$\begin{aligned} & \neg \exists(t \in [0, v_X(N_S) - 1]) (n_X(N_S, t) = n_B(n_X(N_S, s), q)) \rightarrow \\ & \rightarrow \left(\begin{aligned} & n_X(N_S, v_X(N_S) + 1) \Leftarrow n_B(n_X(N_S, s), q), (v_X(N_S) \Leftarrow v_X(N_S) + 1), \\ & n_C(n_B(n_X(N_S, s), q)) \Leftarrow N_S \end{aligned} \right) \end{aligned}$$

при $q = \overline{0, v_B(n_X(N_S, s)) - 1}$,

$$v_B(n_X(N_S, s)) \Leftarrow 0$$

где s – указатель стека связанных номеров областей (при инициализации $s \Leftarrow 0$).

4. Формирование результирующей матрицы $S_R = \|s_R(y, x)\|_{(y=\overline{0, Y-1}, x=\overline{0, X-1})}$ сегментации в результате переопределения номеров однородных областей согласно выражению $s_R(y, x) \Leftarrow n_C(s^{(0)}(y, x))$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$.

Оценка эффективности методов сегментации изображений

Предложенный метод PBCS&CR сегментации и компактного многомасштабного представления изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации, как и метод RG наращивания областей, обеспечивает полное и точное выделение однородных областей, а также многомасштабное представление сегментированного изображения (рис. 3). В отличие от метода RG метод PBCS&CR обеспечивает компактное представление результатов сегментации изображения и его многомасштабного представления за счет эффективного вложенного кодирования расположения однородных областей в процессе обратной кластеризации (рис. 4) [5].

Компактность многомасштабного представления сегментированного изображения зависит от результатов квантования исходного изображения. С увеличением шага квантования (и увеличением ошибки квантования) коэффициент сжатия сегментированных изображений возрастает. На рис. 5 представлены зависимости коэффициента сжатия от среднеквадратической ошибки квантования для ряда стандартных тестовых изображений. Из рис. 5 следует, что метод PBCS&CR обеспечивает сжатие сегментированного изображения до 4,5 раз в зависимости от изображения по сравнению с методом RG.

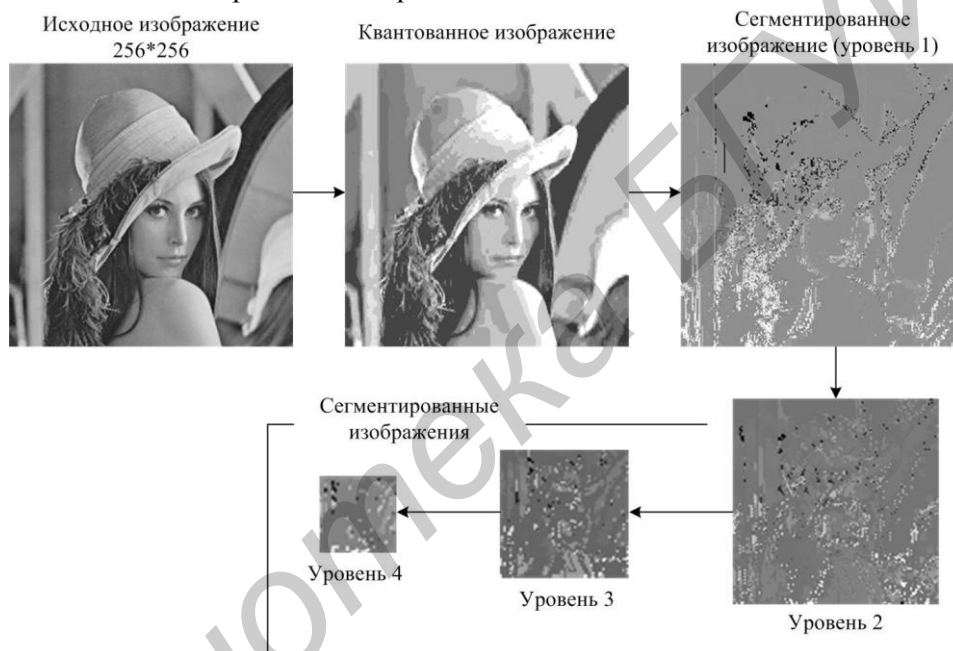


Рис. 3. Многомасштабное представление сегментированного изображения

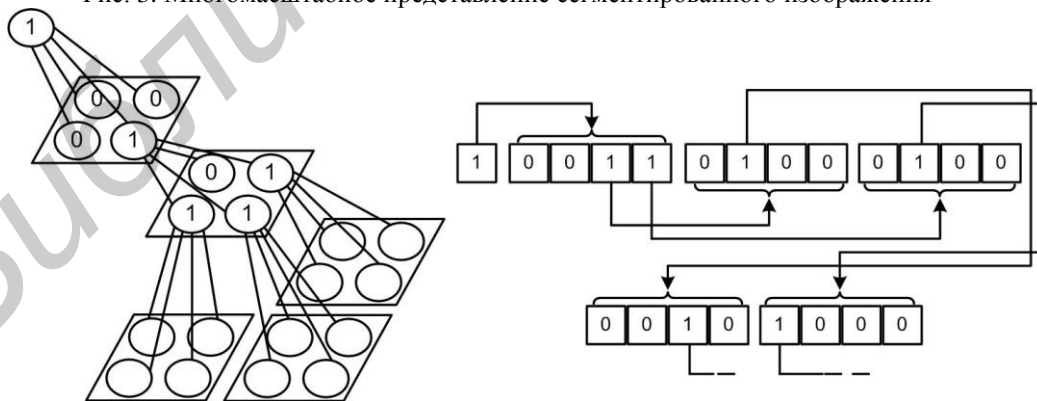


Рис. 4. Формирование вложенного кода

Сжатие сегментированных изображений в методе PBCS&CR достигается за счет увеличения вычислительной сложности, что приводит к снижению скорости сегментации. В таблице приведено время сегментации многомасштабного представления тестовых изображений (4 уровня) методами PBCS&CR и RG, реализованными в среде Matlab и выполненными на компьютере (4 CPUs, 3.6 GHz, 4096 MB). С использованием результатов

анализа параметров, представленных в таблице установлено, что метод PBCS&CR уступает в скорости сегментации методу RG до 230 раз.

Время сегментации тестовых изображений, с

Методы сегментации	Тестовые изображения		
	Barbara	Lena	Mandrill
PBCS&CR	5,1999	4,6640	5,1300
RG	0,0224	0,0235	0,0224

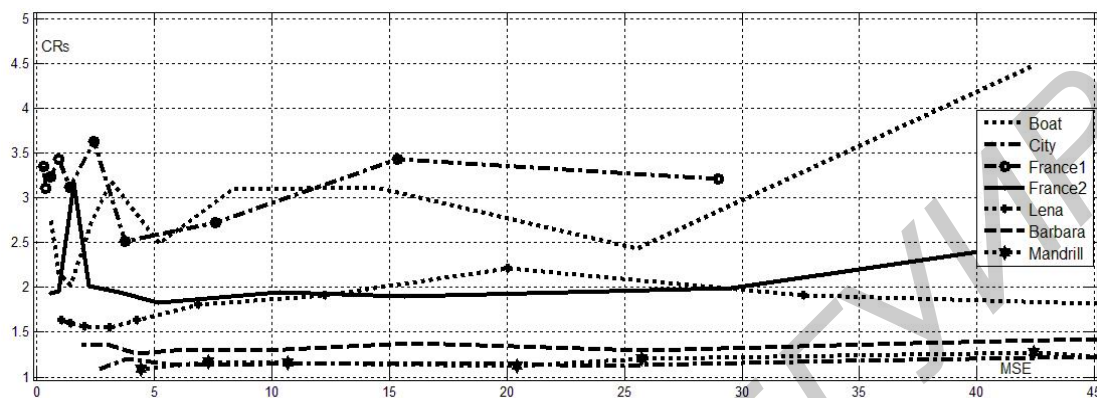


Рис. 5. Зависимость коэффициента сжатия сегментированных изображений от среднеквадратической ошибки квантования исходных изображений

Заключение

Предложен метод сегментации и компактного многомасштабного представления изображений на основе прогрессивной обратной кластеризации. Метод отличается от метода разделения и слияния областей на основе квадрата-дерева наличием трех этапов обработки, в процессе которых осуществляются древовидная кластеризация однородных по яркости областей пикселей и формирование множества кратномасштабных кластерных образов исходного изображения (прямая кластеризация), присвоение номеров кластеризованным однородным областям на всех уровнях кратномасштабного представления исходного изображения и поиск избыточных границ однородных областей (прогрессивная обратная кластеризация); объединение соседних однородных по яркости кластеризованных областей (уточнение границ сегментов), что обеспечивает сжатие сегментированного изображения до 4,5 раз в отличие от метода выращивания областей.

SEGMENTATION AND COMPACT MULTISCALE REPRESENTATION OF THE IMAGES BASED ON PROGRESSIVE BACKWARD CLUSTERING

O.M. ALMIAHI, V.Yu. TSVIATKOU, E.G. MAKEICHIK

Abstract

Developing a method of segmentation and compact multiscale representation of images based on the progressive backward clustering. The method provides an accurate segmentation, multiscale representation and compression of the segmented images, adaptation to a limitation on the time of segmentation.

Список литературы

1. Lalitha M., Kiruthiga M., Loganathan C. // International Journal of Science and Research (IJSR). 2013. Vol. 2, № 2. P. 348–358.
2. Chang J.H., Fan K.Ch., Chang Y.L. // Image and Vision Computing. 2002. Vol. 20. P. 203–216.
3. Muhsin Z.F. // The Imaging Science Journal. 2014. Vol. 62, № 1. P. 56–62.
4. Singh K.K., Singh A. // International Journal of Computer Science Issues. 2010. Vol. 7, № 5. P. 414–417.
5. Борискевич А.А., Цветков В.Ю. // Докл. НАН Беларуси. 2009. Т. 53. № 3. С. 38–48.

УДК 65.012.123

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММЫ БЕЗОПАСНОСТИ КОММЕРЧЕСКОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

В.А. ВЛАСЕНКО, С.Л. ПРИЩЕПА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 5 марта 2015

В условиях постоянного развития информационных технологий вопрос эффективного управления информационной безопасностью становится все более актуальным. В данной статье рассматривается пошаговая разработка программы безопасности коммерческого предприятия, позволяющей экономически грамотно обрабатывать информационные риски организации. Обращается внимание на важные организационные особенности, которые необходимо учитывать при построении документов по безопасности для их качественного внедрения и постоянного поддержания в актуальном состоянии.

Ключевые слова: программа безопасности, стратегическое планирование, управление рисками, система управления информационной безопасностью, контроль изменений.

Введение

В настоящее время состояние глобальной экономики заставляет компании считаться с рисками и вести постоянную работу по разработке более эффективных механизмов управления. Одной из фундаментальных моделей внутреннего контроля корпоративного управления является ERM COSO [1] (Committee of Sponsoring Organizations of the Treadway Commission). Его структуры придерживаются многие ведущие мировые компании.

Анализируя стандарты корпоративного управления и качества, можно выделить несколько основных этапов зрелости предприятий в соответствии со стоящими перед ними приоритетами и провести аналогию с резким ростом информатизации в обществе, а соответственно и сделать вывод о причинах изменения стандартов в области безопасности. Большинство компаний, находясь на втором этапе зрелости, проявляли повышенный интерес к информационным технологиям как к средству повышения эффективности технологических процессов и их оптимизации. Сейчас мы можем наблюдать тенденцию стремительного развития области безопасности, которая, в первую очередь, связана с повышенным вниманием инвесторов к безопасности, а именно: к проблематике риска менеджмента, постоянно изменяющимся требованиям к организации защиты критических коммерческих данных.

Границы области безопасности точно очертить невозможно, безопасность охватывает все новые аспекты деятельности предприятий. Специалисты, работающие в данной области, всегда испытывали трудности при описании этого понятия. Только в сфере компьютерных технологий, безопасность касается разработки программного обеспечения – компьютерная безопасность призвана гарантировать, что программное и аппаратное обеспечение удовлетворяет своим спецификациям и требованиям при использовании его в потенциально враждебной среде [2]. Включая вопросы спецификации, валидации, верификации, тестирования, надежности компьютерной системы. Безопасность охватывает гораздо больший круг проблем, касающихся проектирования операционных систем, архитектурного проектирования, информационной безопасности, анализа и управления рисками, организации и управления базами данных, шифрования и кодирования, отказоустойчивости, проектирования интерфейсов, постановлений и политики государства, административных

решений, экономической безопасности, конкурентной разведки, компетентности в вопросах безопасности, а также соответствующего образования. В данной работе под термином «безопасность информации» будем понимать состояние, которое должны обеспечивать организационные, правовые, программно-аппаратные, инженерно-технические и силовые меры, методы и средства, направленные на обеспечение целостности, конфиденциальности, доступности информации.

Понимание проблем управления процессами безопасности подвергается качественному изменению. В первую очередь, происходящее можно связать с совокупным развитием экономики и информационных технологий. Задачи, стоящие перед безопасностью, значительно усложнились. Данный факт подтверждается многочисленными аргументами, одним из них является необходимость контроля распространения информации на любых носителях, перечень которых постоянно увеличивается. Если безопасность не интегрирована в деятельность компании, а за ее обеспечение отвечают исключительно подразделения безопасности – безопасность такой компании сужается до технических аспектов, а такой подход в данный момент является малоэффективным [3]. Потому специалисты утверждают, что важность выбора правильной стратегии развития в области и интеграция безопасности в бизнес-среду играет одну из ключевых ролей при достижении успеха и финансовой стабильности компании на сегодняшний день.

Программа безопасности

В последних исследованиях по обеспечению информационной безопасности все чаще отмечается важность учета нетехнических аспектов деятельности наравне с техническими рисками [4]. Наблюдается тенденция к интеграции процессов безопасности скорее в бизнес-среду, нежели в информационные технологии. В данный момент делается акцент на новых информационных рисках, таких как: человеческий фактор, культура безопасности, организационные нормы обеспечения безопасности, репутационные риски. Эти данные представляют определенную сложность с точки зрения управленческого учета.

Одновременно с этим присутствует острая потребность в разработке формализованных моделей управления деятельностью по обеспечению безопасности информации, которые учитывают упомянутые выше нетехнические аспекты. Таким образом, определенную актуальность представляет модель централизованного управления деятельностью в области защиты информации, которая уже плотно закрепилась в европейских, американских исследованиях и стандартах. Данная концепция управления подразумевает управление нормами и ограничениями, что выглядит перспективным подходом к решению рассмотренных выше проблем.

Перед разработкой концепции рекомендуется обратить внимание на стандарты серий ISO/IEC 27000, 9000, COBIT (ISACA COBIT Framework), CISSP CBK (Common Body of Knowledge), ITIL (IT Infrastructure Library), COSO (IRM COSO Framework).

Стандарты серии ISO/IEC 2700x являются фундаментальными и близки по содержанию к CISSP CBK. Другие стандарты призваны решать наиболее актуальные проблемы в отрасли. Поскольку персонал департаментов бизнеса и ИТ используют различную терминологию и ставят перед собой различные цели, это может приводить к неэффективному управлению, нарушению сроков, упущенным возможностям, увеличению затрат времени и сил, разочарованиям с обеих сторон. Для решения этих целей предназначены стандарты COBIT и ITIL. Стандарт COBIT [5] определяет цели и модель управления ИТ. Стандарт ITIL в первую очередь указывает последовательность действий на уровне процессов, необходимых для достижения цели. ITIL был создан для удовлетворения потребностей бизнеса, в связи с его растущей зависимостью от ИТ. В ITIL существуют домены по безопасности, внимание которых в основном сконцентрировано на внутренних соглашениях об уровне обслуживания между ИТ и другими подразделениями компании, которые он обслуживает.

При разработке программы безопасности в настоящее время становится очень важным правильно определить четкие цели, достижение которых ожидается в результате выполнения программы безопасности. Наиболее правильным подходом при реализации программы

считается подход «сверху-вниз», начиная со стратегических целей и заканчивая детальными конфигурациями и системными параметрами каждого объекта окружения.

Специалисты по безопасности обязаны понимать, что безопасность должна соблюдаться в рамках всей компании и крайне важно иметь несколько центров ответственности и подотчетности. Потому первым этапом рекомендуется закрепить обязанности и ответственность по обеспечению безопасности за руководителями всех подразделений. Это позволит создать правовое поле и подготовить фундамент и соответствующую мотивирующую площадку для сторонних подразделений, вовлеченных в разработку программы безопасности. Для выполнения этого этапа необходимо также провести инвентаризацию, идентификацию, оценку активов компании. Результатом этапа будет служить матрица ответственности и определение владельцев активов. Данная модель призвана учесть все аспекты деятельности и контролировать их изменения.

Владельцы информации должны указывать, какие пользователи могут иметь доступ к их ресурсам и что они могут делать с этими ресурсами. Задача администратора безопасности – убедиться, что этот процесс внедрен. Владелец актива информации обычно является ответственным сотрудником, входящий в руководящий состав компании или руководитель соответствующего управления. Таким образом, владелец несет единоличную ответственность за любую халатность и классификацию информации.

На втором этапе разработки важно понимать, что программа безопасности должна иметь непрерывный жизненный цикл и постоянно совершенствоваться (рис. 1).

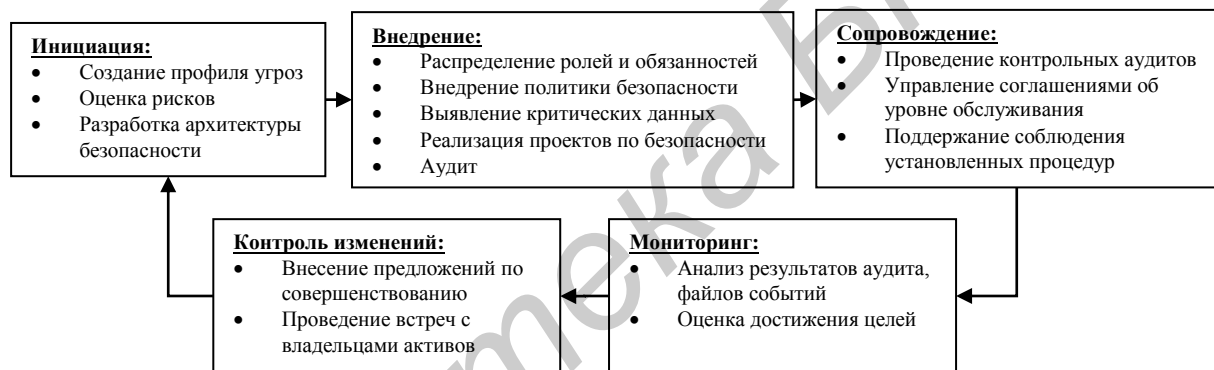


Рис. 1. Этапы разработки программы безопасности

На вышеизложенных этапах ведется подготовка правового поля для эффективного внедрения программы безопасности, назначаются ответственные. Определяются границы ответственности, обеспечивается контроль актуальности и внесения только согласованных изменений.

Основным фундаментом программы безопасности являются следующие процессы: управление рисками; управление активами; управление уязвимостями; соответствие требованиям; управление изменениями; управление идентификацией и доступом; классификация информации; планирование непрерывности бизнеса; физическая безопасность; уровни ответственности; жизненный цикл разработки программного обеспечения; обработка инцидентов; обучение персонала.

Разработка программы безопасности осуществляется в несколько шагов, фундаментом являются бизнес-процессы компании. Остановимся подробнее на некоторых более важных из них с точки зрения стратегии.

Риск – вероятность того, что источник угрозы воспользуется уязвимостью, что приведет к негативному последствию для компании. Источником угрозы может быть вирус, хакер, пользователи, сотрудники и др. Потому очень важно надлежащим образом организовать контроль и аудит действий, что позволяет значительно проще расследовать инциденты безопасности.

Управление информационными рисками представляет собой процесс обработки рисков, снижения их до приемлемого уровня, а также внедрения механизмов поддержания (рис. 2). При управлении рисками составляется перечень категоризированных угроз, которые также должны быть оценены с точки зрения потенциальных потерь и вероятности возникновения. Реальные

риски чрезвычайно трудно измерить, потому специалисты рекомендуют основное внимание обратить на приоритезацию данного списка. Полноценное управление рисками требует поддержки высшего руководства, документированного процесса IRM-политики и IRM-группы. Анализ рисков обеспечивает идентификацию активов и их ценности для компании, идентификацию угроз и уязвимостей, количественную оценку вероятности и влияния на бизнес потенциальных угроз, обеспечение экономического баланса между ущербом от воздействия угроз и стоимостью контрмер. Одной из первых задач группы анализа рисков является подготовка детального отчета по стоимости активов.

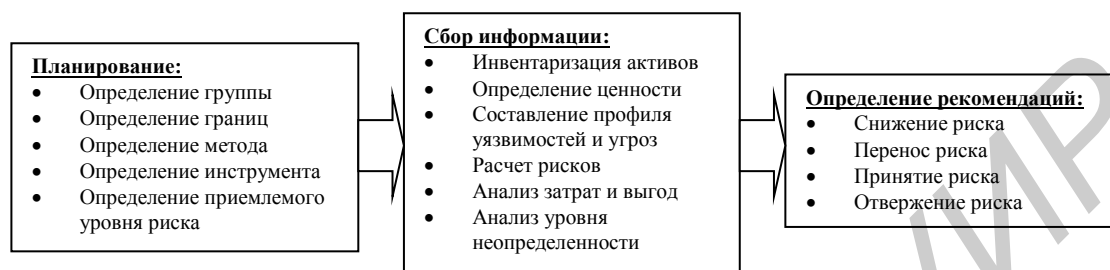


Рис. 2. Жизненный цикл программы управления рисками

Оценка стоимости активов включает в себя процесс определения текущего и желаемого состояния безопасности организации. Подход основан на оценке фактической стоимости актива, на оценке временных затрат, усилий и ресурсов, требуемых для его создания либо ущерба в случае уничтожения. Для проведения анализа рисков компания должна решить, какие активы нуждаются в защите и в какой степени. Оценивается функциональность доступных защитных средств, определяются наиболее эффективные контрмеры. Для поддержания безопасности на приемлемом уровне стоит отметить, что необходимо переоценивать риски на периодической основе.

После внедрения контрмеры компании необходимо оценить величину остаточного и общего риска, достигнутого с помощью контрмер. Разделяют несколько способов обработки рисков: перенести, избежать, уменьшить и принять.

Политика безопасности – документ, указывающий на роль безопасности в организации. Политика должна быть независимой с точки зрения технологий и решений. Должна очерчивать цель и миссию, но не привязывать компанию к способам достижения. Политики принято классифицировать по объектам назначения: организационная политика; политика, ориентированная на задачи; политика, ориентированная на системы. В первую очередь политика существует для решения задач предоставления полномочий группе безопасности и ее деятельности, является основанием в процессе разрешения конфликтов, связанных с безопасностью, очерчивает персональную ответственность, обязанности в отношении реагирования на инциденты и др.

В политике безопасности должен быть разработан и внедрен четкий и понятный порядок применения мер воздействия в отношении тех, кто не соблюдает требования политики безопасности. Политики пишутся в широких терминах и покрывают множество систем и устройств. Более детализированные документы требуют частой актуализации – процедуры, стандарты, руководства, которые составляют ее структуру [3]. А необходимые компоненты, заполняя эту структуру, обеспечивают выполнение программы безопасности и предоставляют защищенную инфраструктуру.

Классификация информации – процесс определения ценности информации для компании, который помогает определить, какие средства и меры защиты должны применяться для каждого класса, решить, какие задачи защиты информации являются наиболее приоритетными (рис. 3). Первичная задача классификации информации – показать необходимый для каждого типа информации уровень защиты конфиденциальности, целостности и доступности и сделать это наиболее эффективным способом. Как правило, в зависимости от размеров организации различают три, четыре уровня иерархии. В военных ведомствах могут использовать пять уровней иерархии.

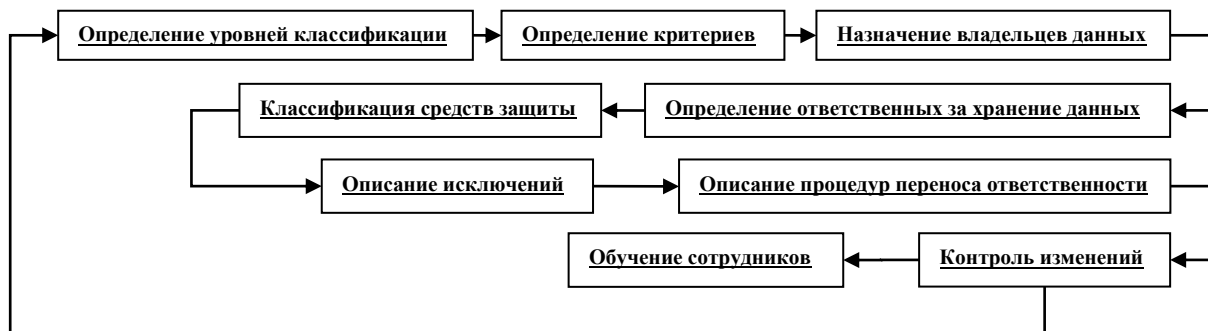


Рис. 3. Описание процесса классификации данных

Аудит информационной безопасности проводится с целью выявления пробелов в существующей системе безопасности, определении пробелов и недочетов, нуждающихся в улучшении или корректировке, а также определение необходимых ресурсов, требуемых для достижения конечной цели безопасности. Это можно обеспечить с помощью создания структуры безопасности, состоящей из нескольких уровней: функций безопасности; обеспечения безопасности мероприятий и процессов, необходимых для реализации каждой из них и возможностей безопасности, связанной с деятельностью по безопасности.

Заключение

В данной статье проведен выборочный анализ некоторых международных стандартов по информационной безопасности и сделана попытка систематизации полученных знаний с последующим выделением ключевых особенностей, требующих особого внимания на начальных этапах внедрения методологической базы в области безопасности. Проведен анализ корреляционных связей между программой безопасности и бизнес-целями компании. Приведены шаги, необходимые для создания эффективной программы безопасности на всех уровнях коммерческой организации. Показана актуальность проблем, стоящих перед информационной безопасностью, которые можно решить с помощью разработки стратегии безопасности. Программа безопасности в состоянии значительно снизить информационные риски организации и привести к эффективному управлению. Данная программа должна быть актуальной на всех уровнях организации, а также пересматриваться в связи с положением по контролю за изменениями, сводиться по принципу «сверху-вниз», иметь постоянный жизненный цикл и несколько центров подотчетности, учитывать IRM-политику и профиль угроз, нетехнические аспекты и требования бизнес-логики. В основе должна лежать прозрачная схема пересмотра и актуальные современные технологии по работе с большими данными.

DEVELOPMENT OF COMMERCIAL ENTERPRISE SECURITY PROGRAM

U.A. ULASENKA, S.L. PRISCHEPA

Abstract

With the continuous development of information technologies the question of effective information security management is becoming increasingly important. This article describes step by step development of the security program that allows effectively manage information risk of the organization. The attention is drawn to the important organizational features that need to be considered when building safety documents for their quality implementation and update.

Список литературы

1. COSO Enterprise Risk Management – Integrated Framework [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.coso.org/guidance.htm>. – Дата доступа: 5.03.2015.
2. Анализ подходов к верификации функций безопасности и мобильности [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: http://ipv6.ispras.ru/Verification_of_security.pdf. – Дата доступа: 5.03.2015.
3. Shon Harris: CISSP All-in-One Exam Guide // McGraw-Hill.
4. Dhillon G. // Information Systems Journal. 2006. Vol. 16, № 3. P. 293–314
5. COBIT 5 [Электронный ресурс]. – Электронные данные. – Режим доступа: <http://www.isaca.org/COBIT/Pages/COBIT-5-russian.aspx>. – Дата доступа: 5.03.2015.

УДК 621.382; 62-4

ФОРМИРОВАНИЕ ЗОЛЬ-ГЕЛЬ МЕТОДОМ И СВОЙСТВА ТОНКИХ ПЛЕНОК ТАНТАЛАТА СТРОНЦИЯ ВИСМУТА

М.В. РУДЕНКО¹, Н.В. ГАПОНЕНКО¹, В.Г. ЛИТВИНОВ², Н.В. МУХИН³, Л.С. ХОРОШКО¹,
А.В. ЕРМАЧИХИН², А.Г. АЛТЫННИКОВ³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь

²Рязанский государственный радиотехнический университет,
ул. Гагарина, 59/1, г. Рязань, 390005, Россия

³Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»
им. В.И. Ульянова (Ленина),
ул. Проф. Попова, 5, г. Санкт-Петербург, 197376, Россия

Поступила в редакцию 8 сентября 2015

Приведены технология формирования золь-гель методом из уксуснокислых зольей и результаты исследования электрофизических характеристик пленок танталата стронция висмута толщиной 240 нм.

Ключевые слова: золь-гель, танталат стронция висмута, сегнетоэлектрики.

Введение

Сегнетоэлектрические материалы находят широкое применение в радиотехнике, гидроакустике, квантовой электронике, интегральной оптике и измерительной технике благодаря наличию спонтанной поляризации, высокой диэлектрической проницаемости, диэлектрической нелинейности, пиро- и пьезоактивности, электрооптическим эффектам. Широко исследуются методы формирования сегнетоэлектриков кислородно-октаэдрического типа для изготовления тонкопленочных конденсаторных структур.

Основным материалом элементной базы FeRAM (Ferroelectric random-access memory) является сегнетоэлектрическая керамика, в частности, сегнетоэлектрические пленки танталата стронция висмута (ТСВ), изготовленные в виде пленочных структур металл-сегнетоэлектрик-металл-подложка. Основными трудностями при получении пленок ТСВ являются неполное упорядочение сегнетоэлектриков, несоизмеримые фазы в кристаллах, стеклоподобные состояния и сильно размытые фазовые переходы, плохая адгезия к подложке, различия в постоянной решетки сегнетоэлектрика и подложки, высокая температура спекания. В настоящее время ведется активная разработка технологии получения материалов с наилучшими свойствами [1–4], что позволит уменьшить размер ячейки и время чтения-записи, а также увеличить количество циклов чтения-записи и время хранения данных.

Уменьшение размеров функциональных элементов FeRAM приводит к проявлению размерных эффектов, существенному влиянию границ раздела, что обусловлено также концентрацией фаз в материале и соответственно электрофизическими характеристиками каждой из фаз. Данные сегнетоэлектрические гетероструктуры могут содержать неоднородности, обусловленные присутствием микро- и нановключений несегнетоэлектрической фазы, слои объемного заряда. Детальное изучение особенностей поведения неоднородных полярных структур при различных внешних воздействиях является актуальным в связи с востребованностью практического применения указанных структур в качестве приемников электромагнитного излучения (сенсоров, датчиков излучения и

температуры, тепловизоров и т.п.), энергонезависимых элементов памяти. В частности, поглощенное электромагнитное излучение оптического диапазона наряду с пироэлектрическим током индуцирует стационарный и нестационарный фотовольтаические отклики в таких структурах, природа и взаимосвязь которых со спонтанной поляризацией остаются невыясненными. В связи с этим актуальной научной задачей также являются исследования интерфейсов гетероструктуры и границ зерен сегнетоэлектрических функциональных элементов с различным видом неоднородностей.

Использование золь-гель метода обеспечивает возможность точного управления соотношением компонентов получаемого вещества на молекулярном уровне, получения многокомпонентных оксидных соединений с точным соблюдением стехиометрического соотношения элементов при низкой температуре синтеза. В частности, позволяет изменять размер зерна, фазовый состав, концентрацию легирующих примесей сегнетоэлектрического ксерогеля, что дает возможность получать, например, крупнозернистые пленки (размер зерна – 270 нм) при сравнительно низких температурах (700–800 °С). Размер зерна, количество включенных в пленку фаз и дефектов зависит от технологии синтеза и влияет на электрофизические параметры структур. Существенно, что золь-гель метод формирования пленок не требует дорогостоящего вакуумного оборудования.

Методика эксперимента

Пленки ТСВ получали золь-гель методом из уксуснокислых золей. Для синтеза золей использовали этоксид тантала ($\text{Ta}(\text{OC}_2\text{H}_5)_5$) и уксуснокислые соли стронция (SrCH_3COO) и одноосновного висмута (BiOCH_3COO). Уксусная кислота выступала как растворитель. Использование ацетона в качестве стабилизатора золя позволяет контролировать скорость гелеобразования путем изменения концентрации стабилизатора и обеспечивает хорошую адгезию к поверхности подложки [5]. Время, в течение которого золь является пригодным для использования, составляет 1 неделю, после чего идет процесс гелеобразования, и в результате образуется желеподобный гель белого цвета. Золи наносили на подложки монокристаллического кремния и структуры кремний/ TiO_2 /Pt методом центрифугирования. Скорость центрифугирования составила 2700 об/мин. Для изготовления нижнего электрода конденсаторной структуры кремний/ TiO_2 /Pt на подложках кремния формировались слои оксида титана и платины с последующей термообработкой в атмосфере кислорода при температуре не ниже 450 °С в течение 30 мин. После нанесения каждого слоя образцы подвергались термообработке при температуре 200 °С в течение 10–20 мин. Затем следовала окончательная высокотемпературная термообработка в течение 40 мин при температуре 800 °С. Для изготовления конденсаторной структуры формировались верхние электроды из никеля квадратной формы со стороной 0,8 мм. Окончательно сформированный ТСВ локально подвергался химическому травлению в растворе на основе соляной кислоты с помощью фотолитографии для формирования контакта к нижнему электроду в целях проведения электрических измерений.

Электрическое сопротивление и емкость измерялись на измерителе RLC Agilent E4980A в частотном диапазоне от 10 кГц до 2МГц с использованием параллельной схемы замещения Rp-Cp при комнатной температуре, на разных частотах (10 и 20 кГц), при циклическом изменении постоянного напряжения смещения со скоростью 0,01 В/с (достаточно медленно), шаг 0,02 В, усреднение по 5 измерениям.

Диапазон изменения напряжения смещения ограничивался максимальным током через образец 20 мА, при котором возможны измерения на приборе Agilent E4980A.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты анализа конденсаторной структуры методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Из РЭМ-изображений рис. 1 видно, что полученная пленка является зернистой. Толщина пятислойной пленки ТСВ составляет приблизительно 240 нм.

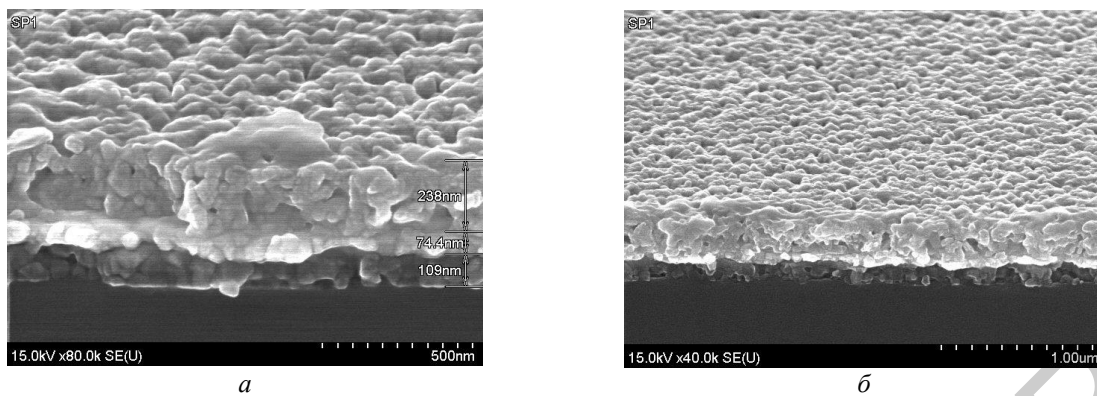


Рис. 1. РЭМ-изображения пятислойной пленки ксерогеля ТСВ, сформированной на подложке Pt/TiO₂/Si: *a* – поверхность, *б* – скол

На рис. 2 представлены дифрактограммы структуры Pt/TiO₂/Si, выступающей в качестве подложки для формирования диэлектрического слоя сегнетоэлектрика в конденсаторной структуре, (рис. 2, *a*) и пленки ксерогеля (Sr_(1-x)Bi_x)Bi₂Ta₂O₉ на подложке Pt/TiO₂/Si (рис. 2, *б*). На дифрактограмме рис. 2, *a* присутствуют пики, характерные для материалов данной подложки – платины Pt, монокристаллического кремния и оксида титана TiO_x.

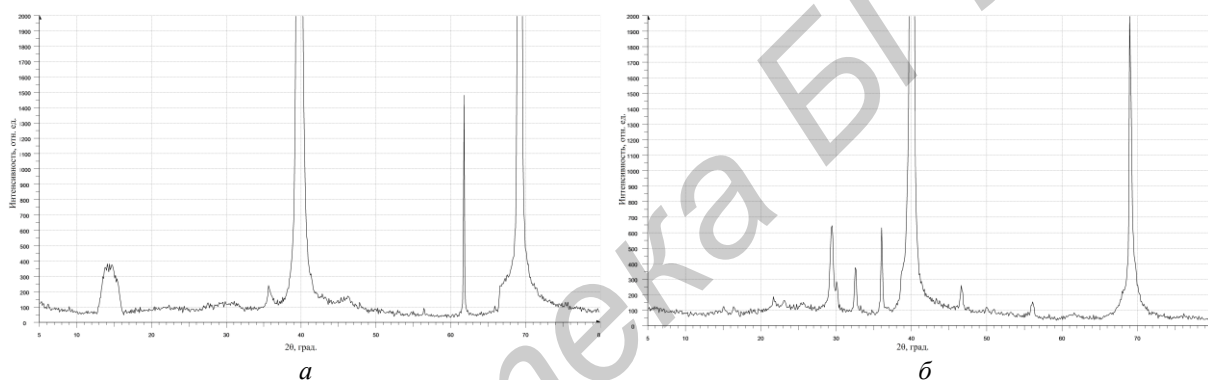


Рис. 2. Дифрактограммы подложки Pt/TiO₂/Si (*a*) и пленки ксерогеля (Sr_(1-x)Bi_x)Bi₂Ta₂O₉ после нанесения 5 слоев, сформированной на подложке Pt/TiO₂/Si (*б*)

На дифрактограмме рис. 2, *б* присутствуют пики, характерные для данной подложки, аналогичные рис. 2, *a* и пики, соответствующие фазовому составу (Sr_{0,82}Bi_{0,12})Bi₂Ta₂O₉.

На рис. 3 и 4 представлены зависимости емкости и сопротивления конденсаторной структуры на основе ТСВ от напряжения при частотах 10 и 20 кГц соответственно. Измеритель RLC Agilent E4980A позволяет проводить измерения активного и реактивного сопротивления образца при разном постоянном напряжении смещения на образце и при этом измерять постоянную составляющую тока через образец (через активное сопротивление *Rp*).

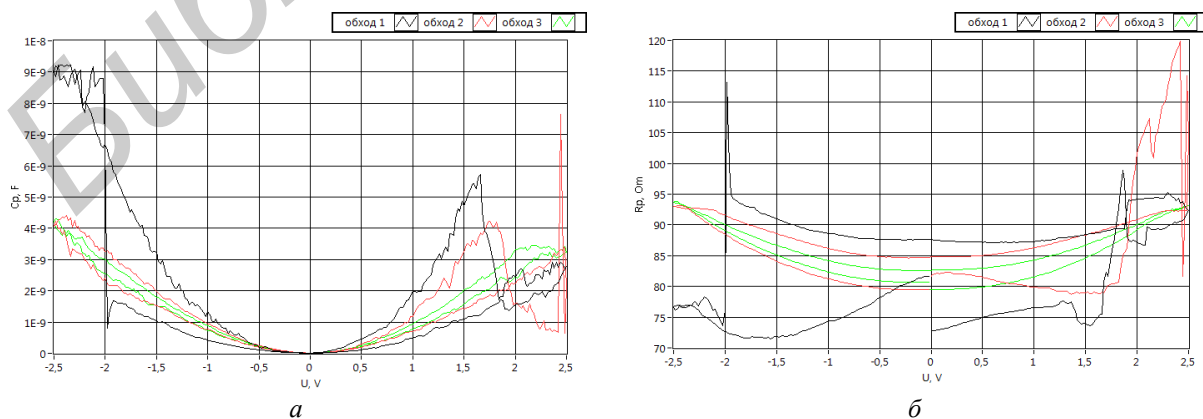


Рис. 3. Зависимости емкости конденсаторной структуры от напряжения (*a*) и сопротивления в конденсаторной структуре от напряжения (*б*) при частоте 10 кГц

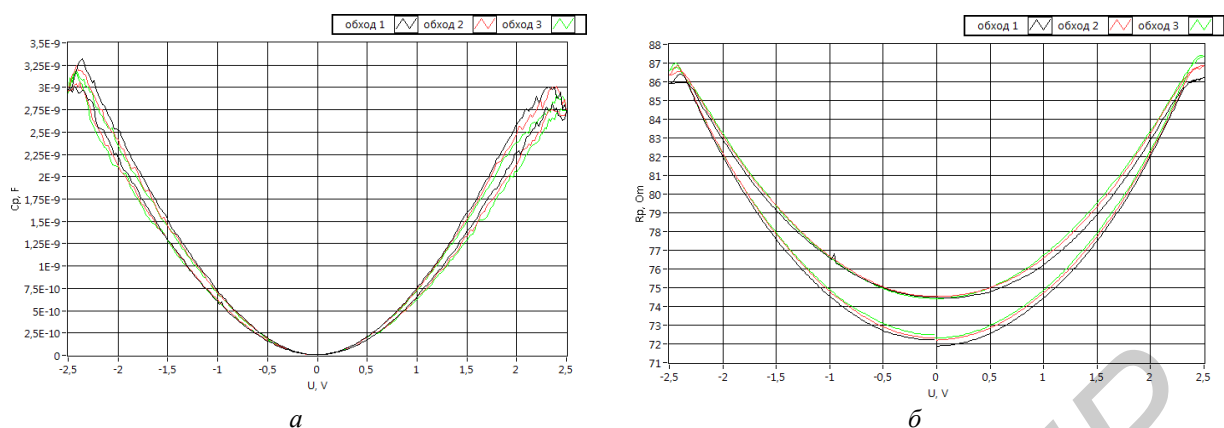


Рис. 4. Зависимости емкости конденсаторной структуры от напряжения (а) и сопротивления в конденсаторной структуре от напряжения (б) при частоте 20 кГц

На рис. 3, б и 4, б изображены зависимости сопротивления от напряжения при комнатной температуре и частотах 10 кГц и 20 кГц. Что характерно, на низких частотах ниже 20 кГц тестового сигнала наблюдается изменение площади петли кривых при циклическом изменении постоянного напряжения смещения.

После третьего обхода изменение вида $C-V$ характеристики заканчивалось. Поэтому на графиках представлены по три кривых разного цвета с указанием номера обхода. Возможно это отражение неких инерционных процессов, происходящих в пленке.

Заключение

Разработана методика создания конденсаторной структуры на основе танталата стронция висмута. Температура 800 °С является достаточной для формирования фазы ТСВ. Обнаружено, что конденсаторная структура на частотах ниже 20 кГц тестового сигнала демонстрирует изменение площади петли кривых вольт-фарадной характеристики и зависимости сопротивления в конденсаторной структуре от напряжения при циклическом изменении постоянного напряжения смещения.

SOL-GEL FORMATION AND PROPERTIES OF STRONTIUM BISMUTH TANTALATE THIN FILMS

M.V. RUDENKO, N.V. GAPONENKO, V.G. LITVINOV, N.V. MUKHIN, L.S. KHOROSHKO,
A.V. ERMACHIKHIN, A.G. ALTYNNIKOV

Abstract

The formation technology by sol-gel based on acetic acid sols and the electrophysical characteristics examination results of the strontium tantalate thin films of 240 nm thick are represented.

Список литературы

1. Kim K.-T., Kim C.-I., Kim J.-G. et al. // Thin Solid Films. 2007. Vol. 515. P. 8082–8086.
2. Yu C.C., Kao M.C., Chen H.Z. et al. // J Supercond Nov Magn. 2010. 23. P. 929–932.
3. Wolf S. A., Lu J., Mircea R. et al. // Proceedings of the IEEE. 2010. Vol. 98, № 12. P. 2155–2168.
4. Tang M., Xu X., Ye Zh. et al. // IEEE Transactions On Electron Devices. 2011. Vol. 58, № 2. P. 370–375.
5. Гапоненко Н.В. Пленки, сформированные золь-гель методом на полупроводниках и в мезопористых матрицах. Минск, 2003.

УДК 004.931

АЛГОРИТМ КОМПЛЕКСНОГО ОБНАРУЖЕНИЯ ДЫМА И ПЛАМЕНИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДАННЫХ СИСТЕМ ВИДЕОНАБЛЮДЕНИЯ

Р.П. БОГУШ, Д.А. ТЫЧКО

*Полоцкий государственный университет
ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, 211440, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 18 мая 2015

Предлагается алгоритм обнаружения основных признаков пожара для систем видеонаблюдения, который позволяет детектировать дым, открытое пламя и их совокупность на динамических изображениях. Отличительной особенностью алгоритма является использование оценки движения, как общего признака, а также применение алгоритмом единых подходов при обнаружении других признаков дыма и пламени. Представлены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: анализ движения, цветовая сегментация, вейвлет-преобразование, контурный анализ.

Введение

Одной из актуальных прикладных задач, решаемых в последнее время с помощью систем видеонаблюдения, является обнаружение пожаров, в том числе и на открытых пространствах. К основным признакам пожара, которые можно зафиксировать с помощью видеокамеры и затем обнаружить на последовательностях видеоизображений, относят дым и открытое пламя. Применение методов и алгоритмов обработки и анализа изображений позволяет автоматизировать работу видеодетектора пожара и минимизировать тем самым участие оператора. Однако в связи с высокой сложностью данная задача не решена в полной мере и в настоящее время существует ряд алгоритмов обработки динамических изображений для видеодетекторов пожаров, которые направлены, как правило, на выявление одного из признаков пожара: либо дыма, либо открытого пламени. Это объясняется, в первую очередь, различными характеристиками указанных объектов. Развитие видеосистем и видеодетекторов пожаров показывает, что перспективной является разработка алгоритмов обработки динамических изображений с расширенными возможностями, которые бы позволяли обнаруживать оба признака пожаров в совокупности либо раздельно. Поэтому работа, направленная на решения данной проблемы, является актуальной.

Теоретический анализ

В табл. 1 представлены результаты анализа современных алгоритмов детектирования дыма и пламени на динамических изображениях. Существующие алгоритмы предполагают выделение таких основных признаков дыма и пламени, как цветовая и яркостная характеристики, движение, изменчивость границ объектов и др. Причем, как правило, на первом этапе выполняется выделение областей-кандидатов, которые с достаточно высокой вероятностью могут относиться к областям дыма или открытого пламени, а на втором этапе выполняется непосредственно классификация данных областей. Для уменьшения ложного срабатывания видеодетектора пожара может использоваться предобработка или постобработка. Основные отличия в существующих методах и алгоритмах решения указанной задачи заключаются в выборе признаков дыма и пламени для обнаружения в последовательности

применения основных этапов обработки, подходах к их реализации, что позволяет получать алгоритмы с улучшенными качественными характеристиками.

Таблица 1. Анализ современных алгоритмов обнаружения дыма и пламени на видеопоследовательностях

ФИО первого автора	Основные этапы								Обнаружение дыма	Обнаружение пламени
	Цветовая сегментация	Обнаружение движения	Анализ временных изменений границ	Анализ пространственных изменений яркости	Анализ движения	Блочная обработка	Обучение	Пост-обработка		
W. Phillips III [1]	RGB	-	+	+	-	-	+	+	-	+
F. Gomes-Rodriguez [2]	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-
T.H. Chen [3]	RGB/HSI	+	-	-	+	-	-	-	+	+
C. Liu [4]	HSV	-	+	-	+	-	-	-	-	+
B. Toreyin [5]	YUV	+	+	+	-	-	-	-	+	-
B. Toreyin [6]	RGB	+	+	+	-	-	-	-	-	+
G. Marbach [7]	YUV	-	+	-	+	-	-	-	-	+
Z. Xu [8]	-	+	+	-	+	-	-	-	+	+
T.Celik [9]	RGB	+	-	-	+	-	+	+	-	+
T.Celik [10]	Lab	+	-	-	-	-	-	+	-	+
B. Lee [11]	RGB	+	-	-	-	-	+	+	+	+
Z. Xiong [12]	-	+	+	-	+	-	-	-	+	-
P. Piccinini [13]	RGB	+	+	-	-	-	+	-	+	-
S. Calderara [14]	RGB	+	+	-	-	+	+	-	+	-
F. Yuan [15]	RGB	+	+	-	-	+	-	-	+	-
X. Qi [16]	RGB/HSV	-	+	+	-	-	-	+	-	+
R. Yasmin [17]	RGB/HSI	+	-	-	+	+	-	-	+	-
J. Gubbi [18]	-	+	+	-	-	+	+	-	+	-
D. Han [19]	RGB	+	-	-	-	-	-	+	+	+
C. Yu [20]	-	+	+	-	-	-	+	-	+	-
S. Calderara [21]	RGB	+	+	-	-	+	-	-	+	-
N. Brovko [22]	-	+	-	+	-	-	+	+	+	-
P. Morerio [23]	YCrCb	+	+	-	+	-	+	-	+	+
S. Gharge [24]	YCrCb	-	-	+	-	-	-	-	+	+
C. Yu [25]	RGB/HSI	+	+	-	-	-	-	-	+	+
А.А. Лукьяница [26]	-	+	+	+	-	+	-	-	+	-
А.Г. Шоберг [27]	-	+	+	-	-	-	-	-	+	-

Методика эксперимента

С учетом характеристик основных признаков, характеризующих области дыма и пламени на изображении, разработан алгоритм, представляющий возможность их совместного обнаружения, который включает следующие операции: цветовая сегментация, предобработка, межкадровое вычисление разности, обновление фона, построение переднего плана, морфологическое открытие и закрытие, контурный анализ, вычисление оптического потока, оценка хаотичности движения, анализ контраста, пространственный и временной вейвлет-анализ. Движение характерно как для дыма, так и для пламени, поэтому алгоритм рассматривает движение как общий признак, который может использоваться для обнаружения обоих факторов пожара. Также с учетом яркостно-цветовых свойств основных признаков пожара, применяется цветовая сегментация для пламени и анализ контраста для дыма. Отличительной особенностью алгоритма является использование на этапе классификации

пространственного и временного вейвлет-анализа как для пламени, так и для дыма. На рис.1. показана общая схема разработанного алгоритма.

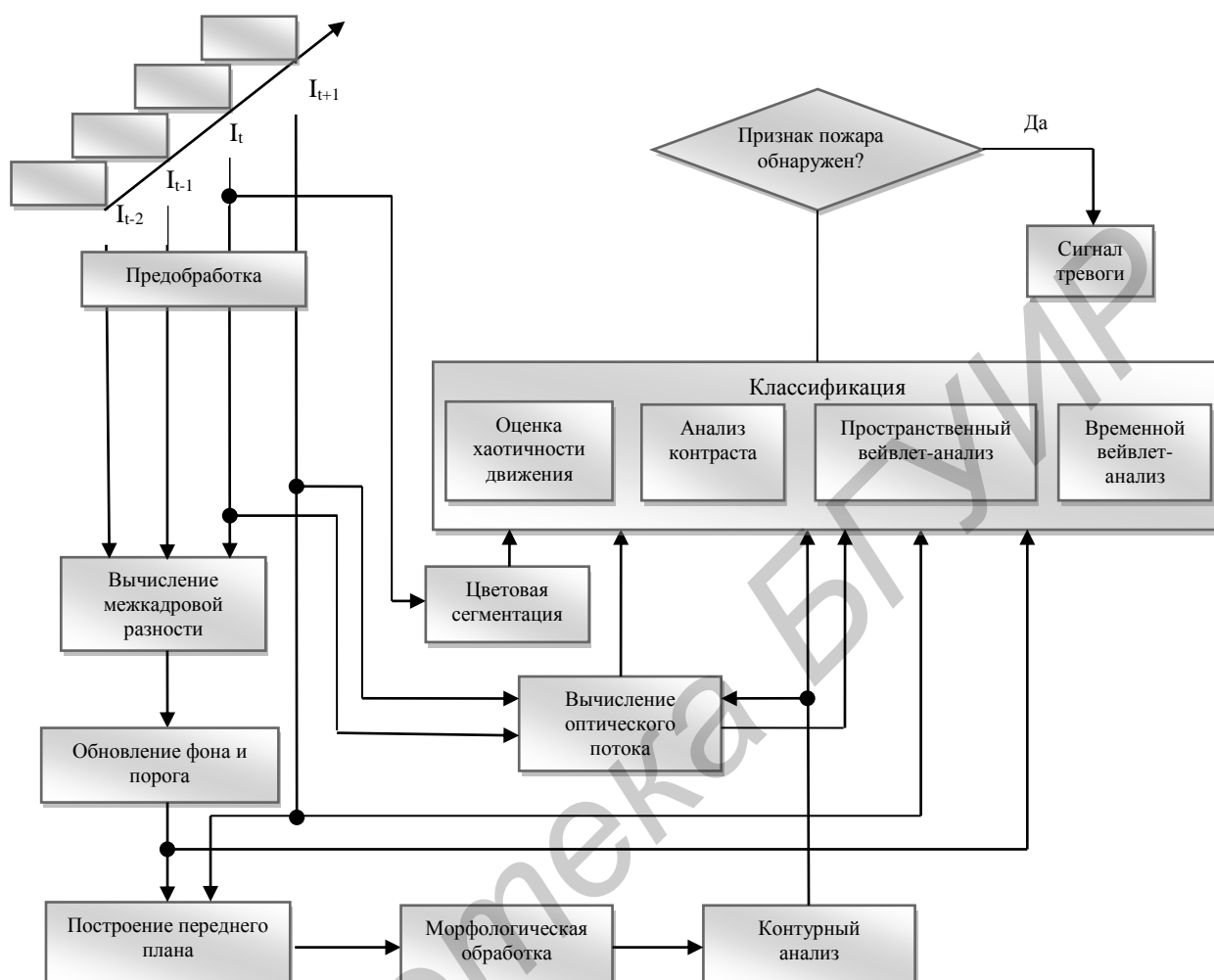


Рис. 1. Общая схема разработанного алгоритма для совместного обнаружения дыма и пламени

Для сегментации движения используется адаптивный алгоритм вычитания фона [28], позволяющий учитывать такую особенность дыма, как постепенное смешивание с фоном. Для исключения объектов, которые перешли из динамических в статические (например, остановившийся человек), из переднего плана кадра анализируется межкадровая разница. В случае, если ни для одного блока некоторого движущегося объекта разность яркостей на двух последних кадрах не превышает определенного порога, объект считается неподвижным и исключается из списка движущихся объектов. Результатом данного шага является бинарная маска движения.

Дальнейшее объединение движущихся пикселей в связные области осуществляется с использованием операций математической морфологии и контурного анализа. Для уменьшения количества шумов используются операции морфологического открытия и закрытия. Затем анализируется длина контура области: если контур имеет длину менее заданной пороговой величины – область удаляется из списка для дальнейшего рассмотрения.

Отличительной особенностью алгоритма, направленной на снижение вероятности ложного обнаружения, является оценка хаотичности движения на основе анализа направления векторов движения частиц в рассматриваемой области. Оптический поток вычисляется по методу Фарнебака [29]. Данный алгоритм менее чувствителен к шумам, чем поточные методы, и, в отличие от алгоритма Лукаса-Канаде, не является локальным, что позволяет определить

направление векторов движения, в том числе, и внутри однородных областей. Коэффициент сонаправленности движения частиц определяется по формуле

$$C = V_{cd} / V_{ncd}, \quad (1)$$

где V_{cd} – количество сонаправленных векторов движения, V_{ncd} – общее количество векторов движения в области.

Сегментация для пламени выполняется в цветовом пространстве YC_bC_r с учетом глобального анализа кадра и локального анализа области-кандидата, которая может быть отнесена к области пламени. При этом область считается принадлежащей пламени, если выполняются следующие условия:

$$Y_i > Y_{cp}, Cb_i < Cb_{cp}, Cr_i < Cr_{cp}, \quad (2)$$

где Y_i , Cb_i , Cr_i – среднее значение яркости, цветоразностного синего и цветоразностного красного составляющих в области-кандидате, Y_{cp} , Cb_{cp} , Cr_{cp} – среднее значение яркости, цветоразностного синего и цветоразностного красного составляющих в кадре соответственно;

Дым может изменять свои яркостно-цветовые характеристики в очень широком диапазоне значений, от прозрачно-серого до черного, поэтому применяется анализ контраста областей. Для анализа контраста областей, предположительно содержащих дым, используется контраст Вебера:

$$C_w = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{F_t(x, y) - B_t(x, y)}{B_t(x, y)}, \quad (3)$$

где $F_t(x, y)$ – значение интенсивности пикселя (x, y) , принадлежащего области в момент времени t ; $B_t(x, y)$ – значение интенсивности пикселя (x, y) фона под областью в момент времени t ; n – число пикселей, принадлежащих области-кандидату.

Для определения полупрозрачных объектов на изображении, на которых присутствует дым, используется двумерный пространственный вейвлет-анализ. В случае перекрытия краев объекта дымом наблюдается падение высокочастотной составляющей изображения, а соответственно и энергии, рассчитываемой по формуле

$$E(B_k, I_t) = \sum_{m, n \in B_k} [LH(m, n)^2 + HL(m, n)^2 + HH(m, n)^2], \quad (4)$$

где B_k – k -й блок изображения; I_t – входное изображение в момент времени t ; LH , HL , HH – это НЧ-ВЧ, ВЧ-НЧ, ВЧ-ВЧ коэффициенты вейвлет преобразования соответственно.

Для более точного сравнения блоков используется нормализованное значение, равное отношению энергии кадра к энергии фона:

$$\alpha(B_k, I_t, BG_t) = \frac{E(B_k, I_t)}{E(B_k, BG_t)}, \quad (5)$$

где BG_t – фоновое изображение в момент времени t .

Для определения мерцания границ, характерного для дыма и пламени, используется одномерный пространственно-временной вейвлет-анализ. С помощью пространственно-временного анализа рассчитывается количество вейвлет-экстремумов для каждой области изображения, как показано в следующей формуле:

$$\beta(B_k) = \frac{\sum |D[n]|}{N}, \quad (6)$$

где $D[n]$ – высокочастотная информация коэффициента α , N – количество ненулевых значений высокочастотных коэффициентов.

Результаты и их обсуждение

Для проведения экспериментов разработанный алгоритм реализован на языке C++ с использованием среды разработки Microsoft Visual Studio 2010 и библиотеки компьютерного зрения Open CV 2.2.

Представленные на рис. 2 кадры свидетельствуют, что для исследований использовались динамические изображения со сложным фоном (б, в, г), содержащие объекты, цвет и яркостные характеристики которых близки к характеристикам дыма и пламени (а, б, в, ж).

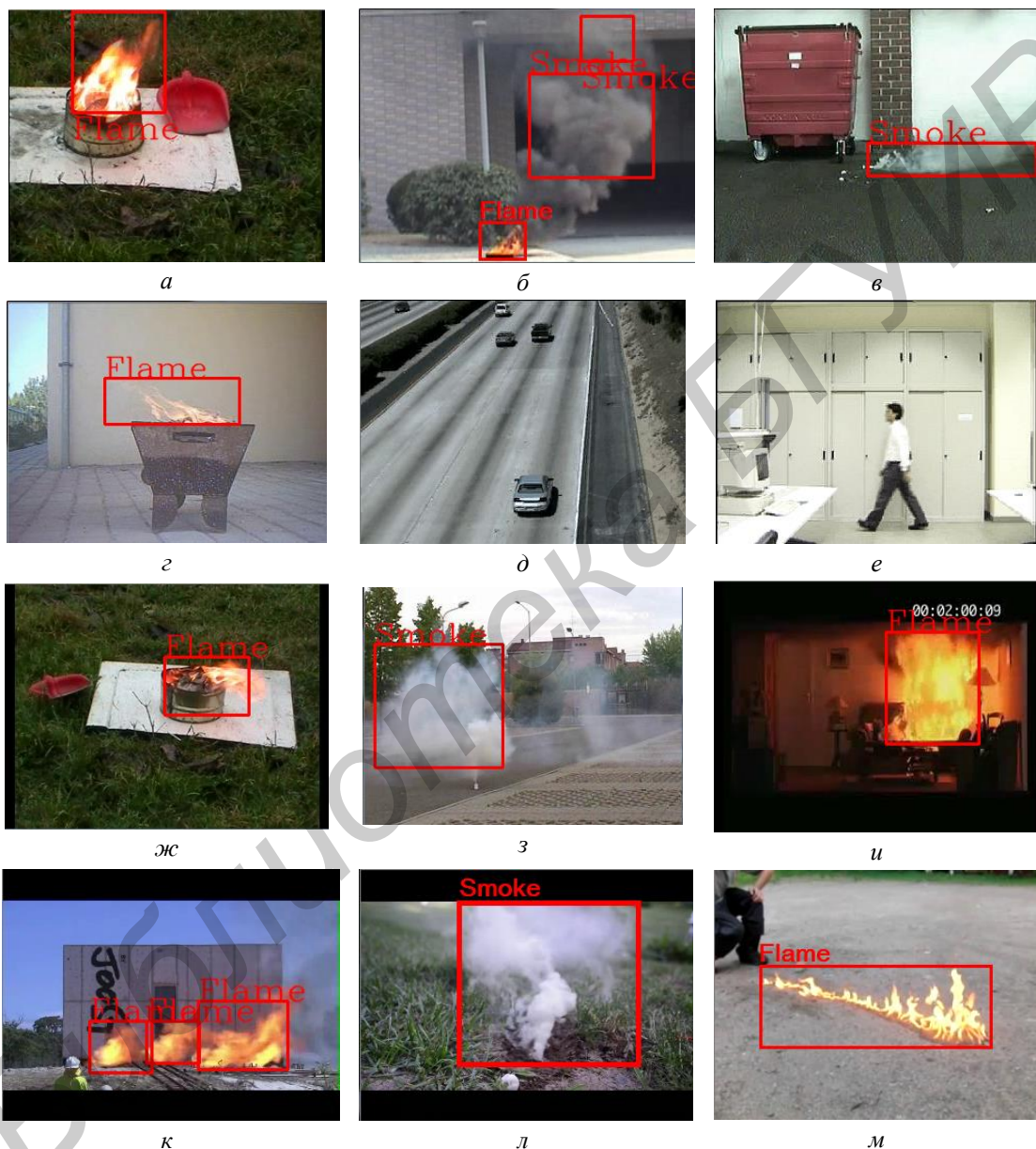


Рис. 2. Кадры исследуемых видеопоследовательностей

Кроме этого, исследовались видеопоследовательности (а, ж), на которых присутствовали дым и пламя с достаточно резким изменением направления и структуры, которое происходило из-за сильных порывов ветра. Следует отметить, что эксперименты проведены на видеопоследовательностях, не только размещенных на сайтах <http://www.openvisor.org>, <http://cvpr.kmu.ac.kr>, <http://signal.ee.bilkent.edu.tr/VisiFire/Demo/SampleClips.html>, но и полученных авторами в реальных условиях с использованием видеокамеры Panasonic SDR-S50. Результаты экспериментов показаны в табл. 2.

Таблица 2. Результаты исследований характеристик алгоритма

Видеоряд (см. рис. 2)	Пламя найдено/ присутствовало (число кадров)	Пламя присутствовало/ обнаружено с (номер кадра)	Дым найден/ присутствовал (число кадров)	Дым присутствовал/ обнаружен с (номер кадра)	Дым и пламя найдены/ присутствовали (число кадров)	Число кадров с ложным обнаружением/ общее число кадров
<i>a</i>	528/589	88/109	201/238	-/-	388/423	3/1375
<i>б</i>	-/-	1/32	-/-	1/33	489/517	2/517
<i>в</i>	-/-	-/-	858/866	9/10	-/-	0/900
<i>г</i>	348/413	1/24	-/-	-/-	-/-	4/439
<i>д</i>	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	6/500
<i>е</i>	-/-	-/-	-/-	-/-	-/-	0/887
<i>ж</i>	1089/1216	460/483	-/-	-/-	-/-	8/1443
<i>з</i>	-/-	-/-	1412/1497	421/452	-/-	4/1879
<i>и</i>	867/908	1/33	15/26	428/431	-/-	3/934
<i>к</i>	2019/2325	1/24	168/189	1026/1027	-/-	0/2325
<i>л</i>	-/-	-/-	664/689	39/51	-/-	1/790
<i>м</i>	947/967	168/191	-/-	-/-	-/-	9/1289

Анализ исследований показывает, что разработанный алгоритм обладает достаточно низким уровнем ложных тревог. Однако при наличии схожих объектов возможно ложное срабатывание.

Для оценки временных затрат работы алгоритма проведены экспериментальные исследования с использованием ноутбука Acer Aspire 5750G с основными параметрами Intel Core i5, 2,4ГГц, ОЗУ 4,0ГБ. Временные затраты при обработке одного кадра видеоряда размером 320×240 составляют 56 мс, 480×320 – 147мс, 640×480 – 316 мс. Время обработки может быть уменьшено за счет использования современных технологий параллельных вычислений, например, технологии CUDA и фрейворка OpenCL.

Заключение

Предложен алгоритм совместного обнаружения дыма и пламени на динамических изображениях, который использует признак движения, как общий для пламени и дыма. Для снижения вероятности ложного обнаружения выполняется анализ хаотичности движения в областях-кандидатах. Отличительной особенностью алгоритма является также использование на этапе классификации пространственного и временного вейвлет-анализа как для пламени, так и для дыма. Таким образом, применение единых приемов обработки упрощает структуру алгоритма для совместного обнаружения основных признаков пожара и позволяет снизить вычислительные затраты по сравнению с автономной реализацией алгоритмов.

ALGORITHM FOR COMPLEX SMOKE AND FLAME DETECTION BASED ON VIDEO SURVEILLANCE SYSTEMS DATA ANALYSIS

R.P. BOHUSH, D.A. TYCHKO

Abstract

An algorithm to detect the main signs of fire for video surveillance systems, which allows the detection of smoke, open flames, and their combination on dynamic images is proposed. A distinctive feature of the algorithm is the use of motion estimation, as a common feature, as well as the application of the algorithm of common approaches in the processing of video sequences. A set of experimental results are presented in the paper.

Список литературы

1. *Phillips III W., Shan M., Lobo N.* // Pattern Recognition Letter. 2002. Vol. 23. № 1–3. P. 319–327.
2. *Gomez-Rodriguez F., Pascual-Pena S., Arrue B. C. et. al.* // Proceedings of the 4th International Conference on Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. Coimbra, 18–23 November 2002. P. 59.
3. *Chen T., Wu P., Chiou Y.* // Proceedings of International Conference on Image Processing. Singapore, 10–12 October 2004. P. 1707–1710.
4. *Liu C. Ahuja N.* // Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition. Cambridge, 23–26 August 2004. P. 134–137.
5. *Toreyin B., Dedeoglu Y., Cetin A.* // Signal Processing: Image Communication, EURASIP. Elsevier. 2005. Vol. 20. P. 255–256.
6. *Toreyin B., Dedeoglu Y., Güdükbay U. et. al.* // Pattern Recognition Letters. 2006. Vol. 27. P. 49–58.
7. *Marbach G, Loepfe M., Brupbacher T.* // Fire Safety Journal. 2006. № 4. Vol. 41. P. 285–289.
8. *Xu Z, Xu J.* // Proceedings of International Conference on Computational Intelligence and Security Workshops. 2007. P. 316–319.
9. *Celik T, Demirel H, Ozkaramanli H. et. al* // Journal of Visual Communication and Image Representation. 2007. № 2. Vol. 18. P. 176–185.
10. *Celik T.* // ETRI Journal. 2010. № 6. Vol. 32. P. 881–890.
11. *Lee B., Han D.* // International Journal of Information Acquisition. 2007. № 4 Vol. 4. P. 327–338.
12. *Xiong Z., Caballero R, Wang H. et. al.* // Proceedings of the Suppression, Detection and Signaling Research and Applications – A Technical Working Conference. Orlando, 5–7 March 2007. P. 112.
13. *Piccinini P., Calderara S., Cucchiara R.* // Proceeding of the 15th International Conference on Image Processing. San Diego, 12–15 October 2008. P. 1376–1379.
14. *Calderara S., Piccinini P., Cucchiara R.* // Proceedings of the 6th International Conference on Computer Vision Systems. Santorini, 12–15 May 2008. P. 119–128.
15. *Yuan F.* // Pattern Recognition Letters, 2008. Vol. 29. P. 925–932.
16. *Qi X., Ebert J.* // International Journal of Imagine. 2009. № 9. Vol. 2. P. 22–34.
17. *Yasmin R.* // International Journal of Soft Computing. 2009. № 1. Vol. 4. P. 45–48.
18. *Gubbi J., Marusic S., Palaniswami M.* // Fire Safety Journal. 2009. № 8. Vol. 44. P. 1110–1115.
19. *Han D., Lee B.* // Fire Safety Journal. 2009. № 3. P. 951–961.
20. *Yu C., Zhang Y., Fang J. et. al.* // Proceedings of the 2nd International Conference on Advanced Computer Control. Shenyang, 27–29 March 2010. Vol. 2. P. 16–21.
21. *Calderara S, Piccinini P, Cucchiara R.* // Machine Vision and Applications. 2011. № 4. Vol. 22. P. 705–719.
22. *Brovko N., Bogush R., Ablameyko S.* // Journal of Computer Science and Cybernetics. 2012. № 3. P. 195–205.
23. *Morerio P., Marcenaro L., Regazzoni C. et. al.* // Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing, Orlando, 30 September 2012. P. 1041–1044.
24. *Gharge S., Birla S., Pandey S. et. al.* // International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2013. Vol. 2. P. 2420–2424.
25. *Yu C., Mei Z., Zhang X.* // The 9th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology. Procedia Engineering. 2013. Vol. 62. P. 891–898.
26. *Лукьяница А.А., Шшикин А.Г.* Цифровая обработка видеоизображений. М., 2009.
27. *Шоберг А.Г., Сай С.В.* // Вестник ТОГУ. 2013. № 1 (28). С. 45–50.
28. A system for video surveillance and monitoring. [Electronic resource]. – Mode of access: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.63.1129&rep=rep1&type=pdf>. – Date of access: 02.04.2014.
29. *Farneback G.* // Proceedings of the 13th Scandinavian Conference on Image Analysis, SCIA'03. Berlin, 29 June –2 July 2003. P. 363–370.

УДК 681.511-047.26:621.873

ОЦЕНКА И КОМПЕНСАЦИЯ АПОСТЕРИОРНОГО МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОЖИДАНИЯ СЛУЧАЙНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ В СИСТЕМЕ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ В ПРИЛОЖЕНИИ К УСТАНОВКАМ МОСТОВЫХ КРАНОВ

М.К. ХАДЖИНОВ, В.А. ШЕВЕЛЕВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 24 апреля 2015

Задача оценки и компенсации математического ожидания случайных возмущений, воздействующих на объект управления, решается с помощью регулятора с модальным управлением, основанном на расширенной эталонной модели, которая оценивает переменные состояния объекта управления и величину возмущений, воздействующих на объект управления, позволяя их компенсировать. Проведенные эксперименты показывают, что система оценивает величину математического ожидания и компенсирует возмущения.

Ключевые слова: модальное управление, эталонная модель, случайные возмущения, оценка математического ожидания.

Введение

Данная статья посвящена решению проблемы точности и плавности перемещения груза крановыми установками. Для увеличения производительности крановых установок желательно перемещение с наибольшими ускорениями и скоростями, что вызывает раскачивание груза. Колебания груза на тросовом подвесе практически не демпфируются воздушной средой. Одна из задач – быстрое управление точкой подвеса груза без его раскачивания. Другой причиной раскачивания груза будут случайные порывы ветра, действующие на груз и конструкции крана. Проблема гашения колебаний груза усугубляется отсутствием непосредственных датчиков измерения отклонения подвеса груза из-за их нетехнологичности и ненадежности. Раскачивание груза не только снижает производительность крановой установки, но и может привести к аварии. Поэтому разработка алгоритмов управления грузовой тележкой и мостом предотвращающих колебания груза, что является важной и актуальной задачей. При этом ключевым моментом решения задачи управления является получение оценок переменных состояния подвеса, а также случайных и детерминированных возмущений по косвенным измерениям.

Обзор имеющихся разработок

Рассмотрим одну из трактовок задачи управления в условиях воздействия внешней среды [1]. В работе есть раздел, посвященный синтезу оптимальных законов управления технологическими процессами. Автор рассматривает способы управления с учетом случайных факторов, воздействующих на процесс. Отмечается, что невозможно контролировать все параметры технологического процесса, поскольку не всегда возможно установить соответствующие датчики. Но даже если измерение возможно, оно происходит с большими погрешностями. Зачастую измерения представляют собой функции переменных состояния и содержат случайные ошибки. Кроме этого, сама система подвержена воздействию случайных возмущений.

Таким образом, для обеспечения оптимального управления необходимо оценивать переменные состояния либо по слишком малому, либо по слишком большому числу измерений, которые сами являются неточными и представляют собой функции переменных состояния. Оцененные значения переменных состояния можно получить, применяя фильтр Калмана-Бьюси, состоящий из модели управляемого объекта и окружающей среды, охваченных линейно-квадратичным регулятором.

Комбинация оптимального фильтра и оптимального детерминированного регулятора является регулятором с обратной связью, оптимальным в смысле среднего по ансамблю для линейной задачи с квадратичным функционалом и аддитивным гауссовским белым шумом. Оказывается, что при этом линейная обратная связь такая же, какой она получилась бы при отсутствии помех и точном измерении состояния системы. Линейная обратная связь находится, как и прежде, путем решения задачи детерминированного управления. Условное среднее значение состояния характеризуется выходной переменной фильтра Калмана-Бьюси, который по существу представляет математическую модель системы, когда управление осуществляется по наблюдениям. Характеристики фильтра зависят от помех и динамических свойств системы, но не зависят от критерия качества системы управления.

Задача прогнозирования и проблема управления по квадратичному критерию представляют собой математически двойственную задачу. Если одна из них решена, то, обращаясь к принципу двойственности, легко решить другую задачу. Для решения задач фильтрации и детерминированного управления могут быть использованы одни и те же программы для вычислительных машин.

Поскольку переход к системам со многими переменными не вызывает трудностей, то линейная стохастическая теория управления представляет собой мощное средство решения задач управления. Для решения уравнений Риккати, соответствующих оптимальной стратегии управления, известны численные методы проектирования систем управления.

В этой же работе [1] указывается, что обнуление матрицы обратных связей модели окружающей среды в фильтре Калмана-Бьюси позволяет решать задачу оптимального управления для возмущений с низкочастотным спектром.

Постановка задачи

В работе используется вышеизложенный подход к упрощению модели окружающей среды в фильтре Калмана-Бьюси. При этом задача оптимального управления и оптимального оценивания возмущения объекта управления окружающей средой не ставится. Считается достаточным точное оценивание возмущений наблюдателем со структурой фильтра Калмана-Бьюси и их компенсацию для установившегося процесса управления. То есть считается достаточным придание системе управления свойства астатизма по отношению к возмущению случайным и детерминированным воздействиями окружающей среды без использования специальных измерительных средств. Компенсатор возмущений легко встраивается в модальный регулятор контура управления.

Для заявленного технического приложения модель процессов управления грузом на подвесе сводится к управлению положением точки подвеса двумя электроприводами. Датчики положения груза относительно точки подвеса обычно не устанавливаются и не используются по технологическим причинам. Штатные датчики скорости электроприводов крановой установки принципиально могут их заменить, так как относительные координаты груза наблюдаемы в сигналах датчиков электроприводов.

Чтобы получить оценки координат груза в наблюдателе, в общую модель объекта следует включать как модель подвеса, так и электроприводов. Собственные числа модели подвеса и электропривода отличаются в 1000 и более раз. Поэтому порядок модели электропривода может быть уменьшен до единицы. Что фактически приводит к реализации идеи квазимодального регулятора [2]. При использовании безынерционной модели электропривода наблюдаемость переменных модели подвеса в сигналах датчиков скорости электроприводов исчезает.

Внесем ряд уточнений в традиционное математическое описание модели динамики объекта управления:

$$\dot{x}_1 = Ax_1 + Bu + Gv$$

$$y_1 = C_1x_1 + w_1,$$

и модели внешнего воздействия окружающей среды:

$$\dot{x}_2 = Ex_2 + Fn,$$

$$v = Hx_2.$$

Здесь: x_1 – 3-мерный вектор состояния: скорость тележки, скорость груза, отклонение груза; u – управление электроприводом тележки; v – вектор возмущений; y_1 – измерение скорости тележки; w_1 – шум измерения; x_2 – скалярное возмущение; $E = 0$; $H = 1$; $G = B$; n – вектор белого шума с нулевым средним значением; измерений возмущений не производится.

Разумно задать коэффициенты целевой функции квадратичного критерия качества для расчета линейно-квадратичного регулятора крайне затруднительно. Более того, рассчитанный линейно-квадратичный регулятор обязательно изменит частоту колебаний подвеса в сторону ее увеличения, путем чрезмерно интенсивных перемещений точки подвеса электроприводами. Что неизбежно отрицательно скажется на энергосбережении и безопасности эксплуатации крана.

В отличие от линейно-квадратичных регуляторов модальные регуляторы позволяют формировать систему управления более тонко и целенаправленно. Например, для крановой установки представляется нецелесообразным вводить изменение собственных частот колебаний электропривода и подвеса, а следует лишь добавить демпфирование колебаний подвеса до желаемого значения. Поэтому разумным представляется использование модальных регуляторов, как в контуре управления, так и в контуре оценивания. При этом в контуре оценивания следует сохранить структуру фильтра Калмана-Бьюси для возможности оценивания внешних возмущений без установки дополнительных датчиков.

Ранее авторами были разработаны алгоритмы [3–6] увеличения порядка астатизма по возмущению в системе управления с модальным регулятором без изменения порядка астатизма по управлению. Для достижения этого в контур оценивания вводится дополнительный интегратор для оценивания величины возмущений окружающей среды, действующих на объект управления в разных точках. На выходе этого интегратора формируется апостериорная оценка математического ожидания случайных возмущений. С целью упрощения компенсатора возмущений (сведения его коэффициента к единице) оценивание приводилось ко входу модели объекта управления [5].

Схема системы управления одной степенью свободы крановой установки с оцениванием и компенсацией внешних возмущений приведена на рис. 1.

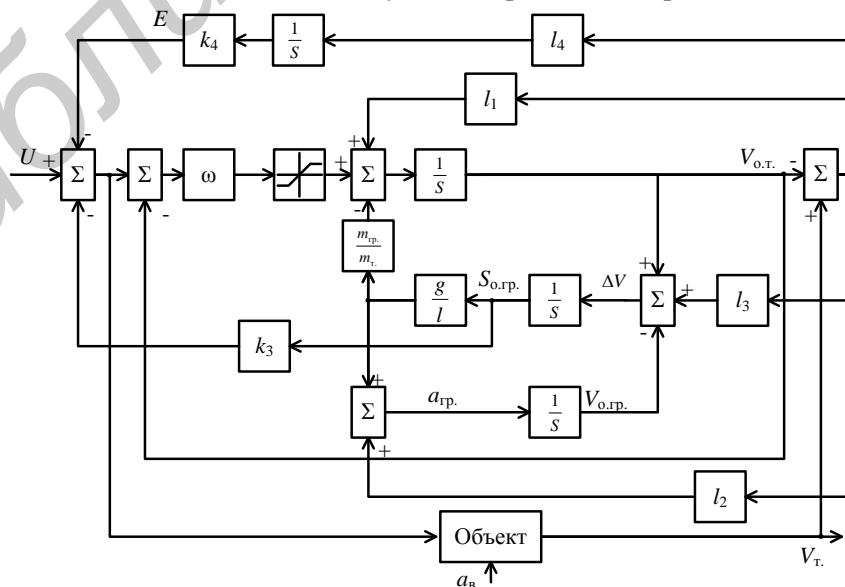


Рис. 1. Структурная схема системы управления с оцениванием и компенсацией внешних возмущений

На схеме рис. 1 приняты следующие обозначения: $m_{гр.}$ – масса груза; $m_{т.}$ – масса тележки; l – длина подвеса; g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$; ω – частота привода; k_3, k_4 – третий и четвертый коэффициенты модального регулятора контура управления соответственно, $k_4 = 1$; l_1-l_4 – коэффициенты модального регулятора контура оценивания.

На выходах интеграторов формируются оценки: скорости грузовой тележки, отклонения груза от точки подвеса, скорости груза, внешнего возмущения.

Суть работы регулятора заключается в следующем: сигналы с выхода объекта и выхода эталонной модели объекта сравниваются, и сигнал сравнения используется при выработке управляющего сигнала. Разность этих сигналов подается на вход регулятора контура оценивания, в котором используется модальный регулятор. Для оценивания ветрового возмущения к входу модели контура оценивания подключен интегратор, определяющий величину возмущения. Для всех действующих на объект управления случайных возмущений на выходе интегратора формируется апостериорная оценка их математического ожидания. Для компенсации возмущения с выхода этого интегратора подаются компенсирующие сигналы на вход объекта. Такая схема, как было показано ранее, обеспечивает астатизм первого порядка по возмущению [4]. Кроме этого было показано, что данная схема позволяет оценивать и компенсировать математическое ожидание случайных возмущений, воздействующих на объект управления.

С помощью моделирования в Matlab были решены следующие задачи. Во-первых, исследованы компенсации нескольких возмущений (как случайных, так и детерминированных), приложенных к объекту управления в разных точках. Во-вторых, изучено влияние компенсатора при параметрическом возмущении, т. е. при несоответствии длины подвеса в модели и реальной длине подвеса, а также массы груза в модели и реальной массе груза. В-третьих, сопоставлена способность исследуемого регулятора оценивать величину математического ожидания нестационарного случайного воздействия с оценкой по стандартной процедуре на основе апериодического звена.

Программа исследования

Программа исследования включает следующие этапы.

1. Исследование системы при воздействии нескольких возмущений, приложенных в разных точках к объекту. Данное исследование включает в себя:

– проверку при приложении постоянного возмущения к тележке и случайного к грузу.

При этом происходит компенсация и оценивание величины возмущений;

– проверку при подаче случайного возмущения к тележке и постоянного к грузу;

– проверку при подаче случайных возмущений и к тележке, и к грузу.

2. Исследование системы при параметрическом возмущении, включающее:

– проверку работы системы при несоответствии длины подвеса модели и объекта;

– проверку при несоответствии массы груза модели и объекта.

3. Сравнение способности апериодического звена со способностью исследуемого регулятора оценивать математическое ожидание случайных возмущений, включающее:

– исследование системы при случайном возмущении с постоянным математическим ожиданием, приложенном к грузу;

– исследование системы при случайном возмущении с линейно нарастающим математическим ожиданием, приложенном к грузу.

Моделирование производилось для следующих значений параметров: длина подвеса

$l = 1,5 \text{ м}$, отношение массы груза к массе тележки $\frac{m_{гр.}}{m_{т.}} = 3$, частота привода $\omega = 2500 \text{ с}^{-1}$,

случайные процессы с математическим ожиданием, равным 1, и среднеквадратичным отклонением, равным 1.

Воздействие нескольких возмущений и параметрических возмущений

Авторами проведена серия экспериментов, в которых возмущения прикладывались к разным точкам системы: к грузу, к тележке, а также различным образом изменялись параметры объекта, такие как длина подвеса и масса груза. Увеличение массы груза производилось до 30 % и уменьшение до 20 %. Изменение длины груза производилось в пределах 30 %. Математическое ожидание возмущений принималось равным 1, задающее воздействие также равно 1. На рис. 2 приведены некоторые из результатов, соответствующие скорости груза при воздействии возмущений на груз и тележку и параметрических возмущениях, а также при параметрических возмущениях при отсутствии внешних воздействий.

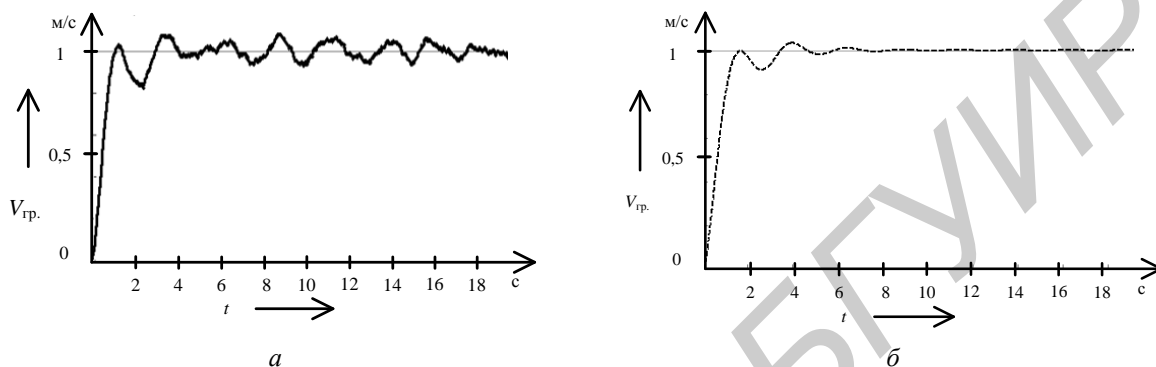


Рис. 2. Скорость груза *a* – при возмущениях в нескольких точках и параметрическом возмущении; *б* – при параметрическом возмущении

Серия экспериментов с разными соотношениями длин подвеса груза и массы груза модели и объекта показали, что при небольших отклонениях параметров модели от параметров объекта результат работы системы удовлетворительный.

Сравнение свойств исследуемой системы оценивания при нестационарном воздействии со стандартной процедурой на основе аperiodического звена

На рис. 3 показаны результаты оценки нестационарных случайных возмущений, приложенных к грузу, с нарастающим математическим ожиданием исследуемой системой управления и аperiodическим звеном:

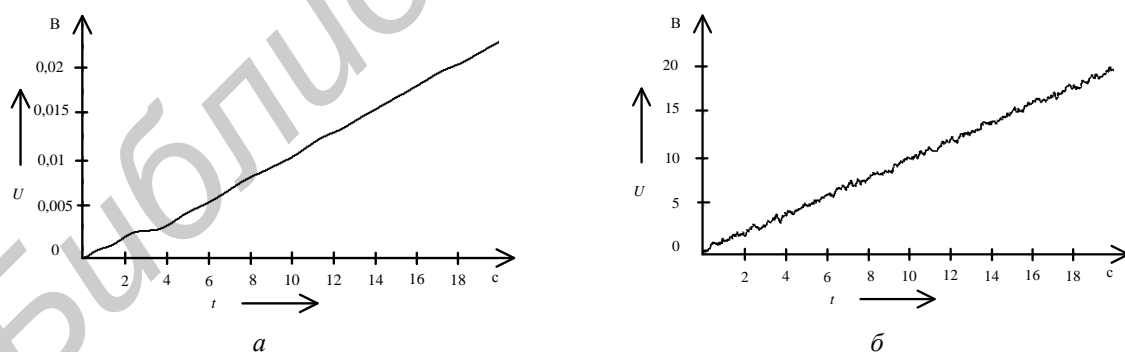


Рис. 3. Оценка возмущения *a* – системой; *б* – аperiodическим звеном

Видно, что на выходе оценивающего возмущение интегратора мы получаем оценку математического ожидания с коэффициентом 0,001125. Это число соответствует пересчету случайного воздействия на вход электропривода тележки по формуле: $\frac{m_T}{m_T \cdot \omega}$. Следует отметить, что оценка математического ожидания нечувствительна к дисперсии случайного процесса.

Заклучение

Как видно из проведенных экспериментов с моделью разработанной системы управления:

– наблюдатель, построенный как аналог фильтра Калмана-Бьюси, дает апостериорные оценки математического ожидания случайных возмущений, оценивает суммарное воздействие нескольких детерминированных возмущений;

– компенсатор, встроенный в модальный регулятор, справляется со случайными и детерминированными возмущениями, и обеспечивает астатизм системы управления к возмущающим воздействиям;

– оценщик возмущений и их компенсатор хорошо справляются с нестационарными случайными и детерминированными возмущениями,

– разработанная система управления подвесом кранового устройства не использует специальных датчиков координат подвеса, а базируется на датчике скорости электропривода перемещения точки подвеса груза;

– разработанная система управления подвесом кранового устройства даже при несоответствии модели параметрам кранового устройства сохраняет работоспособность и свойство точно компенсировать внешние возмущения.

ESTIMATION AND COMPENSATION OF POSTERIORI MATHEMATICAL EXPECTATION OF RANDOM PERTURBATIONS IN MODAL CONTROL SYSTEM IN APPLICATION OF BRIDGE CRANES

M.K. KHAJYNAU, V.A. SHEVELEVA

Abstract

The problem of estimation and compensation of the mathematical expectation of random perturbations that effect the controlling object is solving by modal control based on extended object's model which estimates object's state variables and the value of perturbations that effects object and therefore allows to compensate them. Experiments show that system estimates the value of mathematical expectation and compensates perturbations.

Список литературы

1. Пузырев В.А. Управление технологическими процессами производства микроэлектронных приборов. Москва, 1984.
2. Хаджинов М.К. // Докл. БГУИР. 2010. № 8. С. 33–37.
3. Булига М.И., Шевелева В.А. // Матер. 49-й научн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов «Информационные технологии и управление». Минск, 6–10 мая 2013 г. С. 66.
4. Хаджинов М.К., Булига М.И., Шевелева В.А. // Матер. Междунар. научн. конф. «Информационные технологии и системы». Минск, 23 октября 2013. С. 88–89.
5. Шевелева В.А. // Матер. 50-й научн. конф. аспирантов, магистрантов и студентов БГУИР. Минск, 24–28 марта 2014 г. С. 85.
6. Хаджинов М.К., Шевелева В.А. // Матер. междунар. научн. конф. «Информационные технологии и системы». Минск, 29 октября 2014 г. С. 82–83.

УДК 621.383.92

ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ШУМА ЛАВИННЫХ ФОТОПРИЕМНИКОВ В РЕЖИМЕ СЧЕТА ФОТОНОВ

О.К. БАРАНОВСКИЙ, А.О. ЗЕНЕВИЧ, А.М. ТИМОФЕЕВ, О.Ю. ГОРБАДЕЙ

Учреждение образование «Высший государственный колледж связи»
Ф.Скорины, 8/2, Минск, 220114, Беларусь

Поступила в редакцию 5 мая 2015

Предложены выражения для определения коэффициента шума лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов. Выполнены измерения коэффициента шума кремниевых лавинных фотоприемников в зависимости от напряжения питания, температуры окружающей среды, мощности регистрируемого оптического излучения.

Ключевые слова: счет фотонов, коэффициент шума, отношение сигнал/шум, лавинный фотоприемник.

Введение

В последние годы для приема слабых оптических сигналов с мощностью, меньшей либо равной 10^{-12} Вт, широкое применение находят счетчики фотонов [1]. Для оценки чувствительности счетчика фотонов необходимо не только определить пороговую мощность регистрируемого оптического излучения, но и знать его способность выделять слабые оптические сигналы на фоне шумов. Шумы могут быть вызваны флуктуациями регистрируемого оптического излучения, а также фотоприемником и системой регистрации счетчика фотонов [1,2]. Определяющий вклад в эти шумы вносят флуктуации регистрируемого оптического излучения и шумовые процессы фотоприемников [2]. Поэтому шумами регистрирующей системы счетчика фотонов можно пренебречь.

Для оценки чувствительности фотоприемника используется коэффициент шума F , определяемый как отношение сигнал/шум на выходе фотоприемника к отношению сигнал/шум на его входе [3].

Однако до настоящего времени в литературе отсутствуют сведения об оценках коэффициента шума F фотоприемников в режиме счета фотонов, в связи с этим целью данной работы является установление зависимостей F от статистики фотонов регистрируемого излучения, фоновых шумов, шумов фотоприемника.

Модель фотоприемника

Предположим, что на вход фотоприемника поступает стационарный оптический поток, формируемый фотонами сигнального оптического излучения с постоянной мощностью и фонового излучения. Под оптическим информационным сигналом будем понимать постоянную составляющую сигнального оптического излучения, а шум будет определяться флуктуациями числа фотонов сигнального оптического излучения и фонового излучения.

В этом случае можно записать отношение сигнал/шум ρ_0 для поступающего на фотоприемник оптического информационного сигнала:

$$\rho_0 = \frac{\langle N_\phi \rangle^2}{D_\phi + D_\psi}, \quad (1)$$

где $\langle N_\phi \rangle$ – среднее число фотонов информационного сигнала, попавших на фотоприемник за время измерения t , D_ϕ и D_ψ – дисперсия числа фотонов информационного сигнала N_ϕ и числа фотонов фонового излучения N_ψ , соответственно.

С учетом дисперсионной теоремы Бурже [4], на выходе фотоприемника с квантовой эффективностью регистрации η и средним числом темновых импульсов $\langle N_\tau \rangle$ за время измерения t , отношение сигнал/шум ρ_1 можно записать в виде:

$$\rho_1 = \frac{\eta^2 \langle N_\phi \rangle^2}{\eta(1-\eta) \langle N_\phi \rangle + \eta^2 D_\phi + \eta(1-\eta) \langle N_\psi \rangle + \eta^2 D_\psi + D_\psi}, \quad (2)$$

где D_τ – дисперсия числа темновых импульсов N_τ , $\langle N_\psi \rangle$ – среднее число фотонов фонового излучения. Темновыми называют импульсы, возникающие в фотоприемнике в отсутствие оптического излучения.

Соответственно, коэффициент шума фотоприемника в режиме счета фотонов:

$$F = \frac{\rho_0}{\rho} = \frac{\eta(1-\eta)(\langle N_\phi \rangle + \langle N_\psi \rangle) + \eta^2(D_\phi + D_\psi) + D_\psi}{\eta^2(D_\phi + D_\psi)}. \quad (3)$$

Значение F целесообразно рассматривать в диапазоне от 1 до ρ_0 . Это связано с тем, что если фотоприемник не вносит изменений в отношении сигнал/шум на его входе, то $F = 1$. Минимальное значение отношения ρ_1 , при котором возможна регистрация сигнала на выходе счетчика фотонов, равно единице. В этом случае значение коэффициента шума равно $F = \rho_0$.

Для большинства прикладных задач используется оптическое излучение со статистикой фотонов, определяемой распределением Пуассона, как для фонового излучения, так и информационного сигнала [1, 2]. В этом случае выражение (3) принимает вид:

$$F = \frac{\eta(\langle N_\phi \rangle + \langle N_\psi \rangle) + \langle N_\tau \rangle}{\eta^2(\langle N_\phi \rangle + \langle N_\psi \rangle)}. \quad (4)$$

Для фотоприемников, в которых $\langle N_\phi \rangle \geq \langle N_\tau \rangle$ или $\langle N_\psi \rangle \geq \langle N_\tau \rangle$, для коэффициента шума справедливо отношение

$$F = \frac{1}{\eta}. \quad (5)$$

Указанные условия выполняются для лавинных фотоприемников, охлажденных до температуры жидкого азота [1, 2]. В этом случае коэффициент шума равен среднему числу фотонов, попадающих на фотоприемник, при котором на его выходе будет зарегистрирован в среднем один сигнальный импульс.

Для фотоприемников, в которых $\langle N_\phi \rangle \gg \langle N_\psi \rangle$, коэффициент шума определяется выражением:

$$F = \frac{\eta \langle N_\phi \rangle + \langle N_\tau \rangle}{\eta^2 \langle N_\phi \rangle} = \frac{1}{\eta} \left(1 + \frac{\langle N_\tau \rangle}{\langle N_\phi \rangle} \right), \quad (6)$$

где $\langle N_c \rangle$ – среднее число сигнальных импульсов (образованных фотонами оптического информационного сигнала) на выходе фотоприемника, работающего в режиме счета фотонов. Указанное условие выполняется в случаях полного затемнения лавинных фотоприемников [1, 2].

При постоянном значении $\langle N_\tau \rangle$ и увеличении $\langle N_c \rangle$ величина F , рассчитанная по формуле (6), приближается к значению коэффициента шума, определяемого выражением (5).

С учетом выражения (6), максимальное значение коэффициента шума, при котором возможно зарегистрировать информационный сигнал на выходе фотоприемника, определяется формулой:

$$F = \frac{1 + \sqrt{1 + 4 \langle N_\tau \rangle}}{2\eta}. \quad (7)$$

В формулу (7) входят параметры, характеризующие счетчик фотонов. Увеличение числа темновых импульсов, зарегистрированных в течение времени t , и уменьшение квантовой эффективности регистрации приводят к увеличению коэффициента шума.

При значениях $\langle N_T \rangle \gg 1$ формулу (7) можно записать в следующем виде:

$$F \approx \frac{\sqrt{\langle N_T \rangle}}{\eta}. \quad (8)$$

На основании формул (7) и (8), а также [1] можно сделать заключение, что максимальное значение F , при котором возможно принять оптический информационный сигнал, равно минимальному числу фотонов, которое может быть детектировано фотоприемником в течение времени t .

Таким образом, в случае пуассоновского источника оптического излучения минимальное значение коэффициента шума равно $1/\eta$, а максимальное значение соответствует минимальному числу фотонов, которое может быть детектировано фотоприемником в течение времени t .

Описание установки и методика эксперимента

Объектом исследования являлись счетчики фотонов на лавинных фотоприемниках (ЛФП): кремниевых лавинных фотодиодах промышленного изготовления ФД-115Л, кремниевых ЛФП с металл-резистивный слой-полупроводник (МРП) структурой.

Для проведения исследований использовалась экспериментальная установка, блок-схема которой приведена на рис. 1.

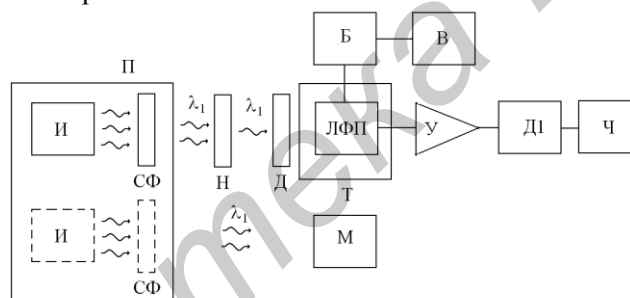


Рис. 1. Блок-схема установки для измерения коэффициента шума:

П – механическая платформа; И – источник оптического излучения, СФ – светофильтр, Н – нейтральный светофильтр, Д – диафрагма, М – измеритель мощности оптического излучения, Т – камера тепла и холода, ЛФП – лавинный фотоприемник, Б – блок питания лавинного фотодиода, В – вольтметр, У – усилитель импульсов, Д1 – дискриминатор, Ч – частотомер

Источник оптического излучения И вместе со светофильтром СФ размещены на подвижной механической платформе П. Платформа П перемещает источник И и светофильтр СФ в два положения. В одном положении оптическое излучение от источника И через светофильтр СФ поступает на измеритель мощности М. Измеритель мощности определяет мощность оптического излучения источника И с длиной волны λ_1 , выделенного светофильтром СФ. В другом положении платформы оптическое излучение источника И с длиной волны λ_1 , выделенное светофильтром СФ, поступает на нейтральный светофильтр Н. Светофильтр Н ослабляет мощность оптического излучения в k раз. После светофильтра Н излучение подается на диафрагму Д. Диафрагма Д в открытом состоянии пропускает через себя оптическое излучение без потерь. После диафрагмы излучение поступает на лавинный фотоприемник ЛФП. В закрытом состоянии диафрагма Д не позволяет оптическому излучению от источника поступать на ЛФП. Лавинный фотоприемник помещен в камеру тепла и холода Т. При помощи камеры Т задается рабочая температура фотоприемника. Температура фотоприемника может изменяться в диапазоне от 150 до 300 К.

Под действием фотона оптического излучения на выходе ЛФП образуется импульс напряжения. Количество импульсов напряжения на выходе ЛФП прямо пропорционально числу фотонов, поступивших на его вход. Импульсы с выхода ЛФП поступают на усилитель У.

После усилителя импульсы поступают на амплитудный дискриминатор Д1. При помощи дискриминатора осуществляется амплитудная селекция усиленных импульсов ЛФП от шумов усилителя. Порог амплитудной селекции дискриминатора выбирается над уровнем собственных шумов усилителя У. На выходе дискриминатора Д1 импульсы нормируются по амплитуде и длительности. Выходные импульсы дискриминатора поступают на вход частотомера Ч. Частотомер подсчитывает количество импульсов.

Блок питания Б обеспечивает напряжение электропитания на ЛФП. Величина напряжения электропитания регистрируется при помощи вольтметра В. Для работы ЛФП в режиме счета фотонов выбирается напряжение электропитания U_n равным или близким к напряжению пробоя $U_{пр}$ [1].

Подаваемая на ЛФП мощность оптического излучения P_n на длине волны λ_1 регулируется при помощи ослабляющего нейтрального светофильтра, характеризуемого коэффициентом ослабления k .

В процессе измерения подсчитывалось число импульсов n_t за единицу времени при закрытой диафрагме Д на выходе ЛФП. Затем определялось число импульсов $n_{ст}$ за единицу времени при открытой диафрагме Д на выходе ЛФП. После чего рассчитывался коэффициент шума по формуле:

$$F = \frac{P_n \lambda_1}{k(n_{ст} - n_t) h c} \frac{n_{ст}}{n_t}, \quad (9)$$

где h – постоянная Планка, c – скорость света.

При проведении измерений изменялись перенапряжение ЛФП $\Delta U = U_n - U_{пр}$ (U_n – напряжение обратного смещения ЛФП, $U_{пр}$ – напряжение пробоя ЛФП), рабочая температура фотоприемника, мощность оптического излучения. Для оценки зависимостей использовался ΔU , поскольку исследуемые ЛФП имеют различное напряжение пробоя. Длина волны λ_1 оптического излучения составляла 850 нм, что соответствовало максимальной чувствительности ЛФП.

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Измеренные изменения коэффициента шума от ΔU при постоянной мощности оптического излучения $P_n = 10^{-12}$ Вт и температуре $T = 293$ К приведены на рис. 2. Кривые зависимостей коэффициента шума от перенапряжения имеют минимум. Минимум соответствует перенапряжению $\Delta U = 0,10$ В для ЛФП с МРП структурой и $\Delta U = 0,20$ В – ФД-115Л. Для того, чтобы ЛФП вносил минимальный вклад в отношение сигнал/шум входного информационного сигнала, необходимо устанавливать перенапряжение, соответствующее минимуму зависимости $F(\Delta U)$. Влияния нестабильности напряжения питания ΔU_n на изменения коэффициента шума ΔF вблизи минимума $F(\Delta U)$ составляет $\Delta F/\Delta U_n = 110$ В⁻¹ для ЛФП с МРП структурой и $\Delta F/\Delta U_n = 100$ В⁻¹ для ФД-115Л. Нестабильность напряжения электропитания составляла $\Delta U_n = 0,01$ В.

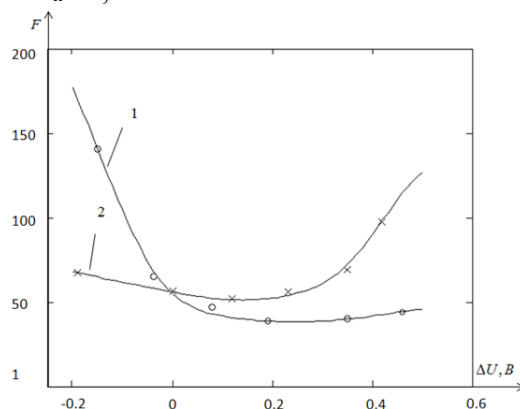


Рис. 2. Зависимость коэффициента шума от перенапряжения на лавинном фотоприемнике 1 – фотоприемник ФД-115Л; 2 – для ЛФП с МРП структурой

Измеренные зависимости коэффициента шума от температуры T при перенапряжении $\Delta U = 0,2$ В и мощности оптического излучения $P_{\text{и}} = 10^{-12}$ Вт приведены на рис. 3.

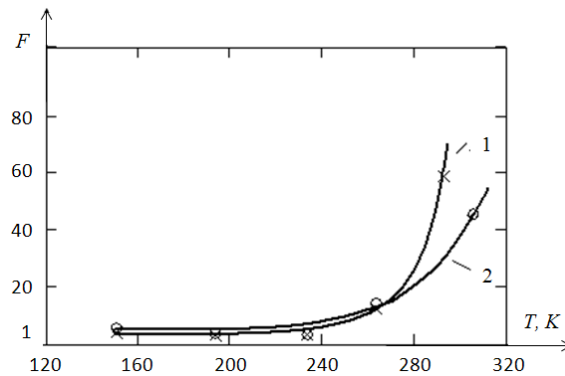


Рис. 3. Зависимость коэффициента шума лавинного фотоприемника от температуры 1 – для ЛФП с МРП структурой; 2 – для ФД-115Л

При понижении температуры значение коэффициента шума уменьшается для исследуемых ЛФП. Более сильная зависимость коэффициента шума от температуры наблюдается для ЛФП с МРП структурой $\Delta F/\Delta T = 0,4$ K^{-1} , в то время как для ФД-115Л $\Delta F/\Delta T = 0,3$ K^{-1} . При этом, $\Delta F = F_1 - F_2$ (где F_1 и F_2 – коэффициенты шума при температурах 300 К и 150 К соответственно). Наибольшая зависимость коэффициента шума от температуры наблюдается в диапазоне температур от 250 К до 300 К. Это связано с тем, что в этом диапазоне температур наблюдается рост квантовой эффективности с уменьшением температуры от 0,03 до 0,25 для ФД-115Л и от 0,05 до 0,30 для ЛФП с МРП структурой. При этом, с понижением температуры значение $n_{\text{т}}$ изменяется для ФД-115Л от $1,7 \cdot 10^4$ до 10^{-1} с^{-1} , а для ЛФП с МРП структурой от $3,0 \cdot 10^4$ до $2,0 \cdot 10^{-1} \text{ с}^{-1}$. В диапазоне температур от 150 К до 250 К квантовая эффективность ЛФП всех исследуемых типов изменялась незначительно.

Измеренные зависимости коэффициента шума от мощности оптического излучения при постоянных величинах $\Delta U = 0,2$ В и температуре $T = 300$ К представлены на рис. 4. Измерение коэффициента шума проводилось от $1,5 \cdot 10^{-15}$ до 10^{-12} Вт.

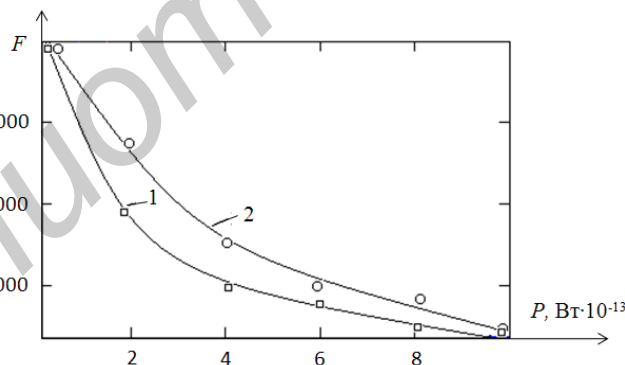


Рис. 4. Зависимость коэффициента шума лавинного фотоприемника от мощности регистрируемого оптического излучения: 1 – для ЛФП с МРП структурой; 2 – для ФД-115Л

Коэффициент шума уменьшается для всех типов исследуемых фотоприемников с увеличением мощности оптического излучения. Значения коэффициента шума фотоприемников ФД-115Л больше, чем для ЛФП с МРП структурой во всем диапазоне исследуемых мощностей. Это связано с тем, что ФД-115Л имеют меньшую квантовую эффективность регистрации по сравнению с ЛФП с МРП структурой, даже в условиях превышения значений интенсивности темновых импульсов ЛФП с МРП структурой ($n_{\text{т}} = 3,0 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$) над интенсивностью темновых импульсов ФД-115Л ($n_{\text{т}} = 1,7 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$). Следовательно, в этом случае, вклад квантовой эффективности регистрации в величину коэффициента шума больше, чем вклад интенсивности темновых импульсов $n_{\text{т}}$.

Заключение

В результате измерений установлено, что для уменьшения коэффициента шума фотоприемников, используемых в счетчиках фотонов, необходимо повысить их квантовую эффективность регистрации и уменьшить интенсивность темновых импульсов, регистрируемых в течение времени измерений информационного потока. Это можно обеспечить понижением рабочей температуры ЛФП до 250 К.

Для получения наименьшего значения коэффициента шума необходимо выбирать перенапряжение ЛФП, соответствующее минимуму зависимости $F(\Delta U)$.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (договор №Т11ОБ-043).

EVALUATION OF AVALANCHE PHOTODETECTORS NOISE FACTOR OPERATING IN PHOTON COUNTING MODE

A.K. BARANOUSKI, A.O. ZENEVICH, A.M. TIMOFEEV, O.Y. GORBADEY

Abstract

The expressions for determination of the avalanche photodetectors noise factor are proposed. The silicon avalanche photodetectors noise factor depending on the supply voltage, ambient temperature, the power of registered optical radiation are measured.

Список литературы

1. Гулаков И.Р., Зеневич А.О. Фотоприемники квантовых систем. Минск, 2012.
2. Ветохин С.С., Гулаков И.Р., Перцев А.Н. и др. Одноэлектронные фотоприемники. М., 1986.
3. Робинсон Ф.Н.Х. Шумы и флуктуации в электронных схемах и цепях. М., 1980.
4. Перина Я. Квантовая статистика линейных и нелинейных оптических явлений. М., 1987.

УДК 621.762:66.084

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ, ФОРМЕ И МАССЕ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВИБРАЦИИ

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6 Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 5 июня 2015

Приведены результаты исследований процесса разделения твердых частиц по размерам, форме и массе под воздействием вибраций. В результате проведенных исследований установлены три области возможных состояний дисперсной смеси твердых частиц в зависимости от параметров вибрации, воздействующей на данную смесь: область, в которой происходит уплотнение частиц смеси; область разделения частиц по размерам и массе и область интенсивного перемешивания (вibroкипение) смеси порошков.

Ключевые слова: вибрация, частица, разделение, размер, масса, форма.

Введение

Вибрацию используют в различных областях деятельности человека при выполнении разнообразных технологических процессов, например, разделении дисперсных материалов по физико-механическим свойствам и их смешивание; уплотнение обрабатываемой дисперсной среды и ее разрыхление; заполнение емкостей сыпучими материалами и их разгрузка и др [1–3].

Важной особенностью полезного использования вибрации в различных областях народного хозяйства является разделение твердых частиц по их физическим характеристикам [4]. С помощью вибрационного разделения дисперсных частиц решают многие технологические задачи: очистка сырья от примесей; фракционирование, сортирование и др. [5]. Причинами разделения частиц могут быть их различия в размерах, форме, плотности, упругости, и др. В большинстве случаев влияние этих свойств на процессы разделения под воздействием вибрации проявляются в определенных сочетаниях друг с другом. На практике, как правило, одно из них выделяют в качестве основного, остальные же являются вспомогательными. Основы теории предельного равновесия дисперсной среды, предложенные еще в середине XVIII века Кулоном, положили начало систематическим исследованиям в области теории и практики дисперсных материалов. Однако необходимо отметить, что до сих пор нет законченной и обобщенной теории динамики дисперсных сред, что осложняет разработку и применение динамических процессов, происходящих в дисперсных средах под воздействием вибраций. Поэтому для разработки и внедрения процессов, основанных на разделении частиц дисперсной среды под воздействием вибрации, путь экспериментального исследования закономерностей поведения частиц под воздействием вибрации является основным.

Целью данной работы является исследование процесса разделения частиц дисперсной среды по физическим свойствам под воздействием вибрации.

Методика эксперимента

Исследования процесса разделения частиц, по размерам, форме и массе проводили с помощью вибрационного электродинамического стенда типа ВЭДС-10А и устройств, представленных на рис. 1.

Стенд состоит из вибростола, усилителя и пульта управления. Принцип работы вибратора основан на использовании электродинамической приводной системы, которая состоит из электромагнита с кольцевым воздушным зазором и подвижной системы подвешенной на двух упругих мембранах. По катушке подмагничивания пропускается постоянный ток от блока подмагничивания. Через подвижную катушку пропускается переменный ток, частота и величина которого определяется параметрами испытаний и задается пультом управления вибратора через усилитель. Ток подвижной катушки взаимодействует с постоянным полем электромагнита, и создает толкающую силу, которая приводит в действие вибростол с испытуемым образцом. Вибрационный стенд имеет следующие основные технические характеристики: рабочий диапазон частот 5–5000 Гц; максимальное виброускорение – 160 м/с².

Исследования процесса разделения частиц, по размерам, форме и массе проводили с помощью вибрационного электродинамического стенда типа ВЭДС-10А и устройств, представленных на рис. 1.



Рис. 1 Вибрационный стенд ВЭДС-10А (а), вибростол и устройство для исследования процесса сегрегации частиц по размерам (б)

Исследования разделения частиц по размерам при наложении вибрации заключались в проведении экспериментов по перемещению крупных частиц, проходящих через слой мелких, при различных параметрах вибрации. При исследовании разделения частиц по массе, легкие частицы помещались внизу контейнера, а сверху насыпался слой более тяжелых частиц. Для этого был изготовлен специальный контейнер, из прозрачного органического стекла, который крепился к вибростолу (рис. 1, б). Наблюдая за положением исследуемых частиц в контейнере, а также измеряя время их движения к поверхности, определяли параметр классификации (разделения) (время перемещения исследуемых частиц на поверхность). При этом считали, что чем больше эта величина, тем меньше склонность частиц дисперсной смеси к разделению.

Исследования явления разделения по размерам и форме проводились на частицах порошка бронзы марки БрОФ-10-1 следующих фракций: (–0,063...+0,04); (–0,1...+0,063); (–0,16...+0,1); (–0,2...+0,16); (–0,315...+0,2); (–0,4...+0,315); (–0,63...+0,4) мм с фактором формы $FF = 1$ и $FF = 0,5$.

Перед постановкой экспериментов порошки фракций (–0,063...+0,04) и (–0,1...+0,063) просушивали в сушильном шкафу при температуре 100 °С в течение 1 ч., а порошки остальных фракций – подвергали температурной обработке при температуре 450 °С. При этих температурных режимах порошки более крупных фракций окислялись и приобретали темный цвет, поэтому хорошо отличались в прозрачном контейнере от порошков мелких фракций.

Экспериментальные исследования

Для исследования явления разделения частиц по массе для исследований были выбраны кроме порошков бронзы, порошки титана, алюминия, а также порошок карбамида.

При исследовании закономерностей разделения были проведены эксперименты по определению влияния на этот процесс следующих факторов: соотношения размеров мелких и крупных частиц, соотношения массы легких и тяжелых частиц; фактора формы частиц; исходного положения крупных частиц в контейнере; параметров вибрации (частоты, ускорения, направления колебаний); толщины слоя мелких частиц.

Эксперименты показали, что разделение частиц по размерам, массе наблюдается в определенном диапазоне значений параметров частоты и ускорения вибрации, а также их

сочетаний. Так, на рис. 2 показаны три области состояния дисперсной смеси в зависимости от параметров вибрации. В области I происходит только уплотнение смеси порошков. В области II происходит разделение частиц по размерам, массе, причем границы области не зависят от соотношения размеров и массы мелких и крупных частиц. В области III происходит интенсивное перемешивание (виброкипение) смеси порошков, т.е. такое состояние, в котором частицы, перемещаясь, отрываются друг от друга. Естественно для технологических процессов, основанных на разделении дисперсных сред наибольший интерес представляет область II, в которой наблюдается разделение частиц по размерам и массе. Математической обработкой кривых, представленных на рис. 2, была получена следующая регрессионная зависимость диапазона параметров колебаний, при которых происходит разделение частиц по размерам и массе.

$$3,96 \exp 0,0103 f \leq a \leq 8,78 \exp 0,012 f, \quad (1)$$

где, a – ускорение вибрации, м/с^2 ; f – частота вибрации, Гц.

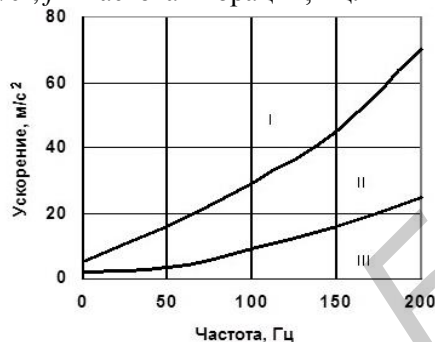


Рис. 2. Поведение частиц порошка в зависимости от параметров вибрации:
I – уплотнение, II – разделение, III – виброкипение

На рис. 3 показана зависимость времени разделения частиц порошка бронзы по размерам от параметров вибрации. Из приведенных зависимостей следует, что с увеличением ускорения вибрации, время разделения при любой заданной частоте уменьшается.

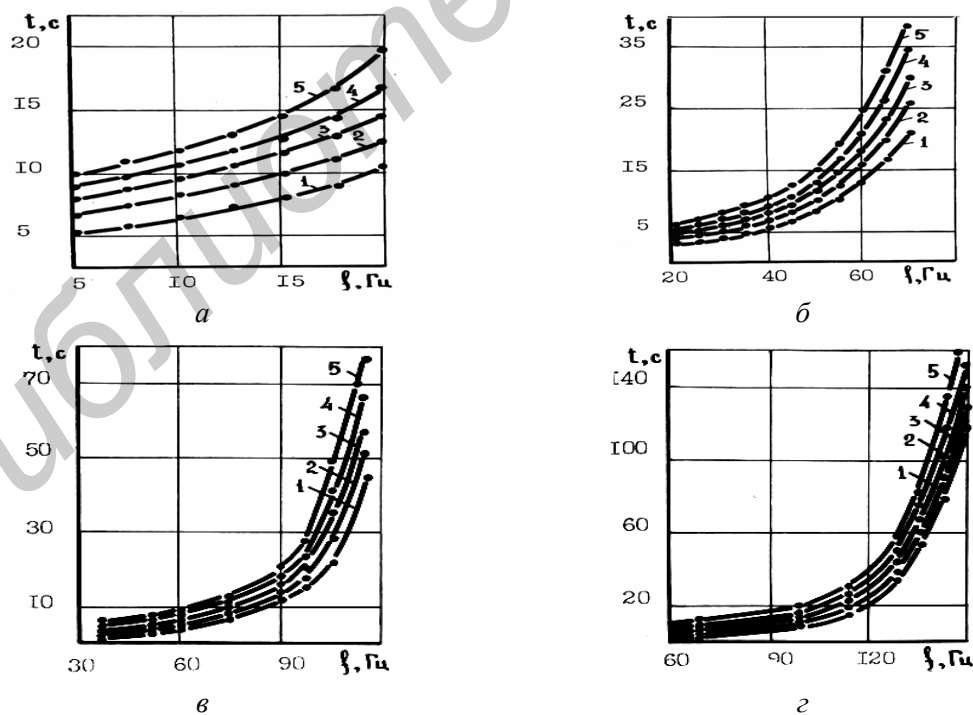


Рис. 3. Зависимость времени разделения t от частоты f при заданных значениях ускорения:
 a – 5 м/с^2 ; $б$ – 10 м/с^2 ; $в$ – 15 м/с^2 ; $г$ – 20 м/с^2

Размер мелких частиц порошка бронзы марки БрОФ-10-1 ($-0,063...+0,04$) мм. Размер крупных частиц: 1 – ($-0,63...+0,4$) мм; 2 – ($-0,4...+0,315$) мм; 3 – ($-0,315...+0,2$) мм; 4 – ($-0,2...+0,16$) мм; 5 – ($-0,16...+0,1$) мм.

В табл. 1 приведены значения ускорения, при которых время разделения частиц по размерам имеет наименьшее значение.

Таблица 1. Значения параметров вибрации, соответствующие минимальному времени разделения частиц порошка бронзы

Частота, Гц	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200
Ускорение, m/c^2	12	14	16	21	27	33	41	49	65	81

На рис. 4, а приведены зависимости времени разделения частиц от размеров крупных частиц и толщины слоя мелких, из которого можно видеть, что чем толще слой мелких частиц, тем больше время сегрегации. Вместе с тем, нет прямой зависимости между этими величинами для идентичных условий вибрации.

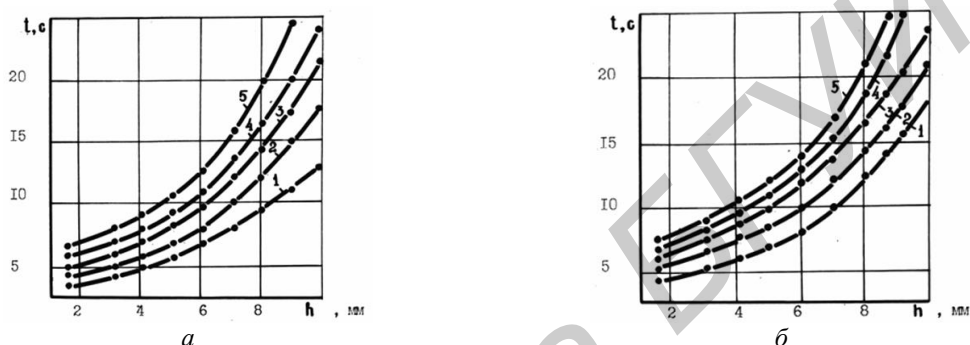


Рис. 4. Зависимость времени разделения t от толщины слоя h :

- а – разделение частиц порошка бронзы марки БрОФ-10-1 по размерам ($a = 10 m/c^2, f = 30$ Гц, размер мелких частиц ($-0,063...+0,04$) мм, размер крупных частиц: 1 – ($-0,63...+0,4$) мм; 2 – ($-0,4...+0,315$) мм; 3 – ($-0,315...+0,2$) мм; 4 – ($-0,2...+0,16$) мм; 5 – ($-0,16...+0,1$) мм);
 б – разделение частиц по плотности для порошков: 1 – ПМС; 2 – 12Х18Н10; 3 – БрОФ-10-1; 4 – ПТХ-2-1; 5 – ПА-3

Приведенные зависимости также показывают, что время разделения зависит от соотношения размеров мелких и крупных частиц. С увеличением размеров крупных частиц или уменьшением размеров мелких при одних и тех же параметрах вибрации, время разделения уменьшается.

Эксперименты по исследованию влияния исходного положения крупных частиц в контейнере на параметры разделения заключались в следующем. Крупная частица (размер ($-0,4...+0,315$) мм) помещалась, в центре основания контейнера, а затем у стенки и определялось время, необходимое для поднятия частицы на поверхность слоя мелкого порошка (фракция ($-0,063...+0,04$) мм, толщина слоя 10 мм). Результаты экспериментов показали, что при одних и тех же параметрах вибрации время поднятия на поверхность крупной частицы, помещенной в центре, меньше, чем около стенки. Например, для вибрации с частотой 30 Гц и ускорением $10 m/c^2$ крупные частицы, помещенные в центре, поднимаются на поверхность на 10 с быстрее, чем те же частицы, помещенные около стенки контейнера. Причина наблюдаемого явления заключается в том, что частицы, лежащие около стенок контейнера, стеснены в движении, и обладают меньшей свободой перемещения по сравнению с частицами, расположенными в центре. Поэтому следует считать, что форма и размер контейнера влияют в общем случае на время разделения частиц по размерам.

Результаты экспериментальных исследований влияния направления вибрации на разделение частиц показали, что горизонтальные вибрации наиболее предпочтительны. Это объясняется тем, что горизонтальные колебания более благоприятны для действия основных механизмов, влияющих на классификацию дисперсных смесей. Например, для механизма - «гравитационное просеивание», представляющего движение мелких частиц под действием сил тяжести сквозь поры, образованные крупными частицами, необходимо, чтобы ускорение колебаний было направлено под углом к вертикали, так как при наличии только строго вертикальных сил, движение частиц происходить не будет. Необходимо отметить, что на

практике чрезвычайно сложно добиться строго вертикального ускорения вибрации, так как, даже при вертикальных колебаниях в массе порошка возникают горизонтальные силы от действия различных факторов, например, от положения формы. Кроме того, следует учитывать, что при сообщении порошку колебаний, коэффициент трения между частицами уменьшается, и поэтому для некоторых мелких частиц, у которых в покое сохранялось условие равновесия, при сообщении колебаний это условие нарушается и имеет место гравитационного просеивания мелких частиц сквозь поры, образованные крупными частицами.

В табл. 2 приведены результаты экспериментальных исследований, влияния фактора формы частиц на их разделение при наложении вибрации.

Таблица 2. Зависимость времени разделения частиц порошка бронзы с различным фактором формы (размер крупных частиц (-0,4...+0,315) мм, размер мелких частиц (-0,1...+0,063) мм

№ опыта	Частота вибрации, Гц	Ускорение вибрации, м/с ²	Время разделения, с	
			Фактор формы частиц, FF	
			1,0	0,5
1	10	5	7	9
2	20	5	13	16
3	30	10	3	5
4	40	10	7	9
5	50	15	6	8
6	60	15	9	11
7	70	20	10	13
8	80	20	8	10
9	90	25	11	14
10	100	25	8	10
11	110	30	13	15
12	120	30	6	8
13	130	35	13	15
14	140	40	5	8
15	150	45	5	8
16	160	55	5	7
17	170	60	8	11
18	180	75	6	8
19	190	75	11	14
20	200	80	6	8

Анализ приведенных в табл. 2 результатов показывает, что разделение сферических частиц с фактором формы $FF = 1$ происходит быстрее, чем с $FF = 0,5$ и носит одинаковый характер при одних и тех же параметрах вибрации. Это можно объяснить тем, что сферическим частицам легче подняться на следующий слой, так как здесь основную роль играет так называемый «эффект клина», а мелким опуститься, так как в данном случае имеет место «эффект просеивания».

Заключение

На основании экспериментальных исследований можно заключить, что разделение металлических порошков происходит в строго определенном диапазоне параметров вибрации и определяется неравенством $3,96 \exp 0,0103f \leq a \leq 8,78 \exp 0,012 f$.

Время разделения частиц зависит от соотношения размеров и массы крупных и мелких частиц, а именно, с ростом величины соотношения время разделения уменьшается.

RESEARCHING THE PROCESS OF SEPARATION OF SOLID PARTICLE BY SIZE, SHAPE AND MASS DUE TO VIBRATION

L.P. PILINEVICH

Abstract

The results of the separation process of solid particle by size, shape and weight of due to vibration are shown. There are defined three possible states of the field of the dispersed solid particles in the

mixture depending on the parameters of vibration exerted on the mixture: an area in which the compaction of the mixture, the area separating particles by size and weight, and the area of intense mixing mixture powders.

Список литературы

1. *Вайсберг Л.А.* Проектирование и расчет вибрационных грохотов. М., 1986.
2. Вибрационные машины и технологии // Сб. науч. трудов: Курский политехнический институт. 1993. Вып. 2. С. 234.
3. *Ганиев Р.Ф., Кобаско М.И., Кулик В.В. и др.* Колебательные явления в многофазных средах и их использование в технологии. Киев, 1980.
4. *Коган Э.А.* // Тез. докл. Всесоюз. конф. по вибрационной технике. Кутаиси–Тбилиси, 1981. С. 17–18.
5. Вибрация в технике. / Под ред. К.В. Фролова. М., 1995.

Библиотека БГУИР

УДК 621.315.592.2:546.28

УВЕЛИЧЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА В МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ЭНЕРГИЮ ГОРЕНИЯ НАНОПОРИСТОГО КРЕМНИЯ

А.В. ДОЛБИК, А.Ю. ЗУБОВ, С.Н. КРИСЕВИЧ, А.С. СЫЧЕВИЧ,
А.В. КОРОТКЕВИЧ, С.К. ЛАЗАРУК, В.А. ЛАБУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 30 июня 2015

Процесс горения нанопористого кремния с межпоровым пространством, заполненным твердотельным окислителем, исследовался с целью его использования в качестве источника энергии для механического движения микроэлектромеханических систем с реактивной тягой. Исследования показали, что механический импульс микросистемы с кремниевым чипом площадью 1 см^2 может быть увеличен до 130 мН с за счет увеличения объема нанопористого кремния, а также за счет увеличения массы несущей платформы.

Ключевые слова: нанопористый кремний, окислитель, механический импульс.

Введение

Миниатюрные двигатели с реактивной тягой используются в микроэлектромеханических системах (МЭМС) последние 15 лет для передвижения микро-, нано- и пико- спутников. Эти небольшие спутники требуют эффективных двигательных установок для их маневрирования на космической орбите. Разработка таких МЭМС проводится по двум направлениям: миниатюризация обычных двигателей и поиск новых твердотельных энергетических материалов и концепций их использования в микродвигателях [1]. Одним из решений вышеупомянутой проблемы является использование нанопористого кремния в качестве энергетического материала.

Нанопористый кремний, как правило, формируется путем анодирования кремниевой пластины в процессе электрохимического травления [2] и становится энергетическим материалом, если его нанопоры заполняются окислителем [3]. Нанопористый кремний, контактирующий с находящимся в его порах твердотельным окислителем, способен гореть и даже взрываться [4].

В статье представлены результаты измерений механического импульса при горении нанопористого кремния внутри кремниевых чипов, закрепленных на металлических платформах различной массы.

Методика эксперимента

Кремниевые пластины *p*-типа, легированные бором с проводимостью 10 Ом·см, использовались для изготовления пористого кремния путем электрохимического анодирования в электролите на основе водного раствора плавиковой кислоты и этанола (2 части 48 % HF и 1 часть этанола) при плотности тока 50 mA/cm^2 . Область анодирования определялась O-образной маской с внутренним диаметром 10 мм. Время анодирования варьировалось для получения пористых слоев толщиной 40 и 70 мкм. После этого образцы промывали в этаноле, высушивали и пропитывали насыщенным спиртовым раствором NaClO_4 .

Пропитка пористого кремния производилась нанесением раствора окислителя из пипетки непосредственно на поверхность пористого кремния. Данная процедура производилась два раза. После этого образцы сушили при температуре $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Толщина пористых слоев измерялась с использованием метода оптической и электронной микроскопии.

Для определения величины механического импульса, создаваемого при горении пористого кремния, использовали систему, состоящую из кремниевого чипа и несущей платформы (круглой металлической пластины), соединенных с помощью клея.

Инициирование процессов горения и взрыва слоев пористого кремния осуществлялось путем помещения образцов на плитку, нагретую до 500 °С. После инициирования процессов горения и взрыва реактивная сила поднимала исследуемую систему вверх. Видеокамера со скоростью записи 30 кадров в секунду записывала движение несущей платформы.

Импульс оценивался по формуле: $P = m \frac{\Delta l}{\Delta t}$, где P – импульс, m – масса исследуемой системы, Δl – расстояние, которое платформа проходила за промежуток времени Δt равный одному кадру съемки.

Результаты и обсуждение

В изготовленных образцах горизонтальные размеры пористого слоя в несколько раз больше, чем его толщина. Из-за этого реактивная сила, возникающая в процессе горения нанопористого кремния, толкает образец в направлении, перпендикулярном его плоскости поверхности.



Рис. 1. Фотографии эксперимента: *a* – инициирование и первый кадр полета; *б* – второй кадр полета

На рис. 1 показаны фотографии испытаний в моменты инициирования и последующего вертикального перемещения несущей платформы. За время первого кадра образец переместился на 37 см, за время второго – на 35 см. Траекторию движения можно увидеть благодаря процессу дефлаграции в пористом кремнии после взрыва. Учитывая массу испытываемых образцов, авторами был рассчитан механический импульс системы с реактивной тягой для различных толщин пористого кремния (рис. 2). Исследуемые образцы смогли продемонстрировать механический импульс до 130 мН·с.

Ранее было обнаружено, что пористый кремний толщиной более 30 мкм, пропитанный раствором твердотельного окислителя, демонстрирует процесс взрыва с появлением ударной волны [5]. Закрепление кремниевого чипа с пористым кремнием на несущей платформе, масса которой превышает массу чипа, приводит к изменению условий распространения ударной волны. Интенсивность звука ударной волны уменьшается с увеличением массы системы, потому что ударная волна заметно ослабевает для систем с большей массой, следовательно, выделяемая энергия в большей мере преобразовывается в механическую энергию движения, чем в энергию ударной волны, что подтверждают результаты испытаний (рис. 2).

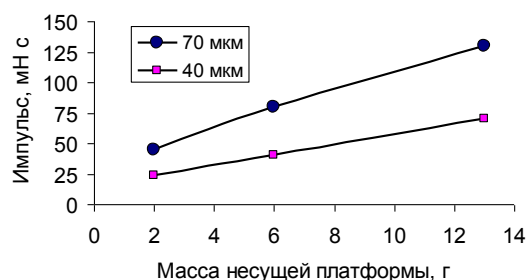


Рис. 2. Зависимость импульса от массы несущей платформы с пористым кремнием толщиной 40 и 70 мкм

Как известно, пористый кремний *p*-типа включает наночастицы размером от 1 до 15 нм [2, 6]. Если интенсивность ударной волны уменьшается, то меньшая часть наночастиц будет подвержена взрыву (рис. 1, *a*), а остальные наночастицы большего размера будут подвергаться процессу дефлаграции (быстрого сгорания) продолжительностью несколько миллисекунд (рис. 1, *a, б*).

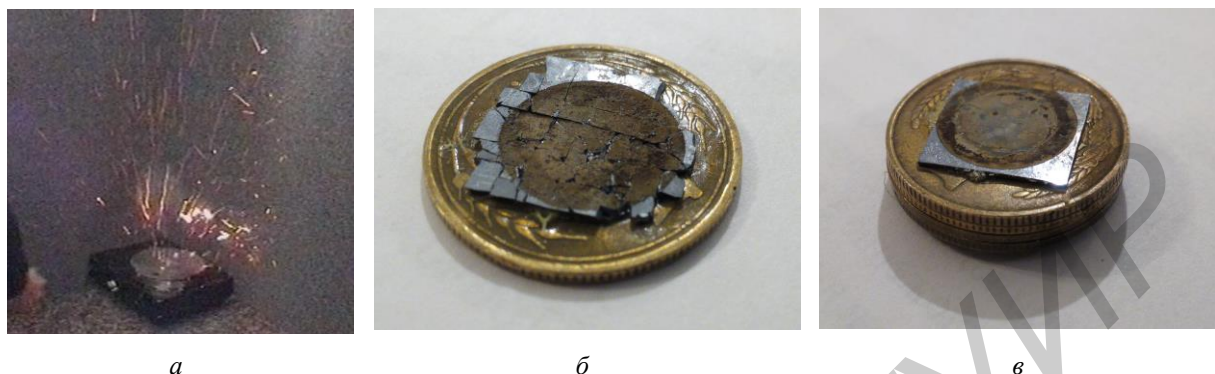


Рис. 3. Фотографии тестируемых образцов: чип пористого кремния без несущей платформы во время процесса взрыва (*a*); чип пористого кремния закрепленные на несущей платформе с массой 3 г (*б*); и с массой более 10 г после испытаний (*в*)

Процесс дефлаграции способствует росту реактивной силы во время взлета, приводя к получению рекордного механического импульса величиной в 130 мН·с для образца с пористым кремнием толщиной 70 мкм. Испытываемые образцы с толщиной пористого кремния более чем 40 мкм без несущей платформы полностью разрушались после инициирования [7] (рис. 3, *a*). Испытываемые образцы, закрепленные на несущей платформе, с массой менее 6 г были разрушены частично (рис. 3, *б*), а образцы с массой более 10 г сохраняли целостность после испытаний (рис. 3, *в*).

На рис. 4 представлена фотография поверхности кремниевого кристалла после выгорания пористого кремния. Как видно из рисунка на кремниевой поверхности появляются очевидные артефакты в виде кремниевых образований правильной формы (прямоугольное плато). Такие образования могут появляться в результате оплавления кремния и твердофазной эпитаксии на кремниевой поверхности, что свидетельствует о высоких температурах, сопровождающих процесс горения. Проводимые авторами ранее исследования спектров светоизлучения реакции окисления пористого кремния показали, что температура в области горения и взрыва наноструктурированного кремния достигает более 2000 °С [8].



Рис. 4. Фотография поверхности кремниевого кристалла после выгорания пористого кремния

Исследуемые микросистемы могут быть использованы в качестве матричных микродвигателей, закрепленных на корпусе космических спутников малых размеров. Коррекция их орбиты может осуществляться иницированием процесса горения в отдельных чипах посредством подачи электрического импульса к пористому кремнию, пропитанному твердотельным окислителем. Импульса величиной 100 мН·с достаточно для перемещения объекта массой около 1 кг в условиях невесомости. Учитывая, что таких кремниевых чипов можно разместить по несколько штук на каждой стороне спутника, то такая система будет достаточно управляема при минимальной массе энергетического материала, что и требуется для космических объектов малых размеров. На рис. 5 показано возможное размещение

разработанных кремниевых чипов с нанопористым кремнием на борту спутника малых геометрических размеров.

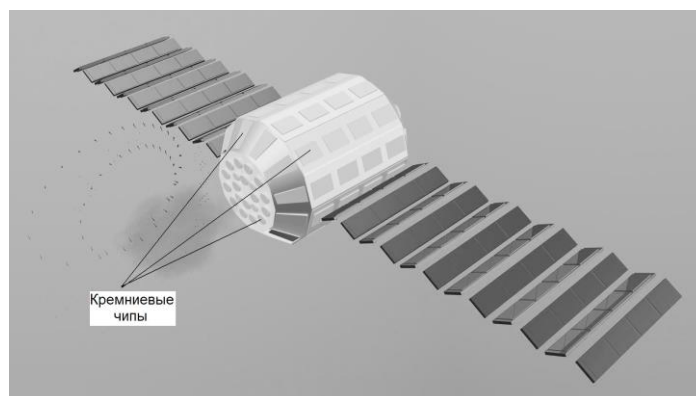


Рис. 5. Спутник малых размеров с матричными микродвигателями на основе кремниевых чипов с нанопористым кремнием

Заключение

Проведенные исследования показали, что механический импульс, возникающий при горении пористого кремния, увеличивается при увеличении толщины пористого кремния и массы несущей платформы. Полученные значения импульса 25–130 мН·с свидетельствуют о перспективности использования нанопористого кремния в качестве источника энергии в МЭМС.

MECHANICAL IMPULSE ENHANCEMENT IN MEMS USING POROUS SILICON COMBUSTION PROCESS

A.V. DOLBIK, A.YU. ZUBOV, S.N. KRISEVICH, A.S. SYCHEVICH, A.V. KOROTKEVICH,
S.K. LAZAROUK, V.A. LABUNOV

Abstract

Nanostructured porous silicon impregnated by solid state oxidants has been studied in order to provide the mechanical impulse for jet-propulsion microsystems. The system with jet-propulsion movement on a silicon chip has been used for impulse measurements. The estimated impulse value is in the range of 25-130 mN·s by using of carrying platform for Si chips.

Список литературы

1. Zakar E. Technology Challenges in Solid Energetic Materials for Micro Propulsion Applications, USA, 2009.
2. Canham L.T. Properties of Porous Silicon. London, 1997.
3. Clement D., Diener J., Gross E. et al. // Phys. Status Solidi A. 2005. Vol. 202. P. 1357–1364.
4. Moniko du Plessis // Propellants Explos. Pyrotech. 2014. Vol. 39. P. 348–364.
5. Лазарук С.К., Долбик А.В., Жагиро П.В. и др. // ФТП. 2005. Т. 39. С. 917–919.
6. Viet Cuong Nguyen, Pita K., Kam C.H. et al. // J. Propuls. Power. 2015. Vol. 31, № 2. P. 694–698.
7. Лазарук С.К., Долбик А.В., Лабунов В.А. и др. // ФТП. 2007. Т. 41. С. 1130–1134.
8. Долбик А.В., Лазарук С.К., Луценко Е.В. и др. // Известия Белорусской инженерной академии. 2005. № 1 (19) /5. С. 30–32.

УДК 621.165 + 621.438

ОПЫТ И ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ И ВНЕДРЕНИЯ АСУТП ПГУ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ РОССИИ И БЕЛОРУССИИ

А.Д. МЕЛАМЕД, И.З. ЧЕРНОМЗАВ, Г.С. ПЕКА

ЗАО «Интеравтоматика»
ул. Автозаводская, 14, г. Москва, 115280, РФ

Поступила в редакцию 17 апреля 2015

Обобщен опыт разработки и внедрения АСУТП ПГУ, полученный ЗАО «Интеравтоматика» на ПГУ различного типа. На примере АСУТП ПГУ-65 МВт Борисовской ТЭЦ (РБ) рассмотрены актуальные проблемы создания современных АСУТП ПГУ, среди которых на первое место выходит интеграция выполненных на различных программно-технических средствах блочной АСУТП и локальных АСУ/САУ групп технологического оборудования в единую систему управления объектом.

Ключевые слова: АСУТП ПГУ, интеграция локальных АСУ/САУ, АСУТП ПГУ-65 МВт Борисовской ТЭЦ.

В последние годы основной объем вводимых в эксплуатацию объектов электрогенерации в РФ приходится на парогазовые установки (ПГУ). Только за период с 2005 по 2014 гг. при участии ЗАО «Интеравтоматика» внедрено более 35 объектов с ПГУ различного типа – от чисто утилизационных до ПГУ надстроечного типа со сбросом выхлопных газов ГТУ в котел традиционного энергоблока (см. таблицу). Около десяти объектов с ПГУ в настоящее время находятся на стадии внедрения.

Как правило, ЗАО «Интеравтоматика» выступало в качестве разработчика и поставщика ПТК для полномасштабных АСУТП энергоблоков ПГУ и общестанционного оборудования. Во многих случаях ЗАО «Интеравтоматика» выполняло в том числе и проектирование, поставку и наладку САУ газовых турбин, котлов и паровых турбин (ПТ), включая электронные части систем регулирования (ЭЧСР) ПТ с реализацией электрогидравлических систем управления. Так, для газотурбинных установок ГТ-110 Ивановской и Рязанской ГРЭС ЗАО «Интеравтоматика» совместно с НПО «Сатурн» (г. Рыбинск) выполнило разработку и внедрило локальные САУ газовых турбин. Для паровых турбин ЛМЗ и КТЗ совместно с этими заводами были разработаны и внедрены на многих ПГУ ЭЧСР и САУ ПТ. ЗАО «Интеравтоматика» создает не только АСУТП теплотехнического оборудования (ТТО), но и АСУТП электротехнического оборудования (ЭТО). В случае, когда ПТК всех САУ и АСУТП блока реализуются на единых технических средствах, проблема интеграции их в единую систему решается оптимально и без дополнительных затрат.

Однако многим заказчикам наиболее рациональной представляется поставка технологического оборудования с собственными системами управления. Часто проекты установок с ПГУ выполняются с учетом наличия локальных САУ различных производителей газотурбинных и паротурбинных установок, дожимной компрессорной станции (ДКС), ВПУ и других вспомогательных систем. При таком подходе на объекте оказывается разнообразная техника управления, а самое главное – используются разнородные принципы контроля, управления, сигнализации, что, в свою очередь, с неизбежностью влечет проблемы при создании системы управления энергоблоком, ее дальнейшем обслуживании, сопровождении и т.п. При этом одной из основных проблем при построении АСУТП ПГУ становится интеграция различных программно-технических средств в единую систему управления объектом. Это же

относится и к объединению в рамках единой АСУТП управления ТТО и ЭТО, когда турбогенераторы одного энергоблока оснащены локальными САУ различных производителей.

Перечень АСУТП ПГУ, внедренных ЗАО «Интеравтоматика»

Автоматизируемое оборудование	ТЭС	Топливо	Станционные номера	Тип ПТК	Дополнительный объем внедрения		Год внедрения
					ЭЧСР	САР ПТ	
ПГУ-460	Разданская ГРЭС	газ	5	SPPA-T3000	+		2011
ПГУ-450	Северо-Западная ТЭЦ г. Санкт-Петербурга	газ, диз.топливо	1	ТМ-Е		+	2001
		газ, диз.топливо	2	ТМ-Е	+	+	2006
	Калининградская ТЭЦ-2	газ, диз.топливо	1	ТПТС51	+		2006
		газ, диз.топливо	2	SPPA-T3000			2010
	ТЭЦ-27 Мосэнерго	газ, диз.топливо	3	SPPA-T3000			2007
		газ, диз.топливо	4				2008
	ТЭЦ-22 Ленэнерго	газ	4	SPPA-T3000			2011
	ТЭЦ-5 Ленэнерго	газ	2	SPPA-T3000			2012
Уренгойская ГРЭС	газ	1	SPPA-T3000			2012	
ПГУ-420	Невинномысская ГРЭС	газ	11	SPPA-T3000			2011
			2	SPPA-T3000			2013
	Няганьская ГРЭС	газ	3				2014
		Южноуральская ГРЭС-2	газ	1	SPPA-T3000		
	газ		2	SPPA-T3000			2014
	Нижневартовская ГРЭС	газ	3	SPPA-T3000			2014
	Череповецкая ГРЭС	газ	4	SPPA-T3000			2014
ТЭЦ-16 Мосэнерго	газ	8	SPPA-T3000		+	2014	
ПГУ-410 (ГТ-надстройка)	Рязанская ГРЭС	газ	7	Simatic PCS7	+	+	2010
ПГУ-325	Ивановская ГРЭС	газ, диз.топливо	1	ТПТС51+S7	+	+	2007
		газ, диз.топливо	2	ТПТС51+S7	+	+	2012
ПГУ-220	Тюменская ТЭЦ-1	газ	2	SPPA-T3000	+	+	2010
ПГУ-200	Юго-Западная ТЭЦ г. Санкт-Петербурга	газ	1	SPPA-T3000			2011
	Новокуйбышевская ТЭЦ	газ	-	Simatic PCS7			2013
ПГУ-195	Дзержинская ТЭЦ	газ	3	ТПТС51			2006
ПГУ-190	Новомосковская ГРЭС	газ	1	SPPA-T3000			2013
ПГУ-110	Вологодская ТЭЦ	газ	1	SPPA-T3000	+	+	2014
	ТЭС Колпино	газ	-	SPPA-T3000			2013
ПГУ-90	Омская ТЭЦ-3	газ	1	SPPA-T3000			2013
ПГУ-80	Сочинская ТЭС	газ	3	Simatic PCS7			2009
ПГУ-65	ТЭЦ-9 Мосэнерго	газ	1	Simatic PCS7			2014
	Борисовская ТЭЦ, РБ	газ	-	Simatic PCS7			2014
ПГУ-60С	ТЭЦ-28 Мосэнерго	газ	-	Simatic PCS7	+	+	2008
ПГУ-39	Сочинская ТЭС	газ	1	Simatic PCS7			2005
		газ	2				
ПГУ-30	Калужская ТЭЦ	газ	-	Simatic PCS7			2011
	Ливенская ТЭЦ	газ	-	Simatic PCS7			2012

Примером успешной интеграции ПТК локальных САУ (ЛСАУ) в АСУ ТП энергоблока может служить недавно завершённый проект при участии ЗАО «Интеравтоматика» по строительству и вводу в эксплуатацию энергоблока ПГУ-65МВт Жодинской ТЭЦ в г. Борисове (ныне Борисовской ТЭЦ, Республика Беларусь), где ЗАО «Интеравтоматика» выступило в качестве разработчика и поставщика ПТК для полномасштабного АСУТП энергоблока ПГУ-65МВт. Структура АСУТП (рис. 1) энергоблока ПГУ-65МВт определяется тем, что основное

оборудование (ГТУ, ПТУ) и вспомогательное оборудование (ВПУ, вентиляторная градирня и т.д.) поставлялись комплектно с локальными САУ/АСУ на базе контроллерного оборудования Siemens, система управления для серийного котла-утилизатора SteamGen™ 8 (Aalborg Engineering, Дания) разработана ЗАО «Интеравтоматика» по отдельному договору с поставщиком котла-утилизатора также на базе системы автоматизации Siemens, общецлочная АСУ ТП ТТО и ЭТО разработана ЗАО «Интеравтоматика» на базе контроллерного оборудования Siemens. Таким образом, на объекте достигнута унификация ПТК всех САУ и АСУТП блока, благодаря чему удалось изменить стандартные подходы к организации обмена данными между поставщиками локальных систем управления и общецлочной АСУ ТП.

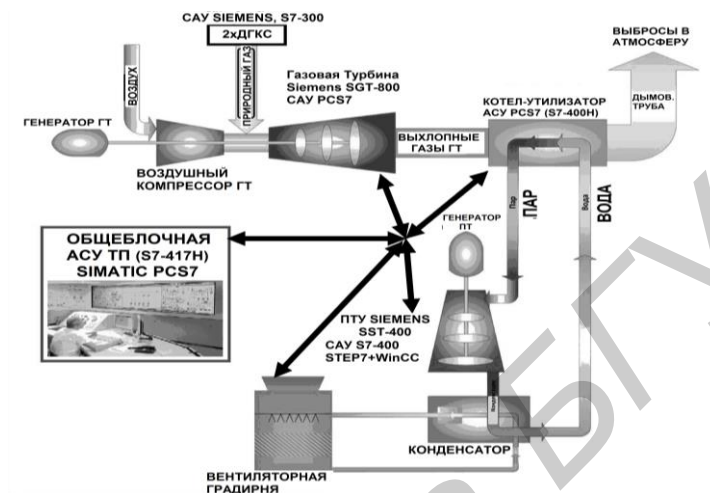


Рис. 1. Структура АСУТП ПГУ-65 МВт Жодинской ТЭЦ в г. Борисове

Первоначально для реализации в АСУ ТП общецлочных алгоритмов поставщиками локальных систем управления основного оборудования был предложен только минимальный объем физических сигналов для обмена данными на контроллерном уровне, исходя из их собственных стандартных подходов к безопасности и управлению. Этот способ обмена данными имеет ряд недостатков – таких, как, например, ограниченный резерв с обеих сторон входных и выходных физических каналов контроллеров каждого типа, ограниченное количество кабельных связей, что особенно актуально для «бюджетных» проектов, и т.д. После анализа исходных данных поставщиков ЛСАУ, ЗАО «Интеравтоматика» выступило с предложением о том, что на основании имеющейся унификации технических средств АСУ ТП наиболее рациональным будет объединение локальных САУ с АСУ ТП энергоблока на контроллерном уровне по цифровому протоколу Profibus DP для последующей реализации алгоритмов управления блочного уровня (кроме алгоритмов технологических защит, для которых предусматривается дублирование физическими линиями связи). По результатам успешных обсуждений данного предложения с поставщиками ЛСАУ, системная шина (Profibus DP) контроллеров АСУ ТП энергоблока была продлена и к внешним САУ, фактически, контроллеры АСУ ТП энергоблока стали обращаться к ним, как к части своего адресного пространства. Такое объединение в цифровую сеть на контроллерном уровне позволило сократить количество проводных связей, сохранить и даже увеличить резерв с обеих сторон физических каналов контроллеров, а самое главное, значительно упростить проектирование и проведение пусконаладочных работ за счет возможности гибкого изменения состава сигналов обмена данными (рис. 2). В том числе, были успешно выполнены следующие требования заказчика к АСУ ТП энергоблока:

- обеспечены контроль и управление основным и вспомогательным оборудованием энергоблока (в т.ч. поставляемого с локальными САУ/АСУ) с любой станции оператора общецлочной АСУ ТП (интеграция всех локальных систем);
- обеспечен единый операторский интерфейс (комфортная работа оператора как на станциях локальных САУ, так и при работе на операторских станциях общецлочной АСУ ТП за счет единой концепции цветового кодирования графических элементов видеogramм);
- реализованы общецлочные алгоритмы управления.

Одним из примеров реализации в АСУ ТП энергоблока ПГУ-65МВт общецлочных

алгоритмов управления могут служить программаторы набора давления пара контуров ВД/НД котла-утилизатора (рис. 3) для выхода на номинальные параметры с последующим автоматическим переводом пара (после набора вакуума) с паро-сбросных устройств (ПСУ) ВД/НД (в границах АСУ КУ), соответственно, на БРОУ ВД/НД (в границах САУ ПТУ). В объеме поставки паротурбинной установки энергоблока ПГУ-65МВт были включены БРОУ ВД и БРОУ НД, которые, кроме функции байпасирования с дросселированием и охлаждением пара со сбросом в конденсатор турбины (КТ) в случае аварийного отключения ПТ, служат для набора номинальных параметров перед впуском пара в паровую турбину. При пусковых операциях ограничения связаны с возможностями котла-утилизатора по скоростям набора давления в барабанах ВД и НД. Соответственно, возникает задача на уровне АСУ ТП энергоблока реализовать программатор набора давления пара ВД и НД с управлением через САУ ПТУ регулирующими органами БРОУ ВД и НД. Согласно технологической схеме энергоблока ПГУ-65МВт для включения в работу БРОУ ВД и НД необходимо предварительно набрать вакуум в конденсаторе, при этом минимальные параметры пара ВД для эжекторов достигаются через ПСУ ВД котла-утилизатора. В результате, задача реализации программатора усложняется необходимостью выполнить автоматический перевод пара (после набора вакуума) с паро-сбросных устройств (ПСУ) ВД/НД (в границах АСУ КУ), соответственно, на БРОУ ВД/НД (в границах САУ ПТУ). Именно благодаря преимуществам использования цифрового способа обмена данными на контроллерном уровне общецеховой АСУ ТП с локальной САУ ПТУ удалось успешно решить указанную задачу.

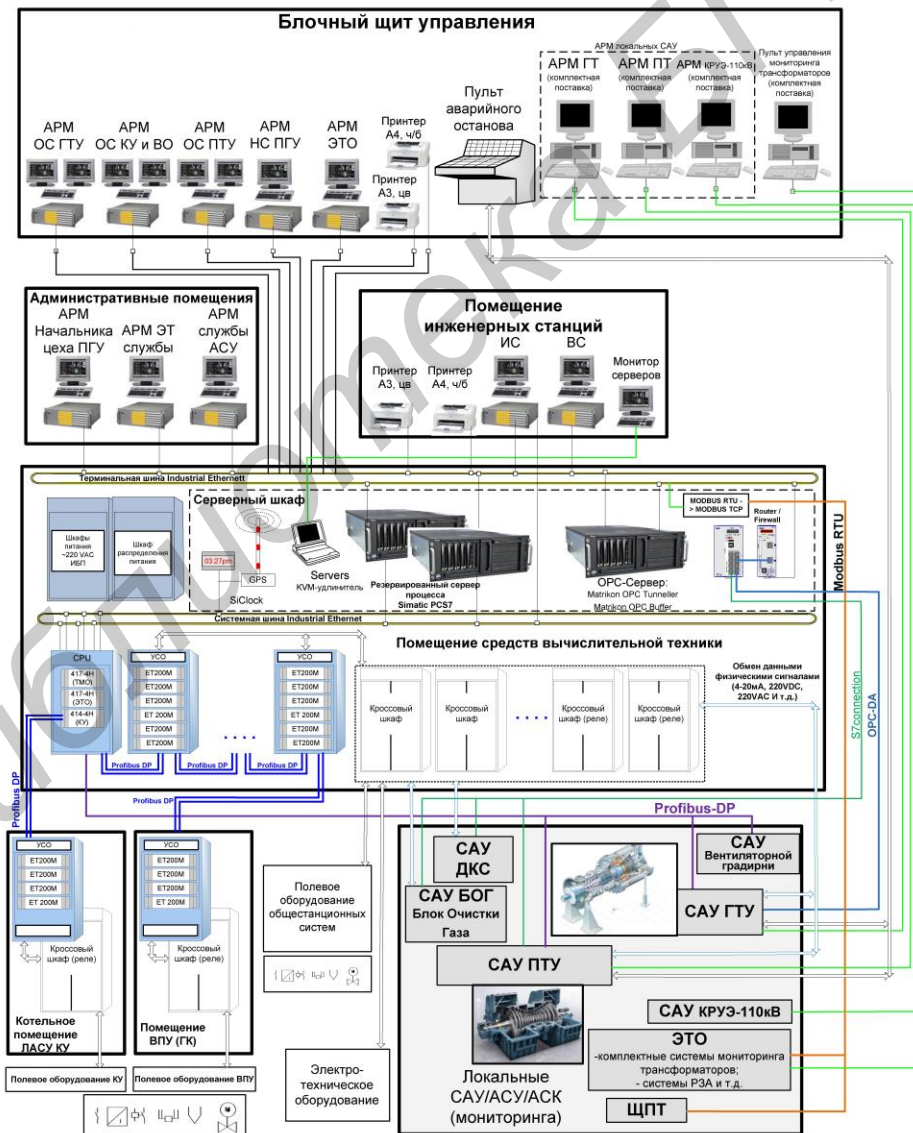


Рис. 2. Структурная схема комплекса технических средств АСУТП энергоблока ПГУ-65 Жодинской ТЭЦ

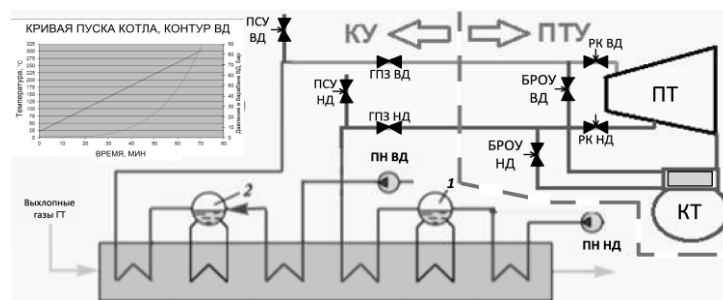


Рис. 3. Программатор набора давления пара ВД/НД для выхода на номинальные параметры с автоматическим переводом пара (после набора вакуума) с ПСУ ВД/НД (в границах АСУ КУ) на БРОУ ВД/НД (в границах САУ ПТУ): 1, 2 – барабаны низкого (1) высокого (2) давления; ПН НД, ПН ВД – питательные насосы низкого, высокого давления; ГПЗ НД, ГПЗ ВД – главная паровая задвижка низкого, высокого давления; РК НД, РК ВД – регулирующие клапаны турбины низкого, высокого давления

Также в качестве примеров преимущества использования цифрового способа обмена данными на контроллерном уровне в проекте ПГУ-65МВт могут служить:

- реализация совместно с поставщиком САУ ГТУ экспериментального решения по важнейшей системе антиобледенения (был изменен стандартный состав сигналов обмена, исключен КИП и т.д.);
- реализация регулятора электрической мощности энергоблока;
- реализация регулятора теплофикационной нагрузки энергоблока и т.д.

Особенностью проекта ПГУ-65МВт Борисовской ТЭЦ является также наличие АСУ ТП для серийного котла-утилизатора, разработанной ЗАО «Интеравтоматика» по отдельному договору с поставщиком КУ компанией Aalborg Engineering (Дания). Сложность поставленной задачи заключалась в том, что проектирование АСУ ТП КУ необходимо было выполнить по техническим условиям европейского поставщика с учетом действующих нормативных требований РФ(РБ) и с учетом полной интеграции в АСУ ТП энергоблока. Защита проекта проходила в Дании, в офисе компании Aalborg Engineering, где успешно были приняты все технические решения ЗАО «Интеравтоматика», начиная от применения программных «ремонтных накладок» для ввода/вывода технологических защит до программаторов набора номинальных параметров пара, структурных схем автоматических регуляторов и т.д.

Кроме задач по управлению энергоблоком, АСУТП ПГУ активно участвуют в решении энергосистемных задач. Последние годы были отмечены значительным повышением внимания к участию энергоблоков в режимах регулирования частоты и мощности в энергосистеме. Нормативные документы системного оператора формулируют требования к различным видам энергосистемного регулирования. Для вновь вводимого энергооборудования условием подключения к энергосистеме стало проведение испытаний на соответствие требованиям общего первичного регулирования частоты (ОПРЧ), а в некоторых случаях – и реализация противоаварийной автоматики (ПАА) с воздействием на разгрузку энергоблоков. С 2012 г. начал работать рынок системных услуг в части нормированного первичного регулирования частоты (НПРЧ) и автоматического вторичного регулирования частоты и мощности (АВРЧМ) для ПГУ, в том числе и теплофикационных. ЗАО «Интеравтоматика» вело работы по проектированию, наладке и проведению испытаний систем автоматического регулирования частоты и мощности (САРЧМ) на всех объектах ПГУ, куда поставляло АСУТП, а также участвовало в сертификационных испытаниях САРЧМ ряда блоков ПГУ.

Весьма важным аспектом деятельности ЗАО «Интеравтоматика» является создание полномасштабных тренажеров энергоблока ПГУ. Внедрение полномасштабного тренажера раньше ввода в эксплуатацию энергоблока позволяет не только использовать его для обучения оперативного и обслуживающего персонала, но и отработать технологию пусков/остановов энергоблока, ведения технологических режимов, провести оптимизацию большинства алгоритмов управления, что позволяет ускорить и упростить ввод в эксплуатацию этих алгоритмов.

Аппаратурная реализация ПТК для АСУТП ПГУ. Первые АСУТП энергоблоков с ПГУ (Северо-Западная ТЭЦ СПб – 2000 год) выполнены на базе аппаратуры Teleperm-ME

(произведено в Германии), а несколько последующих – на базе российского аналога этой аппаратуры ТПТС-51 (производство ФГУП «ВНИИА», г. Москва).

В последние годы ЗАО «Интеравтоматика» для АСУТП с ПГУ использует аппаратуру ПТК SPPA-T3000. В настоящее время ВНИИА разработал новую серию технических средств ТПТС НТ, на базе которой ЗАО «Интеравтоматика», используя накопленный опыт, планирует создание отечественных АСУТП энергоблоков различного типа.

EXPERIENCE AND PROBLEMS IN THE DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION I&C OF CCPP AT POWER PLANTS OF RUSSIA AND BELARUS

A.D. MELAMED, I.Z. CHERNOMZAV, G.S. PEKA

Abstract

Summed up the experience of the development and implementation I&C of CCPP by the company «Interavtomatika» AG on various types of CCPP. For example, the I&C of 65 Mw CCPP Borisov (Belarus) CHP considered actual problems of modern I&C of CCPP, among which the first is the integration software of the various local PLC groups processing equipment and PLC unit in a unified system of unit management.

Библиотека БГУИР

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 539.23

ЭПИТАКСИАЛЬНЫЕ ПЛЕНКИ СЕЛЕНИДА ЦИНКА НА ПОРИСТОМ КРЕМНИИ

В.И. ЛЕВЧЕНКО, Л.И. ПОСТНОВА, Е.Л. ТРУХАНОВА, В.П. БОНДАРЕНКО*

ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», П. Бровки, 19, Минск, 220072, Беларусь

**Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 2 февраля 2015*

Эпитаксиальные пленки ZnSe выращены путем термического испарения соединения ZnSe на подложках Si ориентации (111) и (100) с буферным пористым слоем. Кристаллическая структура осаждаемых пленок контролировалась методом рентгеновской дифрактометрии. Морфология пленок изучалась методом растровой электронной микроскопии высокого разрешения. Установлено, что использование пористого буферного слоя позволяет повысить качество пленок по сравнению с пленками, осажденными на монокристаллическом кремнии.

Ключевые слова: эпитаксиальные пленки, селенид цинка, пористый кремний.

Введение

В настоящее время эпитаксиальные пленки селенида цинка находят применение в качестве материала для люминесцентных приборов, светоизлучающих диодов и оптических волноводов. Обычно их выращивают на подложках с небольшим рассогласованием параметров решеток подложки и пленки, преимущественно на германии (~0,16 %) и арсениде галлия (~0,23 %). Большой интерес представляет выращивание ZnSe на кремнии [1, 2], что открывает возможность реализации интегрированных оптоэлектронных и коммуникационных устройств. Однако прямая эпитаксия селенида цинка на кремнии затруднена относительно большим рассогласованием параметров кристаллической решетки (4,3 %).

Проблема рассогласования параметров решеток пленки и подложки была частично решена в работе [3] за счет использования буферного слоя твердого раствора переменного состава Ge_xSi_{1-x} . Однако это технологически сложное и дорогое решение. Более эффективным и простым может стать применение в качестве буферного слоя пористого кремния, на котором удастся получать эпитаксиальные слои материалов с очень большим рассогласованием параметров решеток и коэффициентов термического расширения, например для PbS 9,4 % и 1000 %, соответственно [4]. При этом важно, что технология получения слоев пористого кремния хорошо отработана и совместима со стандартной КМОП технологией.

В настоящей работе показана возможность выращивания на кремнии с пористым буферным слоем эпитаксиальных пленок селенида цинка.

Методика эксперимента

Осаждение пленок ZnSe осуществлялось методом термического испарения из источника типа ячейки Кнудсена в вакууме $7 \cdot 10^{-4}$ Па. В качестве исходного материала использовался предварительно синтезированный из высокочистых элементарных компонент

поликристаллический селенид цинка, синтез которого осуществлялся в вакуумированных до остаточного давления 10^{-3} Па кварцевых ампулах. В качестве подложек использовались пластины монокристаллического кремния марки КЭС-0,01 ориентации (111) и (100), легированного сурьмой до концентрации $4 \cdot 10^{18}$ ат/см³, со сформированным на их рабочей поверхности пористым слоем. Для сравнения использовались также подложки из монокристаллического кремния марки КЭС-0,01. Слой пористого кремния формировался электрохимическим анодированием монокристаллического кремния в растворе фтористоводородной кислоты в изопропиловом спирте или воде (соотношение 1:3) при плотности тока 50 мА/см². Кремниевые подложки непосредственно перед вакуумированием установки подвергались травлению в смеси состава HF:H₂O = 1:10. Пленки выращивались при температуре подложек в интервале 300–450 °С при постоянной температуре испарителя 960 °С. Кристаллическая структура осаждаемых пленок контролировалась методом рентгеновской дифрактометрии. Морфология пленок изучалась методом растровой электронной микроскопии высокого разрешения.

Результаты и их обсуждение

Исследована зависимость скорости роста пленок от температуры подложек при постоянной температуре испарителя 960 °С. При повышении температуры с 300 °С до 450 °С наблюдается снижение скорости роста с 1,5 до 0,3 мкм/час, обусловленное десорбцией атомов цинка и молекул селена с поверхности подложки.

Как показали результаты рентгеновских исследований, с ростом температуры подложек до 400 °С (скорость роста пленок 0,5 мкм/час) структурное совершенство пленок улучшается. Дальнейший рост температуры до 450 °С приводит к снижению качества пленок.

На рис. 1 приведены рентгеновские дифрактограммы пленок селенида цинка, осажденных при 400 °С на пористый слой кремния ориентации (111) и (100), полученный с использованием раствора HF в изопропиловом спирте.

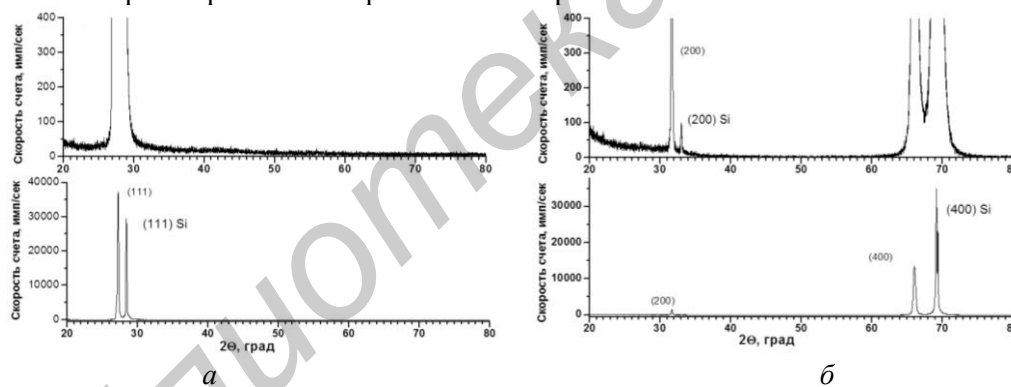


Рис. 1. Рентгеновские дифрактограммы пленки ZnSe, осажденной на пористом слое кремния ориентации (111) (а) и (100) (б)

Соответствие кристаллографической ориентации пленки ориентации подложки, высокая интенсивность эпитаксиальных рефлексов, сопоставимая с интенсивностью рефлексов монокристаллов, и отсутствие неэпитаксиальных рефлексов свидетельствуют о том, что полученные слои являются эпитаксиальными. Ширина на полувысоте кривой качания эпитаксиальных рефлексов (111) и (100) составляет соответственно 0,5 град и 0,8 град.

В случае осаждения селенида цинка на подложку из монокристаллического кремния также наблюдается ярко выраженное ориентирующее воздействие подложки, однако на дифрактограммах пленок, выращенных даже в оптимальных условиях, наблюдаются следы неэпитаксиальных рефлексов, свидетельствующие о зарождении и росте зерен неэпитаксиальной природы. Пленки, осажденные на монокристаллический кремний, уступают по качеству пленкам на пористом слое кремния во всем диапазоне температур, при которых проводились исследования.

На дифрактограммах пленок, осажденных на пористый слой кремния ориентации (111), сформированный с применением водного раствора HF так же, как и в случае использования раствора HF в изопропиловом спирте, отсутствуют неэпитаксиальные рефлексы, однако

разориентация блоков несколько больше, о чем свидетельствует уширение кривой качания рефлекса (111). Преимуществом этих пленок является малая шероховатость их поверхности. Зависимость морфологии пленок ZnSe на пористом кремнии ориентации (111) от технологии формирования пористого слоя иллюстрирует рис. 2.

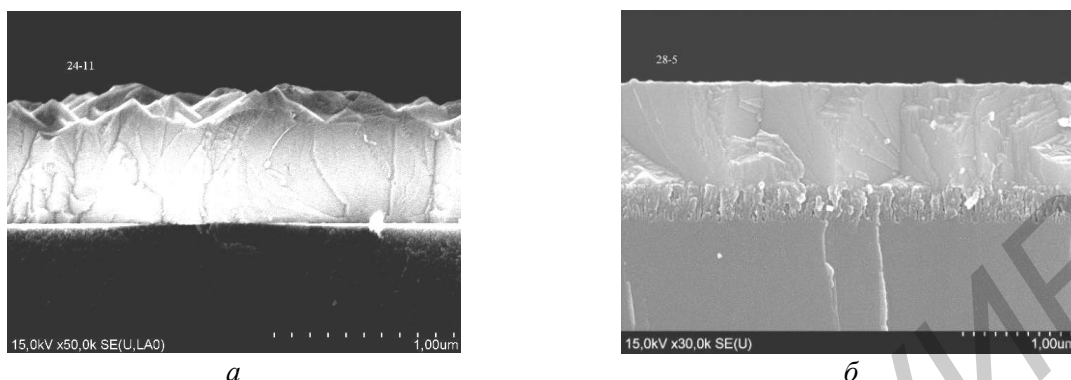


Рис. 2. Морфология скола пленки ZnSe, осажденной на пористый кремний ориентации (111), полученном электрохимическим травлением в растворе HF в изопропиловом спирте (а) и в растворе HF в воде (б)

Как видно из рис. 2, пленка ZnSe на пористом кремнии ориентации (111) имеет столбчатую структуру и состоит из блоков с малоугловой разориентацией, растущих наклонно к поверхности подложки. При этом все блоки выходят на поверхность перпендикулярно направлению их роста, образуя регулярную поверхностную шероховатую структуру.

Заключение

Выращивание пленок ZnSe на подложках кремния ориентации (111) и (100) с буферным пористым слоем осуществлялось путем термического испарения соединения ZnSe. Исследование зависимости совершенства кристаллической структуры пленок от температуры подложек в интервале 300–450 °С при постоянной температуре испарителя 960 °С показало, что наиболее качественные пленки растут при 400 °С (скорость роста 0,5 мкм/час). При этом на дифрактограмме полностью отсутствуют неэпитаксиальные рефлексы. По структурному совершенству пленки, выращенные на пористом кремнии, превосходят пленки, осажденные на монокристаллический кремний.

EPITAXIAL FILMS OF ZINC SELENIDE ON POROUS SILICON

V.I. LEVCHENKO, L.I. POSTNOVA, E.L. TRUKHANAVA, V.P. BONDARENKO

Abstract

ZnSe epitaxial films are grown on (111)- and (100)-oriented Si substrates with a porous buffer layer by the thermal evaporation of ZnSe compound. The crystal structure of the deposited films was controlled by X-ray diffraction. The morphology of the films was studied by high-resolution scanning electron microscopy. It was demonstrated the porous buffer layer provides improving the quality of the films compared with films deposited on the monolithic silicon.

Список литературы

1. Yokoyama M., Chen N.T., Ueng H.Y. // J. Cryst. Growth. 2000. № 212. P. 97–102.
2. Mino N., Kobayashi M., Konagy M. et al. // J. Appl. Phys. 1985. № 58. P. 793–798.
3. Yang T.-H., Yang C.S., Luo G. et al. // J. Appl. Phys. 2004. № 43. P. L811–816.
4. Levchenko V.I., Postnova L.I., Bondarenko V.P. et al. // Thin Solid Films. 1999. № 348. P. 141–145.

УДК 621.315.592

ИССЛЕДОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛОВ ТРОЙНОГО СОЕДИНЕНИЯ $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$

В.В. ШАТАЛОВА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 1 июля 2015

Методом направленной кристаллизации (вертикальный метод Бриджмена) выращены монокристаллы $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$. Определены их состав, структура и электрические свойства. По спектрам пропускания в области края собственного поглощения при температурах 80 и 295 К определена ширина запрещенной зоны. Дилатометрическим методом проведены исследования теплового расширения, рассчитаны термодинамические параметры для полученных монокристаллов.

Ключевые слова: монокристаллы $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$, метод Бриджмена, ширина запрещенной зоны, тепловое расширение.

Введение

Тройные полупроводниковые соединения типа $\text{CuIn}_{2x+1}\text{S}_{3x+2}$ (где $x = 0-11$), которые образуются в процессе самоорганизованного межзатомного взаимодействия на псевдобинарных разрезах $\text{A}^{\text{VI}}\text{C}^{\text{VI}}-\text{B}^{\text{III}}\text{C}^{\text{VI}}$, в последнее время привлекают к себе внимание, что связано с возможностями использования их в полупроводниковой и квантовой электронике [1-4]. Указанные соединения характеризуется прямыми межзонными переходами и являются перспективным для создания ряда новых оптоэлектронных приборов: высокоэффективных радиационно стойких преобразователей солнечной энергии, инфракрасных детекторов, различных типов гетеропереходов и других устройств, что стимулирует интерес к исследованию их различных физических свойств. В настоящей работе представлены результаты исследования структурных, тепловых и оптических свойств тройного соединения $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$.

Методика эксперимента

Монокристаллы $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ предварительно получали двухтемпературным методом (горизонтальный вариант). Исходными веществами для получения указанных монокристаллов служили металлические компоненты (медь, индий) полупроводниковой степени чистоты и сера марки «ос.ч.», дополнительно очищенная многократной пересублимацией. Процесс синтеза проводили следующим образом. Металлические компоненты (медь, индий) загружали в кварцевую лодочку, которую располагали в одном конце кварцевой ампулы. В противоположном конце ампулы находится сера взятая с избытком от стехиометрии, необходимым для создания давления ее паров над расплавом $\sim 2,0$ атм. После откачки ампулы до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па ее отпаивали от вакуумной системы и располагали в горизонтальной двухзонной печи, таким образом, чтобы лодочка с металлическими компонентами находилась в «горячей» зоне печи, а сера – в «холодной». Температуру «горячей» зоны устанавливали ~ 1400 К, температуру «холодной» зоны повышали со скоростью ~ 100 К/ч до ~ 700 К и выдерживали в течение 2 ч (для протекания реакции между металлическими компонентами и парами серы). Для более полного протекания этой реакции температуру с такой же скоростью повышали до 920 К с повторной выдержкой в течение 1 ч.

По истечении указанного времени проводили понижение температуры в «горячей» зоне со скоростью ~ 100 К/ч до 700 К и печь отключали от сети.

Полученные поликристаллические слитки растирали в порошок и загружали в двойные кварцевые ампулы, которые для уменьшения количества центров кристаллизации имели небольшую конусность в области расплава и заканчивались цилиндрическим капилляром для формирования монокристаллической затравки. Снизу к наружной ампуле приваривали кварцевый стержень, используемый в качестве держателя. После вакуумирования ампул до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па ее помещали в вертикальную однозонную печь. Температуру в печи повышали со скоростью ~ 100 К/ч до ~ 1400 К, выдерживали 2...3 ч, после чего проводили направленную кристаллизацию расплава, понижая температуру печи со скоростью ~ 2 К/ч до полного затвердевания расплава. Для гомогенизации полученных слитков их отжигали при 1070 К в течение 240 ч. Выращенные в таких условиях монокристаллы были диаметром ~ 14 мм и длиной до 40 мм.

Для определения состава выращенных монокристаллов был использован микрорентгеноспектральный анализ. Поэлементный состав указанных монокристаллов производился на установке «Stereoscan-360». В качестве анализатора рентгеновского спектра использовали рентгеновский спектрометр «AVALON-8000».

Равновесность монокристаллов $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ определяли рентгеновским методом. Угловые положения линий дифракционного спектра записывали на рентгеновском аппарате ДРОН-3М в CuK_α -излучении с графитовым монохроматором. Образцы для измерений готовили путем измельчения кристаллов и их последующей запрессовкой в специальном держателе. Для снятия механических напряжений, возникающих при растирании монокристаллов, проводили их отжиг в вакууме при температуре 650 К в течение 2 ч.

Плотность монокристаллов $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ определяли методом гидростатического взвешивания. Для измерений из полученных слитков вырезали образцы в виде кубиков весом $\sim 2,0$ г, которые подвешивали на тонкой нейлоновой нити. Предварительно кристалл взвешивали на воздухе с точностью $\sim 10^{-5}$ г, а затем подвешивали на крючок чашки весов и их уравнивали. Над чашкой весов на подставке помещали стеклянный стакан с CCl_4 и при арретированных весах образец помещали в стакан с жидкостью. Затем включали весы и через некоторое время их уравнивали снятием части разновесов с правой чашки.

$$\rho_{\text{гидр.}} = \frac{m}{M}(\delta - \lambda) + \lambda, \quad (1)$$

где m – вес кристалла на воздухе; δ – плотность CCl_4 при температуре взвешивания; λ – плотность воздуха.

Для измерения микротвердости из полученных монокристаллов вырезают плоскопараллельные пластинки, которые механически шлифуют и полируют с одной стороны, а затем для снятия механических напряжений, возникающих при механической обработке, протравливают в смеси $\text{Br}_2:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:3$. Микротвердость измеряют на микротвердомере «LEICA VMHT MOT» с моторизованным револьвером и ручным управлением столика и фокусировки по методу Кнупа в пяти точках при нагрузках 10–20 г. Индентором является четырехсторонняя пирамида с ромбическим основанием и осевыми углами. Величина нагрузки на образец составляет 10 г, длительность – 10 с, длина диагонали индентора ~ 40 мкм.

Число твердости каждого образца определяют как среднее арифметическое значение из 15–20 отпечатков и рассчитывают по формуле:

$$H = (1854 * P) / d^2, \quad (2)$$

где P – нагрузка на пирамиду, d – диагональ отпечатка на поверхности образца после снятия нагрузки.

Спектры пропускания в области края собственного поглощения регистрировали на спектрофотометре Beckman – 5240 при 80 и 295 К. Для измерений из полученных монокристаллов вырезали плоскопараллельные пластинки перпендикулярно оси роста кристалла, которые затем механически шлифовали и полировали с двух сторон до толщин ~ 20 мкм. Для снятия нарушенного слоя, образовавшегося при механической обработке кристаллов, непосредственно перед измерениями спектров образцы подвергали обработке в травителе состава $\text{Br}_2:\text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1:3$.

Измерения теплового расширения проводят на кварцевом dilatометре в интервале температур 80–600 К. В этом методе измерение твердых тел осуществляется относительно теплового расширения кварца [5]. Перед измерениями установку вакуумируют, что препятствует окислению образца.

Результаты и их обсуждение

Типичные результаты рентгеновских исследований приведены на рис. 1 и в табл. 1. Видно, что на представленной дифрактограмме проявляются рефлексы отражения, характерные кубической структуры шпинели. Параметр элементарной ячейки, рассчитанный методом наименьших квадратов для рефлексов при углах $2\theta > 60^\circ$, для $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ равен $a = 10,727 \pm 0,005 \text{ \AA}$. Наблюдаемое на дифрактограмме (рис. 1) разрешение высокоугловых рефлексов указывает на равновесность монокристаллов $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$, выращенных с помощью развитой методики направленной кристаллизации расплава.

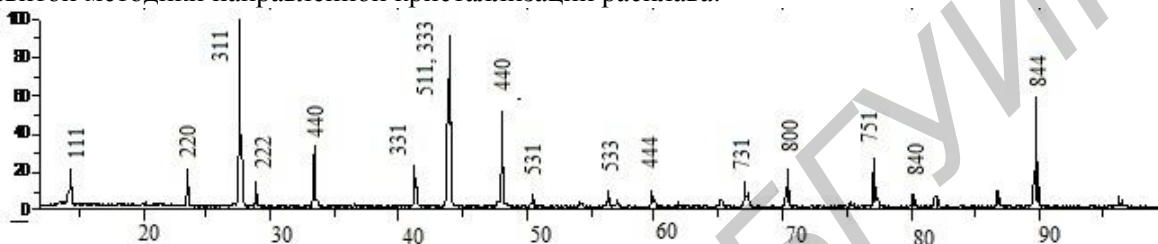


Рис. 1. Дифрактограмма соединения $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$

Таблица 1. Рентгенометрические данные кристаллов $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$

2 θ , град		I/I ₀ , %	hkl	2 θ , град		I/I ₀ , %	hkl
расчет	эксперимент			расчет	эксперимент		
14,29	14,32	17	111	56,90	56,92	9	622
23,50	23,51	20	220	59,67	59,68	10	444
27,55	27,59	100	311	61,72	61,75	16	711
28,81	28,87	17	222	65,02	65,03	7	642
33,39	33,40	63	400	66,96	66,98	17	731
36,48	36,53	11	331	70,13	70,13	9	800
41,20	41,24	11	422	76,91	76,92	12	751
43,82	43,84	54	511	79,93	79,90	23	840
47,95	47,98	97	440	86,48	86,45	9	931
50,28	50,39	12	531	89,43	89,41	15	844
54,02	54,04	7	620	95,94	95,92	10	773
56,20	56,22	18	533	105,58	105,57	7	775

Результаты измерения показали, что плотность соединения $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ составляет $4,65 \text{ г/см}^3$, а микротвердость равна $H = 310 \text{ кг/мм}^2$. Ошибка в определении H не превышала 5 %.

По зарегистрированным спектрам пропускания (T) рассчитывали коэффициент поглощения (α) по формуле, учитывающей многократное внутреннее отражение в плоскопараллельном образце:

$$\alpha = \frac{1}{d} \ln \left(A + \sqrt{A^2 + R^2} \right), \quad (3)$$

где d – толщина образца; $A = (1-R)^2/2 \cdot T$, коэффициент отражения $R = 0,25$.

Как и для других соединений этого класса, ширину запрещенной зоны (E_g) определяли экстраполяцией прямолинейного участка зависимости $(\alpha \hbar\omega)^2$ от энергии фотона ($\hbar\omega$) до пересечения с осью абсцисс. Значение энергии E_g для соединения $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ равны $1,574 \pm 0,005 \text{ эВ}$ (80 К) и $1,545 \text{ эВ} \pm 0,005$ (295 К).

Результаты измерений теплового расширения показали, что в исследованном интервале температур никаких аномалий не наблюдается. Это свидетельствует о том, что фазовые превращения отсутствуют в указанном монокристалле. Коэффициент теплового расширения αL для соединения $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ в интервале температур 90–260 К резко возрастает от $2,9 \cdot 10^6 \text{ К}^{-1}$ до

$10,5 \cdot 10^6 \text{ K}^{-1}$, выше 260 К рост α_L замедляется и слабо зависит от температуры. Полученные значения коэффициентов теплового расширения были использованы для расчета характеристической температуры Дебая (Θ_D) и среднеквадратичных динамических смещений атомов ($\sqrt{\bar{u}^2}$) по следующим формулам:

$$\Theta_D^\alpha = 14,3/\alpha_L^{1/2} \bar{A}^{1/2} V^{1/3}, \quad (4)$$

$$\bar{u}^2 = 4,3 \cdot 10^{-14} [D(\Theta/T)/\Theta/T + 1/4] / \bar{A} \Theta, \quad (5)$$

где α_L – коэффициент теплового расширения, \bar{A} – средняя атомная масса, V – средний атомный объем, $D(\Theta/T)$ – функция Дебая.

Данные расчетов величин Θ_D^α и $\sqrt{\bar{u}^2}$ представлены в табл. 2.

Таблица 2. Коэффициенты теплового расширения, температура Дебая и среднеквадратичные динамические смещения атомов для соединения $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$

T, K	$\alpha \times 10^6, \text{K}^{-1}$	$\Theta_D^\alpha, \text{K}$	$\sqrt{\bar{u}^2}, \text{Å}$	T, K	$\alpha \times 10^6, \text{K}^{-1}$	$\Theta_D^\alpha, \text{K}$	$\sqrt{\bar{u}^2}, \text{Å}$
100	2,8	297	0,096	230	7,4	182	0,221
110	2,88	292	0,101	240	7,85	177	0,226
120	3	286	0,106	250	8,44	171	0,242
130	3,2	277	0,113	260	8,92	166	0,253
140	3,42	268	0,12	270	9,4	162	0,264
150	3,7	258	0,127	280	9,9	157	0,277
160	4,03	247	0,137	290	10,2	155	0,288
170	4,45	235	0,147	300	10,5	153	0,294
180	4,9	224	0,158	320	10,7	151	0,307
190	5,4	213	0,17	340	10,9	150	0,319
200	5,89	204	0,182	360	10,95	149,8	0,328
210	6,35	197	0,195	380	10,9	150	0,335
220	6,94	188	0,209	400	10,97	149,7	0,347

INVESTIGATIONS OF SINGLE CRYSTALS OF THE TERNARY COMPOUND $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$

V.V. SHATALOVA

Abstract

With the method of directional solidification (vertical Bridgman method) single crystals $\text{CuIn}_7\text{S}_{11}$ are grown. Their composition, structure and electrical properties are determined. According to the transmission spectra in the fundamental absorption edge at 80 and 295 K the bandgap is determined. The researches of thermal expansion and calculation of thermodynamic parameters are held by the dilatometric method.

Список литературы

1. Горюнова Н.А. Сложные алмазоподобные полупроводники. М., 1968.
2. Новоселова А.В. Физико-химические свойства полупроводниковых веществ: справочник. М., 1979.
3. Tsang S.B., Wei S.H., Zunger A. et.al. // Phys. Rev. B. 1998. Vol. 57. P. 9642.
4. Coutts T.J., Kazmerskii L.L., Wagner S. Copper Indium Diselenide for Photovoltaic Applications. Amsterdam, 1986.
5. Новикова С.И. Тепловое расширение твердых тел. М., 1974.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ДОКЛАДЫ БГУИР»

1. К публикации принимаются статьи, отражающие результаты **оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для публикации в других изданиях**. Тематика представляемой статьи должна соответствовать рубрикам журнала (электроника, радиофизика, радиотехника, информатика).

2. Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений, в которых выполнялось исследование (с указанием адреса); ключевые слова (до 10 слов) на русском языке; аннотацию на русском и английском языках (3–5 предложений). Рекомендуется стандартизировать текст статьи, используя подзаголовки **введение, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, заключение, список литературы**.

3. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на листах формата А4, и в электронном варианте в виде файла формата MS Word (расширение – *.doc). Также необходимо представить *акт экспертизы* о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Количество страниц и иллюстраций:

- для оригинальной статьи – не более 7 страниц и 8 иллюстраций;
- для краткого сообщения – не более 3 страниц и 2 иллюстраций.

4. При наборе текста используется гарнитура Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210×297 мм). Поля слева, справа, сверху и снизу – по 25 мм. Межстрочный интервал – 1,0. Абзацный отступ – 1,25 см. *Запрещается* при наборе текста использовать гиперссылки, маркированные списки и ручные переносы слов.

5. **Формульные выражения** выполняются только в редакторе формул MathType, стиль – «Математика» («Math»), гарнитура – Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Как в тексте статьи, так и в формульных выражениях, математические функции, цифры, буквы греческого и русского алфавитов набираются прямым начертанием, латинские буквы – курсивом. Нумеровать рекомендуется те формульные выражения, на которые имеются ссылки в последующем тексте, заключая при этом номер в круглые скобки.

6. Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- размер рисунка – не более 15×20 см, разрешение – не менее 300 dpi;
- рисунок должен быть оформлен как графический объект;
- подрисовочные подписи обязательно должны включать в себя номер и название рисунка;
- словесных обозначений на рисунках рекомендуется избегать, используя при этом цифровые либо буквенные обозначения, пояснения к которым следует давать в тексте статьи либо подрисовочных подписях;
- цифровые и буквенные обозначения на рисунках по начертанию и размеру должны соответствовать обозначениям в тексте статьи либо подрисовочных подписях.

7. Наименования, обозначения, определения и правила применения единиц физических величин, употребляемых в статье, должны соответствовать ГОСТ 8.417–2002.

8. Ссылки на литературные источники нумеруются в порядке их цитирования в тексте. Номера ссылок заключаются в квадратные скобки.

9. Набор статьи рекомендуется выполнять в шаблоне, доступном для скачивания на сайте БГУИР (www.bsuir.by → «Журнал "Доклады БГУИР"» → раздел «Авторам»).

10. Адрес для пересылки статей в электронном варианте и переписки с редакцией: doklady@bsuir.by.

***Ответственность за оригинальность и достоверность
материалов, поданных в печать, несут авторы.***

