



<http://www.volgatech.net/>

ВЕСТНИК 2(18) 2013

ПОВОЛЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-технический журнал

Издаётся с ноября 2007 года

Выходит три раза в год

СЕРИЯ «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы»

Журнал включен в **ПЕРЕЧЕНЬ** ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Учредитель и издатель:

ФГБОУ ВПО «Поволжский государственный технологический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-51886 от 23 ноября 2012 г.)

Полное или частичное воспроизведение материалов, содержащихся в настоящем издании, допускается только с письменного разрешения редакции.

Адрес редакции:

424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Тел. (8362) 68-60-12, 68-78-46

Факс (8362) 41-08-72

e-mail: vestnik@volgatech.net

Редактор *Т. А. Рыбалка*

Дизайн обложки *Л. Г. Маланкина*

Компьютерная верстка

А. А. Кислицын

Перевод на английский язык

О. В. Миронова

Подписано в печать 24.09.13.

Формат 60×84 1/8. Усл. п. л. 12,75.

Тираж 500 экз. Заказ №

Дата выхода в свет 30.09.13.

Цена свободная

Поволжский государственный технологический университет
424000, Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинал-макета
в ООО «Стринг»
424002, Йошкар-Ола,
ул. Кремлевская, 31

Главный редактор Е. М. Романов

Главная редакционная коллегия:

Е. М. Романов, д-р с.-х. наук, профессор

(главный редактор)

Д. В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

(первый зам. гл. редактора)

А. Д. Арзамасцев, д-р экон. наук, профессор

(зам. гл. редактора)

С. А. Денисов, д-р с.-х. наук, профессор

(зам. гл. редактора)

Н. В. Рябова, д-р физ.-мат. наук, профессор

(зам. гл. редактора)

А. В. Артамонова, канд. филос. наук

(отв. секретарь)

Редакционная коллегия серии:

Н. В. Рябова, д-р физ.-мат. наук, профессор

(зам. гл. редактора – главный редактор серии)

А. П. Аниютин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

Alexander A. Balandin, D. Sci., Professor

(Riverside, California, USA)

А. С. Дмитриев, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

В. А. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

Д. В. Иванов, д-р физ.-мат. наук, профессор

А. С. Крюковский, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

А. Н. Леухин, д-р физ.-мат. наук, профессор

Д. С. Лукин, д-р физ.-мат. наук, профессор (Москва)

И. Я. Орлов, д-р техн. наук, профессор (Нижний Новгород)

В. А. Песошин, д-р техн. наук, профессор (Казань)

А. А. Роженцов, д-р техн. наук, профессор

И. Г. Сидоркина, д-р техн. наук, профессор

Н. М. Скулкин, д-р техн. наук, профессор

О. Ф. Тырнов, д-р физ.-мат. наук, профессор (Украина)

Я. А. Фурман, д-р техн. наук, профессор

Л. Ф. Черногор, д-р физ.-мат. наук, профессор (Украина)

VESTNIK 2(18) 2013

OF VOLGA STATE UNIVERSITY
OF TECHNOLOGY

Scientific and technical journal

Issued since November, 2007

Published three times a year

SERIES «Radio Engineering and Infocommunication Systems»

The journal is included in the list of leading reviewed scientific magazines and editions, where the basic scientific results of doctoral and Ph. D. theses should be published

Founder and Publisher:

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Professional Education «Volga State University of Technology»

The journal is registered by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (registration certificate ПИ № ФС77-51886 from November 23, 2012)

Full and partial reproduction of materials published in the issue is allowed only upon receiving the written approval of the Editorial Office

Editorial office address:

424006, Yoshkar-Ola, Panfilov street, 17

Tel. (8362) 68-60-12, 68-78-46

Fax (8362) 41-08-72

E-mail: vestnik@volgatch.net

Editor *T. A. Rybalka*

Cover design *L. G. Malankina*

Computer-aided makeup

A. A. Kislitsyn

Translation into English

O. V. Mironova

Passed for printing 24.09.13.

Format 60×84 ¹/₈. No. of press sheets. 12,75

Circulation 500 copies. Order №

Publication Date 30.09.13.

Free price

Volga State University of Technology
424000, Yoshkar-Ola, Lenin Square, 3

Printed from the original layout

in LLC «String»

424002, Yoshkar-Ola,
Kremlevskaya street, 31

Editor-in-chief E. M. Romanov

Editorial Board:

E. M. Romanov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor
(*Editor-in-Chief*)

D. V. Ivanov, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor (*First Deputy Editor-in-Chief*)

A. D. Arzamastsev, Doctor of Economic Sciences, Professor
(*Deputy Editor-in-Chief*)

S. A. Denisov, Doctor of Agricultural Sciences, Professor
(*Deputy Editor-in-Chief*)

N. V. Ryabova, Doctor of Physical and Mathematical Sciences,
Professor (*Deputy Editor-in-Chief*)

A. V. Artamonova, Candidate of Philosophical Sciences
(*Executive Secretary*)

Editorial Board of the series:

N. V. Ryabova, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
(*Deputy Editor-in-chief – Editor-in-chief of the series*)

A. P. Anyutin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Moscow)

Alexander A. Balandin, D. Sci., Professor
(Riverside, California, USA)

A. S. Dmitriev, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
(Moscow)

V. A. Ivanov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

D. V. Ivanov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

A. S. Kryukovsky, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
(Moscow)

A. N. Leukhin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor

D. S. Lukin, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Moscow)

I. Ya. Orlov, Doctor of Engineering Sciences, Professor
(Nizhny Novgorod)

V. A. Pesoshin, Doctor of Engineering Sciences, Professor (Kazan)

A. A. Rozhentsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor

I. G. Sidorkina, Doctor of Engineering Sciences, Professor

N. M. Skulkin, Doctor of Engineering Sciences, Professor

O. F. Tyrnov, Doctor of Physics and Mathematics, Professor (Ukraine)

Ya. A. Furman, Doctor of Engineering Sciences, Professor

L. F. Chernogor, Doctor of Physics and Mathematics, Professor
(Ukraine)

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

Д. В. Иванов, В. А. Иванов, М. И. Рябова, Н. Н. Михеева, Е. В. Катков. Искажения широкополосного радиосигнала в ионосфере, вызванные нелинейной частотной дисперсией
В. А. Бурдин, И. В. Григоров. Применение нелинейных фазовых фильтров в высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи со спектральным уплотнением
Н. С. Хохлов, А. В. Сидоров. Оценка устойчивости системы радиосвязи и управления к деструктивным электромагнитным воздействиям
А. Ю. Чернышев, В. Г. Шибанаев. Обеспечение тактовой синхронизации в цифровых системах передачи на основе многоуровневых кодов с внутренней избыточностью

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

А. Г. Коробейников, С. Ю. Блинов, А. В. Лейман, Г. Л. Маркина, И. М. Кутузов. Алгоритм определения спамности документов на базе фейеровских отображений
Р. Г. Хафизов, Т. В. Яранцева, Т. П. Киселева, А. М. Суслова. Распознавание изображений со случайной формой
А. О. Евдокимов, А. В. Зувев, А. А. Кислицын. Комплексирование алгоритмов обработки радионавигационных данных и анализа изображений для корректировки маршрута движения наземного транспортного средства

ЭЛЕКТРОНИКА

Д. И. Касимова, А. А. Кузнецов, П. П. Крыницкий, О. Г. Морозов, И. И. Нуреев, А. Ж. Сахабутдинов, С. М. Кучев, А. В. Петров. Оценка возможностей применения волоконных решеток Брэгга с гауссовым профилем отражения в качестве датчика температуры
Н. М. Скулкин, Е. В. Михеева. Стабилизация металлокерамических спаев на этапе металлизации пластичных заготовок коммутационных плат
А. В. Мороз. Система контроля кристаллического строения пленок нитрида алюминия в процессе их получения

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

И. И. Попов, А. В. Мороз. Новые горизонты фотоники и нанoeлектроники
Информация для авторов

CONTENTS

TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, M. I. Ryabova, N. N. Miheeva, E. V. Katkov. Broadband signal distortion in the ionosphere, caused by nonlinear frequency dispersion
V. A. Burdin, I. V. Grigorov. Application of nonlinear phase filters in high-speed, fibre-optical transmission systems with the spectral multiplex

5

16

27

36

N. S. Hohlov, A. V. Sidorov. Estimation of radio communication and control system resistance to destructive electromagnetic effect
A. Yu. Chernyshev, V. G. Shibanaev. Clock synchronization support in digital systems of transmission on the basis of multilevel codes with built-in redundancy

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

A. G. Korobeynikov, S. Yu. Blinov, A. V. Leyman, G. L. Markina, I. M. Kutuzov. Algorithm of spam document detection on the basis of fejer mappings

43

52

R. G. Hafizov, T. V. Yarantseva, T. P. Kiseleva, A. M. Suslova. Recognition of images with a random shape
A. O. Evdokimov, A. V. Zuev, A. A. Kislitsin. Complexation of radio-navigation data processing algorithms and image analysis for land-based vehicle route correction

61

ELECTRONICS

D. I. Kasimova, A. A. Kuznetsov, P. P. Krynitsky, O. G. Morozov, I. I. Nureev, A. Zh. Sahabutdinov, S. M. Kuchev, A. V. Petrov. Estimation of possibilities of the application of fibre bragg gratings with a gaussian reflection profile as a temperature sensor

73

82

88

N. M. Skulkin, E. V. Miheeva. Stabilization of metal-ceramic seals at the stage of the metallization of plastic blanks of switching boards

A. V. Moroz. Control system of the crystal structure of aluminum nitride films in the process of their production

THE NOVELTIES IN THE FIELD OF ENGINEERING AND TECHNOLOGIES. REVIEWS. CONFERENCES. IMPORTANT DATES

I. I. Popov, A. V. Moroz. New horizons of photonics and nanoelectronics
Information for the authors

98

102

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.371.25;550.388.2

**Д. В. Иванов, В. А. Иванов,
М. И. Рябова, Н. Н. Михеева, Е. В. Катков**

ИСКАЖЕНИЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО РАДИОСИГНАЛА В ИОНОСФЕРЕ, ВЫЗВАННЫЕ НЕЛИНЕЙНОЙ ЧАСТОТНОЙ ДИСПЕРСИЕЙ

Получено общее решение задачи дисперсионных искажений широкополосных радиосигналов при распространении в среде с частотной дисперсией, описываемое функциями Эйри. Выделены эффекты искажений, связанных с распространением, и искажений, обусловленных формой сигналов. Рассмотрены причины, вызванные неопределенностью взаимосвязи производной $\tau = d\phi/d\omega$ с искаженной дисперсией огибающей сигнала, полученной с учетом согласованной обработки при приеме.

Ключевые слова: ионосфера; нелинейная частотная дисперсия; искажения; импульсная характеристика; радиоканал; сигнал с расширенным спектром.

Введение. В настоящее время для современных систем высокочастотной связи (ВЧ) особенно актуальной является проблема расширения полосы частот радиосигналов, которая непосредственно связана с другой неизученной до конца научной проблемой дисперсионных искажений [1]. Существующую проблему необходимо рассматривать в рамках развиваемого, особенно в последнее время, подхода, в котором задача распространения в среде радиосигналов заменяется на задачу прохождения им эквивалентной многомерной линейной системы с одним (в случае узкополосных систем) или многими (в случае широкополосных систем) выходами. Такие системы описываются в частот-

ной области частотной (ЧХ) и дисперсионной (ДХ) характеристиками, а во временной – импульсной характеристикой (ИХ). Основной задачей в этом случае является решение вопроса о влиянии частотной дисперсии на вид ДХ, ЧХ и ИХ широкополосных радиоканалов с различными средними частотами из полосы прозрачности радиолинии [2].

Цель работы – исследование факторов нелинейности и стохастичности дисперсионной характеристики и влияния этих факторов на искажения импульсных характеристик различных ионосферных радиоканалов и широкополосных сигналов с различными видами модуляции с учетом их сжатия при обработке.

Импульсная характеристика радиоканала в случае нелинейной и линейной частотной дисперсии. Искажения огибающей импульсной характеристики (ИХ) в случае регулярной линейной дисперсии рассмотрены в работах [3–5]. Влияние нелинейной дисперсии на ИХ ранее не рассматривалось, поэтому обратимся к этой задаче. Будем исследовать ИХ $h(\tau)$ радиоканала, образованного k -лучами с суммарной частотной характеристикой $H(f)$:

$$\begin{aligned} h(\tau) &= \int_{-\infty}^{\infty} H(f) \cdot \exp\{i2\pi f\tau\} df = \\ &= \int_{\bar{f}-B/2}^{\bar{f}+B/2} H_0(f) \cdot \exp\{i2\pi f\tau\} df = \\ &= \sum_{k=1}^K \int_{\bar{f}-B/2}^{\bar{f}+B/2} H_{0k}(f) \cdot \exp\{-i\varphi_k(f)\} \times \\ &\quad \times \exp\{i2\pi f\tau\} df = \sum_{k=1}^K h_k(\tau). \end{aligned} \quad (1)$$

Рассмотрим влияние нелинейной регулярной составляющей фазочастотной характеристики (ФЧХ) на отдельное слагаемое (1), которое имеет вид:

$$\begin{aligned} h_k(\tau) &= \int_{\bar{f}-B/2}^{\bar{f}+B/2} H_{0k}(f) \cdot \exp\{-i\bar{\varphi}_{kp}(f)\} \times \\ &\quad \times \exp\{i2\pi f\tau\} df = \\ &= \int_{\bar{f}-B/2}^{\bar{f}+B/2} H_{0k}(f) \exp\left\{-i\left(\bar{\varphi}_{kp}(\bar{f}) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2\pi\bar{\tau}_{kp}(\bar{f})(f-\bar{f}) + \pi\bar{s}_k(\bar{f})(f-\bar{f})^2 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{\pi}{3}v_k(\bar{f})(f-\bar{f})^3\right)\right\} \exp\{i2\pi f\tau\} df. \end{aligned} \quad (2)$$

Для дальнейших преобразований введем обозначения:

$$\begin{aligned} a &= \frac{\pi}{3}v_k(\bar{f}), \quad b = \pi s_k(\bar{f}), \\ c &= 2\pi\bar{\tau}_{kp}(\bar{f}), \quad d = \bar{\varphi}_{kp}(\bar{f}) \end{aligned}, \quad (3)$$

а в интеграле (2) выполним замену переменной $z = (f - \bar{f})$. Кроме того, будем считать, что в полосе радиоканала амплитудно-частотная характеристика (АЧХ)

$H_{0k}(f)$ является почти постоянной, т.е. $H_{0k}(f) \approx H_{0k}(\bar{f})$.

Учитывая сделанные замечания, формулу (2) приведем к виду:

$$\begin{aligned} h_k(\tau) &= H_{0k}(\bar{f}) \exp\{i(2\pi\bar{f}\tau - d)\} \times \\ &\times \int_{-B/2}^{B/2} \exp\{-i(az^3 + bz^2 + (c - 2\pi\tau)z)\} dz = \\ &= H_{0k}(\bar{f}) \exp\{i(2\pi\bar{f}\tau - d)\} \times \\ &\times \int_{-B/2}^{B/2} \exp\{i(az^3 - bz^2 + (c - 2\pi\tau)z)\} dz. \end{aligned} \quad (4)$$

Далее применим преобразование

$$\begin{aligned} az^3 - bz^2 + (c - 2\pi\tau)z &= a\left(z - \frac{b}{3a}\right)^3 + \\ &+ \left(c - \frac{b}{3a} - 2\pi\tau\right)z + \frac{b^3}{27a^2} \end{aligned}$$

и введем замену переменной $y = z - \frac{b}{3a}$.

Тогда вместо формулы (4) получим:

$$\begin{aligned} h_k(\tau) &= H_{0k}(\bar{f}) \exp\left\{i\left(\frac{bc}{3a} - \frac{2b^3}{27a^2} - d + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2\pi\left(\bar{f} - \frac{b}{3a}\right)\tau\right)\right\} \times \int_{y_1}^{y_2} \exp\{i(ay^3 + \\ &\quad + \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau\right)y)\} dy, \end{aligned} \quad (5)$$

где $y_1 = -\frac{B}{2} - \frac{b}{3a}$, $y_2 = \frac{B}{2} - \frac{b}{3a}$.

Используем свойство аддитивности определенного интеграла. Тогда формула (5) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} h_k(\tau) &= H_{0k}(\bar{f}) \exp\left\{i\left(\frac{bc}{3a} - \frac{2b^3}{27a^2} - d + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + 2\pi\left(\bar{f} - \frac{b}{3a}\right)\tau\right)\right\} \times \left(\int_{y_1}^{\infty} \exp\{i(ay^3 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau\right)y)\} dy - \int_{y_2}^{\infty} \exp\{i(ay^3 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau\right)y)\} dy\right). \end{aligned} \quad (6)$$

Выразим интегралы, входящие в (6), через неполную функцию Эйри, используя данные работ [6–8]:

$$Ai(u; t) = \frac{1}{2\pi} \int_t^{\infty} \exp \left\{ i \left(\frac{x^3}{3} + xu \right) \right\} dx. \quad (7)$$

Выполним для подынтегрального выражения следующее преобразование:

$$ay^3 + \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau \right) y = \frac{(\sqrt[3]{3ay})^3}{3} + \frac{1}{\sqrt[3]{3a}} \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau \right) \sqrt[3]{3a} y.$$

Тогда, учитывая (7) и равенства $y_1 = -\frac{B}{2} - \frac{b}{3a}$, $y_2 = \frac{B}{2} - \frac{b}{3a}$, для ИХ получим:

$$h_k(\tau) = \frac{2\pi}{\sqrt[3]{3a}} H_{0k}(\bar{f}) \exp \left\{ i \left(\frac{bc}{3a} - \frac{2b^3}{27a^2} - d + 2\pi \left(\bar{f} - \frac{b}{3a} \right) \tau \right) \right\} \times \\ \times \left\{ Ai \left(\frac{1}{\sqrt[3]{3a}} \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau \right); -\frac{B}{2} - \frac{b}{3a} \right) - Ai \left(\frac{1}{\sqrt[3]{3a}} \left(c - \frac{b^2}{3a} - 2\pi\tau \right); \frac{B}{2} - \frac{b}{3a} \right) \right\}. \quad (8)$$

Подставляя (3) в (8), окончательно будем иметь:

$$h_k(\tau) = \frac{2\pi H_{0k}(\bar{f})}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}} \exp \left\{ i \left(2\pi \frac{s_k(\bar{f}) \bar{\tau}_{kp}(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} - \frac{2\pi s_k^3(\bar{f})}{3 v_k^2(\bar{f})} - \bar{\Phi}_{kp}(\bar{f}) + 2\pi \left(\bar{f} - \frac{s_k(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} \right) \tau \right) \right\} \times \\ \times \left\{ Ai \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}} \left(2\pi \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \pi \frac{s_k^2(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} - 2\pi\tau \right); -\frac{B}{2} - \frac{s_k(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} \right) - \right. \\ \left. - Ai \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}} \left(2\pi \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \pi \frac{s_k^2(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} - 2\pi\tau \right); \frac{B}{2} - \frac{s_k(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} \right) \right\}. \quad (9)$$

Вычисляя модуль от левой и правой части формулы, для огибающей ИХ $|h_k(\tau)|$ получим выражение:

$$|h_k(\tau)| = \frac{2\pi |H_{0k}(\bar{f})|}{\sqrt[3]{\pi |v_k(\bar{f})|}} \cdot \left| Ai \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}} \left(2\pi \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \pi \frac{s_k^2(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} - 2\pi\tau \right); -\frac{B}{2} - \frac{s_k(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} \right) - \right. \\ \left. - Ai \left(\frac{1}{\sqrt[3]{\pi |v_k(\bar{f})|}} \left(2\pi \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \pi \frac{s_k^2(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} - 2\pi\tau \right); \frac{B}{2} - \frac{s_k(\bar{f})}{v_k(\bar{f})} \right) \right|. \quad (10)$$

Учтем, что в случае нелинейной частотной дисперсии ИХ радиоканала, когда ИХ принимаемых мод разрешается, модуль суммарной ИХ $|h(\tau)| = \sum_{k=1}^K |h_k(\tau)|$ представляет собой сумму, каждое слагаемое $|h_k(\tau)|$ которой определяется выражением (11).

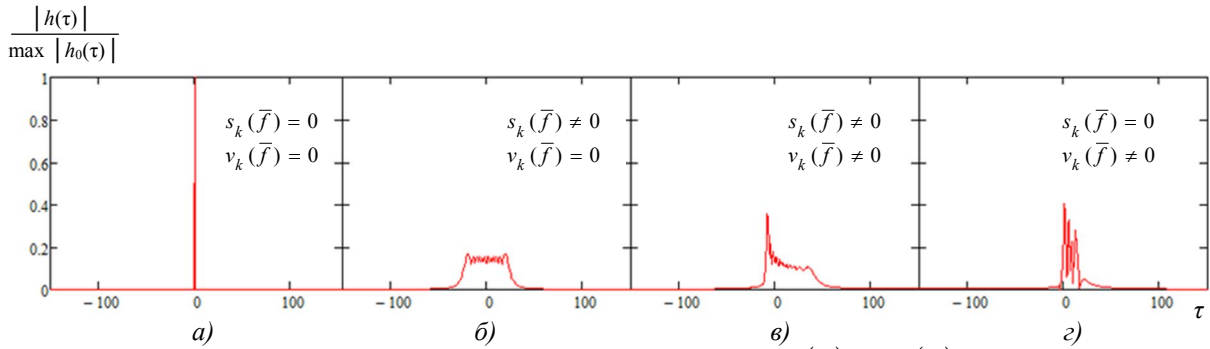


Рис. 1. Изменение амплитуды ИХ в зависимости от параметров $s_k(\bar{f})$ и $v_k(\bar{f})$ частотной дисперсии

Из формулы (10) видно, что свойства диспергирующего радиоканала определяются шестью ключевыми параметрами: средней частотой $\bar{f}$ канала и его полосой B , АЧХ $H_{0k}(\bar{f})$, временем группового запаздывания $\bar{\tau}_{kp}(\bar{f})$, наклоном $s_k(\bar{f})$ ДХ и вогнутостью $v_k(\bar{f})$ ДХ. В зависимости от их значений из полученного решения можно получить частные случаи: канал без дисперсии; с линейной дисперсией и кубической дисперсионной ДХ.

На рис. 1 представлены полученные нами результаты расчетов огибающей ДХ по формуле (10) в общем и частных случаях. Здесь и далее в тексте рисунки получены с учетом того, что начало отсчета задержки перенесено в точку с координатой $\tau = \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) = d\varphi/d\omega|_{f=\bar{f}}$.

На рис. 1, а приведены примеры вида огибающей ИХ, нормированной к ее максимальному значению при отсутствии частотной дисперсии (при $s_k(\bar{f}) \rightarrow 0$ и $v_k(\bar{f}) \rightarrow 0$), когда (10) стремится к виду:

$$|h_k(\tau)| \rightarrow H_{0k}(\bar{f}) B \frac{|\sin \pi B(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))|}{|\pi B(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))|} = H_{0k}(\bar{f}) B \left| \sin c \left[\pi B(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f})) \right] \right|. \quad (11)$$

Отметим, что в этом случае при расширении полосы канала ($B \rightarrow \infty$) функция $\sin c[\pi B(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))] \rightarrow \delta(\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))$.

Во втором случае ($s_k \rightarrow 0$) модуль ИХ стремится к виду, полученному [1] для линейной дисперсии (рис. 1, б):

$$h_k(\tau) = \frac{\exp\{i\theta_k\} H_{0k}(\bar{f})}{\sqrt{2s_k(\bar{f})}} \left[\{C(z_2) - C(z_1)\} - i\{S(z_2) - S(z_1)\} \right], \quad (12)$$

$$|h_k(\tau)| = \frac{H_{0k}(\bar{f})}{\sqrt{2s_k(\bar{f})}} \times$$

$$\times \sqrt{\{C(z_2) - C(z_1)\}^2 + \{S(z_2) - S(z_1)\}^2},$$

$$\text{где } \theta_k = -\bar{\varphi}_{kp}(\bar{f}) + 2\pi \bar{f} \tau + \frac{\pi}{s_k(\bar{f})} (\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f}))^2, \quad C(z), S(z) - \text{интегралы Френеля,}$$

$$z_1 = \sqrt{\frac{2}{s_k(\bar{f})}} (\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f})) - B\sqrt{2s_k(\bar{f})} \quad \text{и}$$

$$z_2 = \sqrt{\frac{2}{s_k(\bar{f})}} (\tau - \bar{\tau}_{kp}(\bar{f})).$$

Рис. 1, в соответствует общему случаю. Из него видно влияние функций Эйри, приводящей к затухающим колебаниям амплитуды на пьедестале, образованном из-за линейной дисперсии.

Четвертый случай соответствует ситуации, когда линейная дисперсия в пределе исчезает, т.е. когда $s_k \rightarrow 0$, а соответствующие формулы стремятся к виду (рис. 1, г):

$$\bar{\varphi}_{kp}(f) \rightarrow \bar{\varphi}_{kp}(\bar{f}) + 2\pi \bar{\tau}_{kp}(\bar{f})(f - \bar{f}) + \pi \frac{v_k(\bar{f})}{3} (f - \bar{f})^3; \quad (13)$$

$$h_k(\tau) \rightarrow \frac{2\pi H_{0k}(\bar{f})}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}} \exp\left\{i\left(-\bar{\varphi}_{kp}(\bar{f}) + 2\pi\bar{f}\tau\right)\right\} \times \left\{ \text{Ai}\left(\frac{2\pi(\bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \tau)}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}}; -\frac{B}{2}\right) - \right. \\ \left. - \text{Ai}\left(\frac{2\pi(\bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \tau)}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}}; \frac{B}{2}\right) \right\} \quad (14)$$

и

$$|h_k(\tau)| \rightarrow \frac{2\pi |H_{0k}(\bar{f})|}{\sqrt[3]{\pi |v_k(\bar{f})|}} \cdot \left| \text{Ai}\left(\frac{2\pi(\bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \tau)}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}}; -\frac{B}{2}\right) - \text{Ai}\left(\frac{2\pi(\bar{\tau}_{kp}(\bar{f}) - \tau)}{\sqrt[3]{\pi v_k(\bar{f})}}; \frac{B}{2}\right) \right|. \quad (15)$$

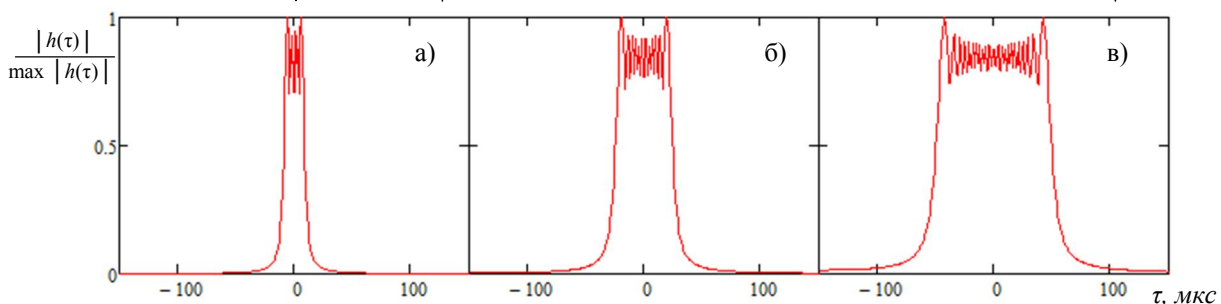


Рис. 2. Увеличивающаяся роль линейной дисперсии с ростом наклона ДХ (а – $s_k(\bar{f}) = 20 \text{ мкс} / \text{МГц}$,
б – $s_k(\bar{f}) = 50 \text{ мкс} / \text{МГц}$ и в – $s_k(\bar{f}) = 100 \text{ мкс} / \text{МГц}$)

Рис. 2 показывает увеличивающуюся роль линейной дисперсии с ростом наклона ДХ ($a - s_k(\bar{f}) = 20 \text{ мкс} / \text{МГц}$, б – $s_k(\bar{f}) = 50 \text{ мкс} / \text{МГц}$ и в – $s_k(\bar{f}) = 100 \text{ мкс} / \text{МГц}$) при незначительной вогнутости. В этом случае форма ИХ определяется функциями Френеля, поэтому при любом знаке наклона мы наблюдаем известное [3, 4] расширение ИХ в форме пьедестала, симметричное вертикальной прямой $\tau = 0$.

Рис. 3 иллюстрирует для общего случая роль кубического слагаемого ФЧХ канала. Рис. 3,а соответствует слу-

чаю, когда преобладает линейная дисперсия, роль нелинейной дисперсии не велика ($s_k(\bar{f}) = 100 \text{ мкс} / \text{МГц}$, $v_k(\bar{f}) = 0,038 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$). Рис. 3, б, в показывают возрастающую роль нелинейной дисперсии, которая связана с ростом вогнутости ДХ ($b - v_k(\bar{f}) = 0,076 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$ и в – $v_k(\bar{f}) = 0,38 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$) и обусловлена функциями Эйри. В случае выпуклости $v_k(\bar{f}) < 0$ вид ИХ меняется на тот, который получается при повороте данных ИХ относительно вертикальной прямой $\tau = 0$.

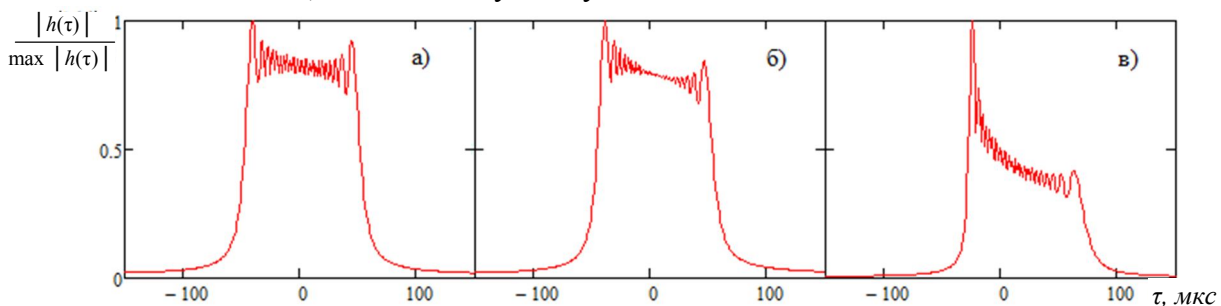


Рис. 3. Изменение формы ИХ при возрастании роли нелинейной дисперсии

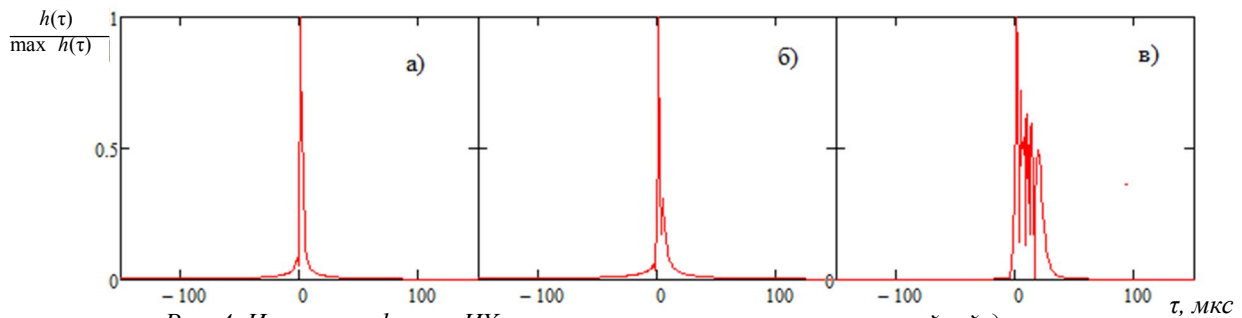


Рис. 4. Изменение формы ИХ при возрастании роли только нелинейной дисперсии:

$$a - v_k(\bar{f}) = 0,038 \text{ мкс} / \text{МГц}^2, \text{ б} - v_k(\bar{f}) = 0,076 \text{ мкс} / \text{МГц}^2 \text{ и в} - v_k(\bar{f}) = 0,38 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$$

Случай чисто кубической ДХ ранее также не рассматривался. Поэтому, для иллюстрации вклада этого члена ДХ в искажения ИХ, когда линейная дисперсия отсутствует, нами были проведены соответствующие вычисления. Их результаты представлены на рис. 4, где помещены примеры нормированных огибающих ИХ при различных значениях вогнутости: $a - v_k(\bar{f}) = 0,038 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$, $б - v_k(\bar{f}) = 0,076 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$ и $в - v_k(\bar{f}) = 0,38 \text{ мкс} / \text{МГц}^2$.

Следует отметить возрастание амплитуды колебательного процесса при увеличении вогнутости.

Дисперсионные искажения в ионосфере различных сигналов с расширенным спектром. Будем исходить из того, что любой сигнал $u_{\text{вх}}(t)$ на входе линейной системы (в том числе на выходе эквивалентного ионосферного радиоканала) можно представить сверткой излученного сигнала $u_{\text{вх}}(t)$ и ИХ канала:

$$u_{\text{вых}}(t) = u_{\text{вх}}(t) \otimes h(t).$$

Поэтому и сам излученный сигнал будет испытывать дисперсионные искажения огибающей. Достоинством данного подхода является то, что он позволяет разделить в искажениях сигналов физические процессы, связанные с каналом, и процессы, связанные с формой сигнала (его спектральным составом). Особый интерес представляет случай, когда над при-

нимаемым сигналом осуществляется согласованная обработка.

Для анализа дисперсионных искажений в случае согласованной обработки предположим, что спектр излучаемого в среду сигнала имеет вид $S_T(f)$, характеристика согласованного фильтра равна $S_T^*(f)$, а эквивалентный канал распространения имеет частотную характеристику вида $H(f, T)$. Тогда спектр сигнала на выходе системы сжатия можно представить в виде [1, 9]:

$$S_R(f, T) = S_T(f) \cdot H(f, T) \cdot S_T^*(f) = |S_T(f)|^2 \cdot H(f, T) = \hat{S}_T(f, T) \cdot H(f, T). \quad (16)$$

Будем рассматривать сигналы с расширенным спектром (CPC), которые можно представить в виде:

$$u_T(t) = U_1 \cdot \exp i\pi(2\bar{f}t + \dot{f}t^2), \quad (17, a)$$

для ЛЧМ или SSB – C;

$$u_T(t) = \sum_{k=1}^N U_k(t) \cdot \exp i2\pi(\bar{f} + f_k)t, \quad (17, б)$$

для ППРЧ или SSB – FH;

$$u_T(t) = \sum_{k=1}^N U_k(t) \cdot \exp i(2\pi\bar{f}t + \theta_k), \quad (17, в)$$

для ФКМ или SSB – DS;

$$\text{где } U_k(t) = \begin{cases} 1, & \text{если } (k-1)T \leq t \leq kT \\ 0, & \text{для всех других } t \end{cases}.$$

Здесь f_k – случайным образом выбранное значение частоты, θ_k – случайным образом выбранное значение фазы элемента сигнала, N – количество эле-

ментов в сигнале, $\dot{f}$ – скорость изменения частоты.

Сигналы (17, а, б) обладают тем свойством, что их спектральную амплитуду можно считать однородной в полосе частот сигнала – B_S , т.е.:

$$\hat{S}_T(f, T) = |S_T(F)|^2 = \begin{cases} \text{const} = k_S, & \text{если } |F| \leq B_S \\ 0, & \text{если } |F| > B_S \end{cases} \quad (18)$$

где $F = f - \bar{f}$, $\bar{f}$ – средняя частота спектра.

Спектральная амплитуда СРС с ФКМ из-за фильтрации при излучении основного лепестка будет иметь вид, близкий к функции Гаусса с носителем σ_S , поэтому:

$$\hat{S}_T(f, T) = |S_T(F)|^2 = \begin{cases} \exp\left[-\left(\frac{F}{\sigma_S}\right)^2\right], & \text{если } |F| \leq B_S \\ 0, & \text{если } |F| > B_S \end{cases} \quad (19)$$

Аналогичный вид будет иметь и спектральная амплитуда СРС с ЛЧМ и ППРЧ в случае, если при обработке в приемнике для уменьшения боковых лепестков используются «гауссоподобные» функции-окна.

Формула (16) означает, что задача распространения рассматриваемых СРС в диспергирующей среде сводится к задаче распространения только в одной среде некоторого сигнала с синфазным спектром

$$\begin{aligned} \hat{u}_R(\tau, T) &= \sum_{k=1}^K \int_{-B_C}^{+B_C} \hat{S}_T(f) \cdot H_k(\bar{f}, F, T) \cdot \exp[i2\pi F\tau] dF \approx \\ &\approx \begin{cases} k_S \cdot h(\tau, T) \\ \sum_{k=1}^K \int_{-\infty}^{+\infty} \exp\left[-\left(\frac{F}{\sigma_S}\right)^2\right] \cdot H_k(\bar{f}, F, T) \cdot \exp[i2\pi F\tau] dF \end{cases} \quad (21) \end{aligned}$$

где B_C – полоса частот радиоканала, равная полосе эквивалентного сигнала $B_C = B_S$.

Во втором случае эквивалентный сигнал на выходе радиоканала $\hat{u}_R(\tau, T)$ определяется интегралом свертки гауссовой функции с импульсной характеристикой системы. Действительно, излучаемый эквивалентный сигнал второго типа во временной области имеет вид [11]:

вида $\hat{S}_T(f, T)$ либо однородным (18), либо гауссоподобной формы вида (19), поэтому такой «обобщающий» сигнал $\hat{u}(t)$ со спектром $\hat{S}_T(f, T)$ был назван в [10] эквивалентным. Видим, что для представленных СРС имеются эквивалентные сигналы двух типов. При этом спектр эквивалентного сигнала второго типа можно рассматривать как спектр сигнала первого типа, умноженный на функцию Гаусса [11].

Итак, задача распространения произвольного СРС с учетом его сжатия в приемнике сводится к задаче распространения в среде эквивалентного сигнала [12]. Для эквивалентного сигнала первого типа спектр принимаемого сигнала пропорционален ЧХ радиоканала с полосой B_S , поэтому сам принимаемый эквивалентный сигнал первого типа будет пропорционален ИХ радиоканала:

$$u_{RE}(\tau, T) = k_S \cdot h(\tau, T), \quad (20)$$

где $h(\tau, T) = \sum_{k=1}^K h_k(\tau, T)$.

Следовательно, дисперсионные искажения соответствующих СРС будут совпадать с рассмотренными выше искажениями ИХ радиоканала.

Второй случай отличается тем, что в полосе канала частотная характеристика должна иметь гауссову спектральную плотность мощности.

Итак, в общем случае эквивалентный сигнал на выходе канала можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\hat{u}_R(t) &= \\ &= \int_{-\infty}^{+\infty} \exp \left[- \left(\frac{F}{\sigma_s} \right)^2 \right] \cdot \exp [i2\pi Ft] dF = (22) \\ &= \sqrt{\pi} \sigma_s \exp \left[- (\pi \sigma_s t)^2 \right].\end{aligned}$$

Поэтому эквивалентный СРС на входе приемника будет равен свертке $\hat{u}_R(t)$ и ИХ радиоканала:

$$\hat{u}_T(\tau) = \hat{u}_R(t) \otimes h(t - \tau). \quad (23)$$

Отметим один важный эффект, связанный с групповым запаздыванием сигнала при его распространении в среде с дисперсией [13, 14]. Он заключается в том, что величина производной $d\varphi/d\omega$ совпадает с групповым запаздыванием сигнала лишь в случае отсутствия дисперсии. Точнее, когда ее параметры стремятся к нулю ($s_k \rightarrow 0$ и $(v_k \rightarrow 0)$). В случае существенной дисперсии ситуация становится неопределенной: производная может быть равна времени запаздывания, отнесенного к середине ИХ, или запаздыванию переднего фронта ИХ.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ: проекты № 11-07-00420-а; 12-02-31734 мол_а; 13-07-00371-а; 13-02-00524-а; 13-07-97041; ФЦП: ГК №14.132.21.1418; АФИП: № 8.2523.2011, № 8.2448.2011, № 8.2559.2011; 8.2346.2011.

Список литературы

1. Иванов, Д.В. Исследования коррекции дисперсионных искажений, возникающих в ионосферных радиоканалах с полосой 1 МГц / Д.В. Иванов, В.А. Иванов, М.И. Рябова, А.Р. Лашевский // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13. – № 8. – С. 58-66.
2. Иванов, В.А. Многомерный высокочастотный радиоканал и экспериментальные исследования его основных характеристик / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Чернов // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2013. – Т. 18. – № 8. – С. 40-48.
3. Лукин, Д. С. Теория катастроф в проблемах стационарной и нестационарной дифракции / Д.С. Лукин, А.С. Крюковский, Е.А. Палкин, Д.В. Растягаев // Труды X школы-семинара по дифракции и распространению волн. 7–15.02.1993. – М.: МФТИ, 1993. – С. 36-111.

Выводы. Получено общее решение задачи дисперсионных искажений широкополосных радиосигналов при распространении в среде с частотной дисперсией. Показано, что в частных случаях оно переходит в известные решения для линейной дисперсии и отсутствия дисперсии. Исследования формы импульсной характеристики показали, что для линейной дисперсии она не меняется при смене знака наклона ДХ, а в общем случае – меняется при смене выпуклости на вогнутость ДХ на форму кривой, получаемой в результате поворота исходной относительно прямой $\tau = d\varphi/d\omega$. Получено общее решение задачи распространения в среде с дисперсией различных сигналов с расширенным спектром при учете их согласованной обработки при приеме. Рассмотрены причины, вызванные неопределенностью взаимосвязи производной $\tau = d\varphi/d\omega$ с искаженным дисперсией сигналом, которая совпадает с групповым запаздыванием огибающей только в среде без дисперсии, а в диспергирующих средах ее смысл становится неопределенным.

References

1. Ivanov D. V., Ivanov V. A., Ryabova M. I., Lashchevsky A. R. Issledovaniya korrektsii disperсионnykh iskazheniy, vznikayushchikh v ionosfernnykh radiokanalakh s polosoi 1 MGts [Investigations of the Correction of Dispersive Distortions Occurring in Ionospheric Radio Channels with a Band 1 MHz] Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2008. Vol. 13. No 8. P. 58-66.
2. Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Chernov A. A. Mnogomernyi vysokochastotnyi radiokanal i eksperimental'nye issledovaniya ego osnovnykh kharakteristik [Multidimensional High-frequency Radio Channel and Experimental Research on its Major Characteristics]. Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2013. Vol. 18, No 8. P.40-48.
3. Lukin D. S., Kryukovsky A. S., Palkin E. A., Rastyagaev D. V. Teoriya katastrof v problemakh statsionarnoi i nestatsionarnoi difraktsii [Theory of Catastrophes in the Problems of Stationary and Nonstationary Diffraction]. Trudy X shkoly-seminara po difraktsii i rasprostraneniyu voln [Proceedings of the X

4. *Крюковский, А.С.* Особенности распространения радиоимпульсов в средах с дисперсией / А.С. Крюковский, И.В. Зайчиков // *Электromagnитные волны и электронные системы*. – 2008. – Т.13. – № 8. – С.36-41.
5. *Арманд, Н.А.* Коррекция дисперсионных искажений широкополосных сигналов / Н.А. Арманд, В.А. Иванов // *Тр. XXI Всерос. науч. конф. «Распространение радиоволн»*. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – Т.1. – С.10-18.
6. *Бережной, Ю.А.* Радужное рассеяние в ядерных столкновениях / Ю.А. Бережной, А.В. Кузниченко, Г.М. Онищенко // *Физика элементарных частиц и атомного ядра*. – 1987. – Т.18. – Вып.2. – С. 289-321.
7. *Кравцов, Ю.А.* Каустики, катастрофы и волновые поля / Ю.А. Кравцов, Ю.И. Орлов // *Успехи физических наук*. – 1983. – Т. 141. – Вып.4. – С. 591-627.
8. *Анютин, А.П.* Развитие асимптотических и численных методов моделирования дифракционных полей сигналов в средах с дисперсией: Автореф. дис. ... д-ра. физ.-мат. наук: 01.04.03. / А.П. Анютин. – М., 2008. – 33 с.
9. *Иванов, Д.В.* Оптимальные полосы частот сложных сигналов для декаметровых радиолиний / Д.В. Иванов // *Радиотехника и электроника*. – 2006. – Т. 51. – № 4. – С. 389-396.
10. *Иванов, В.А.* Искажение сложных декаметровых радиосигналов в дисперсных ионосферных радиоканалах при квазизенитном распространении / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова, Н.А. Сорокин // *Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – 2010. – № 1. – С. 43-53.
11. *Гоноровский, И.С.* Радиотехнические цепи и сигналы / И.С. Гоноровский. – М.: Дрофа, 2006. – 720 с.
12. *Иванов, В.А.* Численные и полунатурные исследования функции рассеяния узкополосных декаметровых радиоканалов / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, И.Е. Царев // *Электromagnитные волны и электронные системы*. – 2009. – Т. 14. – № 8. – С. 46-54.
- School-seminar on Diffraction and Wave Propagation]. 7–15.02.1993. Moscow, MIPT, 1993. P.36-111.
4. *Kryukovsky A. S., Zaichikov I. V.* Osobennosti rasprostraneniya radioimpul'sov v sredakh s dispersiei [The Features of Radio Pulse Propagation in Mediums with the Dispersion]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2008. Vol. 13, No 8. P.36-41.
5. *Armand N. A., Ivanov V. A.* Korrektsiya dispersionnykh iskazheniy shirokopolosnykh signalov [The Correction of Dispersive Distortion of Broadband Signals]. *Trudy XXI Vserossiyskoi nauchnoi konferentsii «Rasprostraneniye radiovoln»* [Proceedings of the XXI All-Russian Scientific Conference «Radio Wave Propagation»]. Yoshkar-Ola, MarSTU, 2005. Vol. 1. P. 10-18.
6. *Berezhnoy Yu. A., Kuznichenko A. V., Onishchenko G. M.* Raduzhnoye rasseyaniye v yadernykh stolknoveniyakh [Rainbow Dispersion in Nuclear Collisions]. *Fizika elementarnykh chastits i atomnogo yadra* [Elementary Particle Physics and Nuclear Physics]. 1987. Vol.18. Issue 2. P. 289-321.
7. *Kraftsov Yu. A., Orlov Yu. I.* Kaustiki, katastrofy i volnovye polya [Caustics, Catastrophes and Wave Fields]. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Physical Science Success]. 1983. Vol. 141. Issue 4. P. 591-627.
8. *Anyutin A. P.* Razvitie asimptoticheskikh i chislennykh metodov modelirovaniya difraktsionnykh polei signalov v sredakh s dispersiei [The Development of Asymptotic and Numerical Methods of the Modeling of the Diffraction Fields of Signals in Mediums with the Dispersion]: *Avtoreferat dissertatsii... d-ra fiz.-mat. nauk* [Abstract of a Thesis of Doctor of Physics and Mathematics]: 01.04.03. Moscow, 2008. – 33 p.
9. *Ivanov D. V.* Optimal'nye polosy chastot slozhnykh signalov dlya dekametrovykh radiolinii [Optimal Frequency Bands of Complex Signals for Decameter Radio Lines]. *Radiotekhnika i elektronika* [Radio Engineering and Electronics]. 2006. Vol. 51. No 4. P. 389-396.
10. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova M. I., Sorokin N. A.* Iskazheniye slozhnykh dekametrovykh radiosignalov v dispersnykh ionosfernykh radiokanalakh pri kvazizenitnom rasprostraneni [The Distortion of Complex Decameter Radio Signals in Dispersive Ionospheric Radio Channels During their Quasi-zenithal Propagation]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 1. P. 43-53.
11. *Gonorovsky I. S.* Radiotekhnicheskie tsepi i signaly [Radio Engineering Circuits and Signals]. Moscow, Drofa, 2006. 720 p.
12. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Tsarev I. E.* Chislennyye i polunaturnyye issledovaniya funktsii rasseyaniya uzkopolosnykh dekametrovykh radiosignalov [Numerical and Seminaural Investigations of Narrowband Decameter Radio Signal Scattering Function]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2009. Vol. 14. No 8. P. 46-54.

13. Иванов, В.А. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными радиосигналами / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова // Вестник Мари́йского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 1. – С. 3-37.

14. Иванов, В.А. Зондирование ионосферных каналов высокочастотной связи с поверхности Земли / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, А.В. Мальцев, М.И. Рябова, И.Е. Царев // Вестник Мари́йского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2008. – № 1. – С. 3-20.

13. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V.* Zondirovanie ionosfery i dekametrovykh kanalov svyazi slozhnymi radiosignalami [The Sounding of the Ionosphere and Decameter Communication Channels by Complex Radio Signals]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 1. P. 3-37.

14. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Mal'tsev A. V., Ryabova M. I., Tsarev I. E.* Zondirovanie ionosfernnykh kanalov vysokochastotnoy svyazi s poverkhnosti Zemli [The Sounding of the Ionospheric Channels of High-frequency Communication from the Surface of the Earth]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2008. No 1. P. 3 - 20.

Статья поступила в редакцию 25.07.13.

ИВАНОВ Дмитрий Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – моделирование технических систем, широкополосные сигналы, распространение радиоволн. Автор более 100 публикаций.

E-mail: IvanovDV@volgatech.net

ИВАНОВ Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы. Автор более 250 публикаций.

E-mail: IvanovVA@volgatech.net

РЯБОВА Мария Игоревна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – моделирование технических систем, распространение радиоволн. Автор более 20 публикаций.

E-mail: RyabovaMI@volgatech.net

МИХЕЕВА Надежда Николаевна – аспирант, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – моделирование ионосферного распространения радиоволн в широкополосных радиоканалах. Автор 12 публикаций.

E-mail: miheevann@volgatech.net

КАТКОВ Евгений Вениаминович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры высшей математики, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн. Автор более 20 публикаций.

E-mail: KatkovEV@volgatech.net

IVANOV Dmitry Vladimirovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation Activity at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is the modeling of technical systems, wide-band signals and the propagation of radio waves. The author of more than 100 publications.

E-mail: IvanovDV@volgatech.net

IVANOV Vladimir Alexeevich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, the Head of the Chair of Higher Mathematics at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is the ionosphere, the propagation of radio waves, modeling and broadband signals. The author of more than 250 publications.

E-mail: IvanovVA@volgatech.net

RYABOVA Maria Igorevna – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Chair of Higher Mathematics at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is the modeling of technical systems, the propagation of radio waves. The author of more than 20 publications.

E-mail: RyabovaMI@volgatech.net

MIHEEVA Nadezhda Nikolaevna – a postgraduate student at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is the modeling of ionospheric radio wave propagation in broadband radio channels. The author of 12 publications.

E-mail: miheevann@volgatech.net

KATKOV Evgeny Veniaminovich – Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of the Chair of Higher Mathematics at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is the ionosphere, the propagation of radio waves. The author of more than 20 publications.

E-mail: KatkovEV@volgatech.net

D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, M. I. Ryabova, N. N. Miheeva, E. V. Katkov

BROADBAND SIGNAL DISTORTION IN THE IONOSPHERE, CAUSED BY NONLINEAR FREQUENCY DISPERSION

Key words: ionosphere; nonlinear frequency dispersion; distortion; impulse response; radio channel; spread-spectrum signal.

At present for modern high-frequency communication (HF) systems and over-the-horizon radiolocation, the problem of radio signal bandwidth expansion is urgent, that is directly connected with another scientific problem of dispersive distortion which was not studied to the end. The purpose of the work is the research on factors of nonlinearity and stochasticity of the dispersive characteristic and their influence on the distortion of broadband signals with different modulation formats considering their compression during the processing. The methods of the mathematical analysis and natural experiments are used. In theory the frequency dependence of the group delay and in the experiment the delay time of the maximum value of the narrow-band pulse envelope are taken for the dispersive characteristic.

It is shown that the problem of the propagation of an arbitrary spread-spectrum signal in the medium considering its compression in the receiver is reduced to the problem of propagation only in the medium of some equivalent signal. For broadband signals with LFM (SSB-C), pseudorandom operating frequency tuning (POFT) (SSB-FH), phase-coded modulation (PCM) (SSB-DS) the equivalent signal will have the common-mode phase-frequency characteristic and either homogeneous (in case of LFM and POFT) or Gaussian (in case of PCM) amplitude-frequency characteristic (AFC). In this connection the equivalent signal spectrum of the second type can be considered as the spectrum of the first type multiplied by Gaussian function. For the equivalent signal of the first type the spectrum of the received signal is proportional to the frequency response of a broadband radio signal. Therefore in this case the received equivalent signal will be proportional to radio channel pulse response. In the second case the equivalent signal is determined by the convolution integral of Gaussian function with radio channel impulse response. Thus, broadband signal distortion considering matched processing is determined by the distortion of channel impulse response.

The models of the components of frequency dispersion: linear and nonlinear regular, non-regular and stochastic are suggested. The stochastic model is a Gaussian process with the zero first moment, the nonregular model is a periodic function and the regular model is a second-degree polynomial.

The general problem solution of impulse response distortion (of broadband signals) for the channels with the nonlinear dispersion, described by incomplete Airy functions that with some values of distance characteristic parameters go to known solutions (without the dispersion and with the linear dispersion) is received. The well-known problem of the group delay for mediums with the dispersion is considered. The reasons for communication uncertainty of a phase-frequency characteristic derivative by frequency with the distorted by the dispersion signal are mathematically defined, that coincides with the envelope group delay only in the medium with the weak frequency dispersion and its meaning becomes undefined in dispersion mediums.

УДК 621.375

В. А. Бурдин, И. В. Григоров

ПРИМЕНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ФАЗОВЫХ ФИЛЬТРОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ УПЛОТНЕНИЕМ

Рассматривается многоканальный алгоритм электронной компенсации нелинейного взаимодействия сигналов в высокоскоростных волоконно-оптических системах передачи (ВОСП) со спектральным уплотнением (WDM-системах). Алгоритм основан на параллельной обработке сигналов N-спектральных каналов с помощью нелинейных фазовых фильтров (НФФ). Показано, что при такой обработке можно не только уменьшить искажения сигналов, обусловленные хроматической дисперсией, но и нелинейными эффектами, такими как фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая кросс-модуляция (ФКМ). Приводятся результаты моделирования и анализа эффективности алгоритма путем сравнения с известными по величине коэффициента ошибки.

Ключевые слова: волоконно-оптические системы передачи со спектральным уплотнением; хроматическая дисперсия; электронная компенсация дисперсии; фазовая самомодуляция; фазовая кросс-модуляция; нелинейное уравнение Шрёдингера; оператор с унитарной нелинейностью; нелинейный фазовый фильтр.

Введение. Современные оптические волокна (ОВ) обладают огромными потенциальными возможностями с точки зрения скорости передачи информации. Теоретический предел скорости передачи по одномодовым ОВ оценивается сотнями терабит в секунду, в то время как существующие системы обеспечивают скорости, измеряемые единицами терабит в секунду в расчете на одно ОВ. Для повышения коэффициента использования пропускной способности магистральных ВОСП применяется принцип волнового спектрального уплотнения («wavelength division multiplexing» – WDM).

В таких системах скорость передачи ограничивают не только затухание и дисперсия, но и нелинейные эффекты, в первую очередь такие, как фазовая самомодуляция (ФСМ) и фазовая кросс-модуляция (ФКМ) [1]. При этом характер

межсимвольной интерференции (МСИ) существенно усложняется, т.к. сигнал на выходе ОВ не является суммой откликов на каждый из входных сигналов. Это приводит к существенному увеличению вероятности ошибочного приема.

Процесс распространения сигнала одного спектрального канала по регулярно-му оптическому волокну может быть описан нелинейным уравнением Шрёдингера (НУШ) [1]:

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + d \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \tau^2} + i \alpha \Psi + \gamma |\Psi|^2 \Psi = 0, \quad (1)$$

где $\Psi = \Psi(\eta, \tau)$ – комплексная огибающая оптического импульса, η и τ – нормированные пространственная и временная координаты, $d = -\beta_2/2$ – дисперсионный коэффициент 2 порядка, β_2 – дисперсия групповых скоростей (ДГС), α –

коэффициент затухания, γ – параметр нелинейности ОБ.

Если затухание ОБ пренебрежимо мало, то последнее уравнение приобретает вид:

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + d \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \tau^2} + \gamma |\Psi|^2 \Psi = 0. \quad (2)$$

Нелинейный фазовый фильтр (НФФ) [2], упомянутый выше, является электрическим эквивалентом уравнения (2) и может использоваться для решения различных задач обработки сигналов и изображений [3–5]. Наиболее просто НФФ может быть реализован в цифровой форме. Этот способ реализации основан на методе расщепления по физическим факторам [1]. При этом фильтр представляется последовательностью нелинейных и линейных звеньев. Нелинейные имеют коэффициенты преобразования мгновенных значений по комплексной огибающей

$$H(\Psi) = \exp(i \gamma \Delta \eta |\Psi|^2), \quad (3)$$

а линейные описываются импульсной характеристикой

$$g(\tau) = g_0 \exp\left(i \frac{a \tau^2}{2}\right) \quad (4)$$

или соответствующей передаточной функцией

$$G(i\omega) = \exp(-i d \Delta \eta \omega^2). \quad (5)$$

В этих выражениях

$$a = \frac{1}{2d\Delta\eta}, \quad (6)$$

$$g_0 = \frac{1}{\sqrt{4\pi d\Delta\eta}} \exp\left(i \frac{3\pi}{4}\right). \quad (7)$$

Для физической реализуемости линейного звена его импульсную характеристику необходимо ограничить с помощью окна и ввести параметр задержки. В этом случае (7) примет вид:

$$g(t) = g_0(t) \exp\left(\frac{i a (t - t_0)^2}{2}\right), \quad (8)$$

здесь $g_0(t)$ – функция окна, а t_0 – за-

держка. В качестве $g_0(t)$ можно использовать окно Гаусса, Ханна и др.

Уравнение (2) хорошо изучено в теории солитонов [6]. Оно порождает оператор $\mathbf{F}$ с унитарной нелинейностью [7], т.е. нелинейный оператор, для которого существует обратный $\mathbf{F}^{-1}$, являющийся комплексно-сопряженным с исходным. Соответствующее уравнение имеет вид:

$$-i \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + d \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \tau^2} + \gamma |\Psi|^2 \Psi = 0. \quad (9)$$

При его реализации также можно использовать аналогичные линейные и нелинейные звенья с характеристиками, сопряженными с (3), (4), (5) и (7), расположив их в обратном порядке. Очевидно, что произведение операторов $\mathbf{F}$ и $\mathbf{F}^{-1}$ даст единичный оператор, поэтому с помощью такого фильтра, который можно назвать обратным (ОНФФ) или восстанавливающим (ВНФФ), можно восстановить сигнал, прошедший ОБ, описываемое уравнением (2).

Оператор $\mathbf{F}$, соответствующий (1), не является оператором с унитарной нелинейностью. Несмотря на это, звенья ВНФФ для него можно легко реализовать. Их характеристики имеют вид:

$$H^{-1}(\Psi) = H^*(\Psi) = \exp(-i \gamma \Delta \eta |\Psi|^2) \exp(\alpha \Delta \eta), \quad (10)$$

$$g^*(\tau) = g_0^* \exp\left(-i \frac{a \tau^2}{2}\right), \quad (11)$$

$$G^*(i\omega) = \exp(i d \Delta \eta \omega^2). \quad (12)$$

Математическая модель (2) является упрощенной и не учитывает особенностей реальных ВОЛП. Модель (1) является более общей, но также достаточно идеализирована. Наиболее общей моделью одноканальной ВОЛП является обобщенное НУШ (ОНУШ):

$$i \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} + d(\eta) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \tau^2} + \gamma(\eta) |\Psi|^2 \Psi + i \Gamma(\eta) \Psi = 0, \quad (13)$$

где

$$d(\eta) = -\frac{\beta_2(\eta)}{2} \text{ и } \gamma(\eta) \quad (14)$$

– соответственно дисперсионный параметр и параметр нелинейности, зависящие, в общем случае, от продольной координаты η (эта зависимость имеет место в ВОЛП, если в ней применяются ОВ разных типов).

$$\Gamma(\eta) = \alpha(\eta) + B(\eta) \quad (15)$$

– функция, описывающая изменение вдоль ОВ параметров затухания и усиления; зависимость затухания $\alpha = \alpha(\eta)$ также появляется при использовании разнотипных ОВ, вторая составляющая $B = B(\eta)$ имеет место при любом типе усиления, как сосредоточенного, так и распределенного.

Нетрудно показать, что уравнению (13) соответствует многозвенный НФФ, звенья которого описываются выражениями, зависящими от продольной координаты η (при цифровой реализации НФФ необходимо в последующих выражениях использовать процедуру дискретизации его характеристик не только по временной переменной τ , но и по пространственной, заменяя η на $\eta_n = n\Delta\eta$):

$$G(i\omega, \eta) = \exp(-i\omega^2 d(\eta)\Delta\eta), \quad (16)$$

$$g(\eta, \tau) = g_0(\eta) \exp\left(i\frac{a(\eta)\tau^2}{2}\right), \quad (17)$$

$$g_0(\eta) = \frac{1}{\sqrt{4\pi d(\eta)\Delta\eta}} \exp\left(i\frac{3\pi}{4}\right), \quad (18)$$

$$H(\Psi, \eta) = \exp\left\{i\gamma(\eta)|\Psi(\eta, \tau)|^2\Delta\eta\right\} \times \exp\{-\Gamma(\eta)\Delta\eta\}. \quad (19)$$

Характеристики звеньев соответствующего ВНФФ определяются выражениями:

$$G^{-1}(i\omega, \eta) = G^*(i\omega, \eta) = \exp(i\omega^2 d(\eta)\Delta\eta), \quad (20)$$

$$g^{-1}(\eta, \tau) = g^*(\eta, \tau) = g_0^*(\eta) \exp\left(-i\frac{a(\eta)\tau^2}{2}\right), \quad (21)$$

$$g_0^*(\eta) = \frac{1}{\sqrt{4\pi d(\eta)\Delta\eta}} \exp\left(-i\frac{3\pi}{4}\right), \quad (22)$$

$$H^{-1}(\Psi, \eta) = \exp\left\{(-i\gamma(\eta)|\Psi(\eta, \tau)|^2)\Delta\eta\right\} \times \exp\{\Gamma(\eta)\Delta\eta\}. \quad (23)$$

Целью данной работы является исследование возможности использования ВНФФ для компенсации дисперсионных искажений оптических сигналов на электрическом уровне при наличии нелинейных искажений, вызванных ФСМ и ФКМ.

Компенсация нелинейного взаимодействия оптических сигналов в одноканальной ВОЛП с помощью многозвенных НФФ. Как было сказано выше, ВНФФ, звенья которого описываются выражениями (16) – (19), можно применить для компенсации дисперсионных искажений и нелинейных эффектов, таких как ФСМ. Для этого ВНФФ, реализованный в цифровой форме, необходимо включить между приемным оптическим модулем и демодулятором – рис. 1.

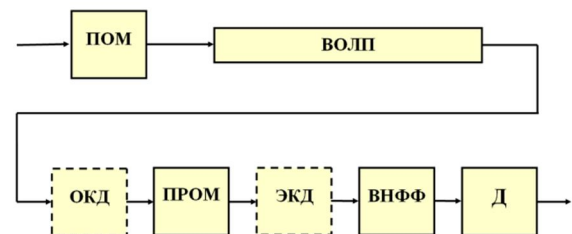


Рис. 1

Описанный алгоритм последетекторной обработки сигналов был смоделирован на основе математического пакета «Matlab». Он рассматривался в сочетании с распространенным линейным методом компенсации хроматической дисперсии на основе волокна, компенсирующего дисперсию («dispersion compensating fiber» – DCF). Моделируемая волоконно-оптическая линия передачи состояла из одного усилительного участка, построенного на основе стандартного одномодового волокна SMF («single mode fiber»), как при отсутствии, так и при наличии оптического компенсатора дисперсии. На вы-

ходе усилительного участка моделируемой ВОЛП располагался усилитель с сосредоточенными параметрами (например, эрбиевого типа) с идеальными характеристиками, компенсирующий затухание на этом участке.

Параметры моделируемой одноканальной ВОЛП и ее элементов задавались следующими:

- длина ВОЛП: 120 км;
- строительная длина ОВ: 4 км;
- скорость передачи: 10 Гбит/с;
- параметры передающего оптического модуля:
- уровень средней мощности: $p_0=0$ дБ;
- длина волны несущей $\lambda_0=1550$ нм ;
- вид модуляции: модуляция интенсивности;
- линейный код: с возвратом к нулю (NRZ);
- коэффициент гашения мощности: 30 дБ;
- параметры волокон SMF:
- километрический коэффициент затухания: $\alpha = 0,22$ дБ/км ;
- коэффициент хроматической дисперсии: $D = 18$ пс/(нм·км) ;
- дисперсия групповых скоростей: $\beta_2 = -20$ пс²/км = $-2 \cdot 10^{-26}$ с²/м ;
- параметр нелинейности: $\gamma = 3$ Вт⁻¹·км⁻¹ = $3 \cdot 10^{-3}$ Вт⁻¹·м⁻¹ ;
- параметры волокон DCF:
- километрический коэффициент затухания: $\alpha = 0,42$ дБ/км ;
- коэффициент хроматической дисперсии: $D = -100$ пс/(нм·км) ;
- дисперсия групповых скоростей: $\beta_2 = 110$ пс²/км = $11 \cdot 10^{-26}$ с²/м ;
- параметр нелинейности: $\gamma = 11$ Вт⁻¹·км⁻¹ = $11 \cdot 10^{-3}$ Вт⁻¹·м⁻¹ .

Некоторые результаты моделирования одноканальной ВОЛП представлены на рис. 2 – 6. На рис. 2 показана огибающая сигнала на входе ВОЛП, соответ-

ствующая передаваемой двоичной комбинации «101»; каждой единице соответствует гауссовский импульс, нулю – постоянный уровень излучений, величина которого определяется коэффициентом гашения источника (30 дБ).

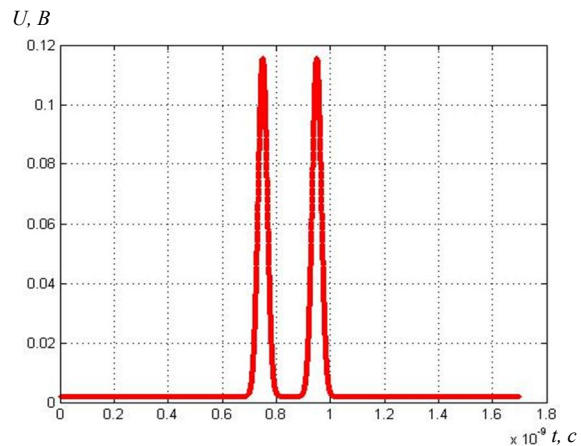


Рис.2

На рис. 3 представлена огибающая сигнала, прошедшего линию без компенсатора дисперсии при наличии достаточно сильного шума (отношение средних мощностей сигнала и шума составляет 20 дБ). Из-за дисперсии, ФСМ и шума этот сигнал сильно отличается от переданного.

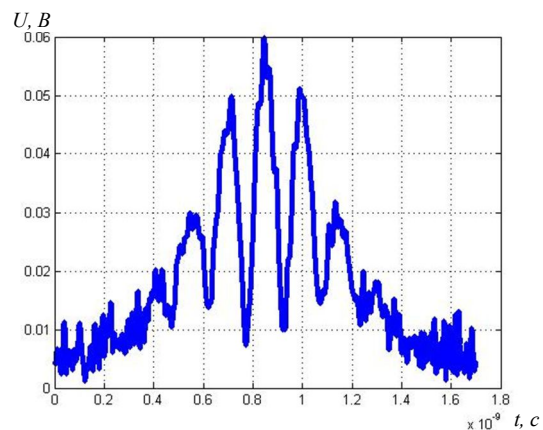


Рис.3

На рис. 4 изображена огибающая сигнала, восстановленного с помощью ВНФФ. Очевидно, что последний достаточно хорошо восстанавливает форму сигнала даже при наличии сильного шума.

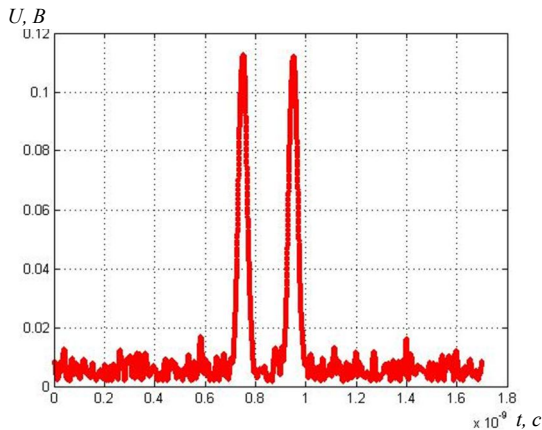


Рис.4

На рис. 5 и 6 показаны соответственно диаграммы огибающих сигналов с шумом на выходе линии, содержащей компенсатор хроматической дисперсии, и на выходе ВНФФ.

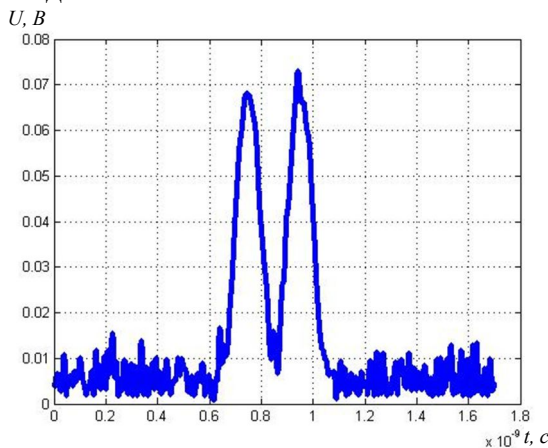


Рис.5

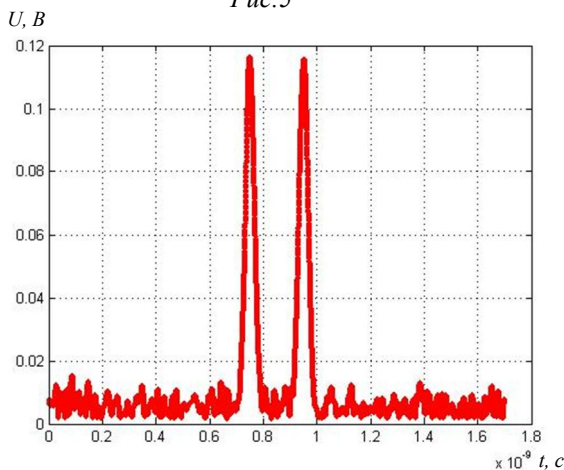


Рис.6

Из диаграмм видно, что компенсатор существенно уменьшает линейные искажения сигнала, а ВНФФ уменьшает остаточные искажения, обусловленные ФСМ.

Применение НФФ в системах со спектральным уплотнением. Как было указано выше, ОНУШ (13) описывает преобразования сигналов в одноканальных ВОЛП, поэтому рассмотренная обработка сигналов с помощью ВНФФ может применяться только на линиях относительно небольшой протяженности, в которых используется одна оптическая несущая. Практически все современные магистральные ВОЛП являются многоканальными, в которых используется принцип волнового спектрального уплотнения – WDM-системы («Wavelength division multiplexing»). В отличие от одноканальных, в них, наряду с ФСМ, заметно проявляется фазовая кросс-модуляция, обусловленная нелинейным взаимодействием сигналов отдельных спектральных каналов. При этом ФКМ приблизительно в два раза превосходит по своему действию ФСМ [1], поэтому за счет ФКМ нелинейное взаимодействие сигналов существенно усиливается. Рассмотрим возможность создания НФФ и ВНФФ для таких систем.

Как указано в [8], процесс распространения по регулярному оптическому волокну N взаимосвязанных ортогональных мод может быть описан системой нелинейных уравнений шрёдингеровского типа:

$$i \frac{\partial \Psi_m}{\partial \eta} + i \gamma_m \frac{\partial \Psi_m}{\partial \tau} + \alpha_m \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial \tau^2} + i \beta_m \Psi_m + \sum_{l=1}^N \kappa_{ml} |\Psi_l|^2 \Psi_m = 0, \quad (24)$$

$$(m = 1, 2 \dots N),$$

здесь $\alpha_m, \beta_m, \gamma_m, \kappa_{ml}$ – нормированные параметры, характеризующие соответственно дисперсию, затухание, относительную скорость взаимного смещения и нелинейность по каждой моде. Перепишем эту систему, используя обозначения, введенные выше и принятые в [1]; при этом учтем зависимость параметров затухания, дисперсии и нелинейности от продольной координаты по аналогии с (13):

$$i \frac{\partial \Psi_m}{\partial \eta} + i \beta_{1m}(\eta) \frac{\partial \Psi_m}{\partial \tau} + d_m(\eta) \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial \tau^2} + \\ + i \Gamma_m(\eta) \Psi_m + \sum_{k=1}^N \gamma_{mk}(\eta) |\Psi_k|^2 \Psi_m = 0, \quad (25) \\ (m = 1, 2 \dots N).$$

Каждое из уравнений (25), так же как и ОНУШ (13), порождает нелинейный оператор, не обладающий свойством унитарности. Несмотря на это, характеристики звеньев НФФ и ВНФФ, предназначенных для обработки сигнала m -го спектрального канала, можно получить аналогично преобразованиям, использованным выше для уравнения (13).

Характеристики преобразования мгновенных значений для нелинейных звеньев могут быть получены тривиально из (19) и (23):

$$H(\Psi_m, \eta) = \\ = \exp \left\{ i \left(\sum_{k=1}^N \gamma_{mk}(\eta) |\Psi_k|^2 \Psi_m \right) \Delta \eta \right\} \times \\ \times \exp \{ -\Gamma_m(\eta) \Delta \eta \}, \quad (26)$$

$$H^{-1}(\Psi_m, \eta) = \\ = \exp \left\{ -i \left(\sum_{k=1}^N \gamma_{mk}(\eta) |\Psi_k|^2 \Psi_m \right) \Delta \eta \right\} \times \\ \times \exp \{ \Gamma_m(\eta) \Delta \eta \}. \quad (27)$$

Передаточные функции и импульсные характеристики линейных звеньев необходимо вывести заново, что обусловлено отличием уравнений (25) от (13) из-за вторых членов, содержащих первые производные функций $\Psi_m(\eta, \tau)$ по времени, характеризующих различие групповых скоростей мод спектральных каналов. Запишем линейную часть (25), описывающую только дисперсию, и вычислим преобразование Фурье левой и правой частей:

$$i \frac{\partial \Psi_m}{\partial \eta} = -i \beta_{1m}(\eta) \frac{\partial \Psi_m}{\partial \tau} - d_m(\eta) \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial \tau^2} \quad (28)$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} i \frac{\partial \Psi_m}{\partial \eta} \exp(-i\omega\tau) d\tau = \\ = i \frac{d}{d\eta} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_m(\eta, \tau) \exp(-i\omega\tau) d\tau = \quad (29) \\ = i \frac{d\tilde{\Psi}_m(\eta, i\omega)}{d\eta};$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left(-i \beta_{1m}(\eta) \frac{\partial \Psi_m}{\partial \tau} - d_m(\eta) \frac{\partial^2 \Psi_m}{\partial \tau^2} \right) \times \\ \times \exp(-i\omega\tau) d\tau = (\beta_{1m}(\eta) \omega + \\ + d_m(\eta) \omega^2) \tilde{\Psi}_m(\eta, i\omega). \quad (30)$$

Подставляя (29) и (30) в (28), получим:

$$\frac{\partial \tilde{\Psi}_m}{\partial \eta} = -i (\beta_{1m}(\eta) \omega + d_m(\eta) \omega^2) \tilde{\Psi}_m, \quad (31)$$

$$\frac{\partial \tilde{\Psi}_m}{\partial \eta} = -i (\beta_{1m}(\eta) \omega + d_m(\eta) \omega^2) \tilde{\Psi}_m. \quad (32)$$

Интегрируя левую и правую части (32) на интервале $(\eta, \eta + \Delta\eta)$, получим:

$$\ln \left(\frac{\tilde{\Psi}_m(\eta + \Delta\eta, \tau)}{\tilde{\Psi}_m(\eta, \tau)} \right) = \\ = -i \int_{\eta}^{\eta + \Delta\eta} (\beta_{1m}(\eta) \omega + d_m(\eta) \omega^2) d\eta \approx \\ \approx -i (\beta_{1m}(\eta) \omega + d_m(\eta) \omega^2) \Delta\eta. \quad (33)$$

Окончательно искомая передаточная функция ЛЗ для НФФ определится выражением:

$$G(i\omega, \eta) = \frac{\tilde{\Psi}_m(\eta + \Delta\eta, \tau)}{\tilde{\Psi}_m(\eta, \tau)} = \quad (34)$$

$$= \exp \left(-i (\beta_{1m}(\eta) \omega + d_m(\eta) \omega^2) \Delta\eta \right),$$

а для ВНФФ:

$$G^{-1}(i\omega, \eta) = G^*(i\omega, \eta) = \\ = \exp \left(i (\beta_{1m}(\eta) \omega + d_m(\eta) \omega^2) \Delta\eta \right). \quad (35)$$

Нетрудно показать, что импульсные характеристики линейных звеньев с передаточными функциями (34) и (35) имеют вид:

$$g(\tau, \eta) = g_0(\eta) \exp \left(i \frac{(\tau - \beta_{1m}(\eta) \Delta\eta)^2}{4d_m(\eta) \Delta\eta} \right), \quad (36)$$

$$g^*(\tau, \eta) = g_0^*(\eta) \exp \left(-i \frac{(\tau - \beta_{1m}(\eta) \Delta \eta)^2}{4d_m(\eta) \Delta \eta} \right), \quad (37)$$

где

$$g_0(\eta) = \frac{1}{\sqrt{4\pi d_m(\eta) \Delta \eta i}} = \frac{1}{\sqrt{4\pi d_m(\eta) \Delta \eta}} \exp \left(i \frac{3\pi}{4} \right). \quad (38)$$

$$g_0^*(\eta) = \frac{1}{\sqrt{4\pi d_m(\eta) \Delta \eta}} \exp \left(-i \frac{3\pi}{4} \right). \quad (39)$$

Полученные формулы аналогичны по виду (17), (18), (21) и (22). Отличие состоит в наличии в показателях экспонент выражений (36) и (37) членов $\beta_{1m}(\eta) \Delta \eta$, вычитаемых из временной переменной τ . Они приводят к появлению дополнительных сдвигов по времени импульсных характеристик фильтров, предназначенных для обработки разных спектральных каналов, относительно друг друга.

Необходимо отметить, что в высокоскоростных ВОЛП, со скоростями передачи, превышающими 40 Гбит/с в расчете на одну оптическую несущую, в НУШ необходимо учитывать дисперсионные члены высших порядков (особенно, если сигнал передается на несущей, длина волны которой лежит вблизи точки нулевой хроматической дисперсии). В этом случае (25) перейдет в систему вида [2]:

$$\begin{aligned} i \frac{\partial \Psi_m}{\partial \eta} + i \beta_{1m}(\eta) \frac{\partial \Psi_m}{\partial \tau} + \\ + \sum_{r=2}^R (-i)^r d_{rm}(\eta) \frac{\partial^r \Psi_m}{\partial \tau^r} + \\ + i \Gamma_m(\eta) \Psi_m + \sum_{k=1}^N \gamma_{mk}(\eta) |\Psi_k|^2 \Psi_m = 0, \\ (m = 1, 2 \dots N) \end{aligned} \quad (40)$$

здесь R – наивысший порядок дисперсионного члена. Обычно для реальных систем достаточно учесть только члены второго и третьего порядков. Несмотря на это, рассмотрим аналогичную задачу для произвольного R .

Характеристики преобразования мгновенных значений для нелинейных звеньев не изменятся и определяются выражениями (26) и (27). При этом передаточные функции линейных звеньев НФФ и ВНФФ определяются следующим образом:

$$G(i\omega, \eta) = \exp \left(-i \left(\beta_{1m}(\eta) \omega - \sum_{r=2}^R d_{rm}(\eta) \omega^r \right) \Delta \eta \right), \quad (41)$$

$$G^{-1}(i\omega, \eta) = G^*(i\omega, \eta) = \exp \left(i \left(\beta_{1m}(\eta) \omega - \sum_{r=2}^R d_{rm}(\eta) \omega^r \right) \Delta \eta \right). \quad (42)$$

Импульсные характеристики звеньев с этими передаточными функциями аналитически вычисляются достаточно сложно, поэтому при реализации НФФ и ВНФФ можно использовать непосредственно выражения (41) и (42) или найти импульсные характеристики численно.

Результаты моделирования алгоритмов компенсации нелинейного взаимодействия оптических сигналов в WDM-системах. Рассмотренный многоканальный алгоритм обработки сигналов был смоделирован аналогично рассмотренному выше. В отличие от него моделировалась двухканальная в WDM-система. При этом рассматривались два значения длины линии – 120 и 600 км. Уровень средней мощности входного сигнала также изменялся от 0 до 6 дБ. Один из спектральных каналов, работающий на оптической несущей с длиной волны $\lambda_0 = 1550$ нм, рассматривался как основной, а второй, использующий $\lambda = 1530$ нм, условно считался «мешающим». Для оценки помехоустойчивости алгоритмов приема по величине коэффициента ошибки BER использовалась его оценка через Q -фактор [9]. На рисунках 7 – 11 приведены некоторые качественные результаты моделирования.

На рис. 7 показана огибающая сигнала на входе ВОЛП, аналогичная рассмотренной при моделировании одноканальной ВОЛП.

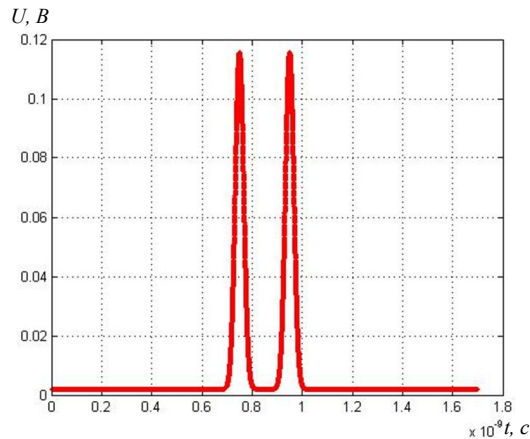


Рис. 7

На рис. 8 приведена диаграмма отклика линии без оптического компенсатора. Очевидно, что за счет ФКМ искажения сигнала существенно возросли (по сравнению с рис. 3).

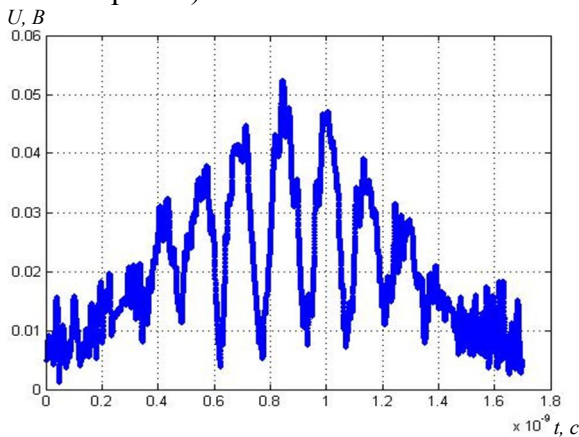


Рис. 8

Несмотря на это, ВНФФ хорошо восстанавливает форму сигнала на фоне сильного шума (отношение сигнал-шум также составляет 20 дБ) – рис. 9.

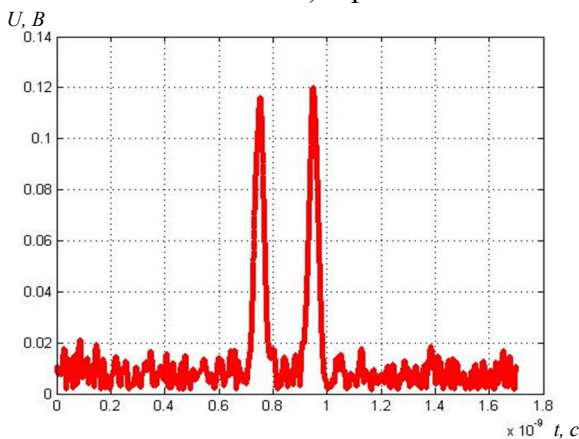


Рис. 9

На рис. 10 и 11 приведены аналогичные временные диаграммы сигналов при наличии в линии компенсатора дисперсии. Очевидно, что компенсатор, так же как и в одноканальной ВОСП, уменьшает линейные искажения сигнала, а ВНФФ уменьшает остаточные искажения, обусловленные ФСМ и ФКМ.

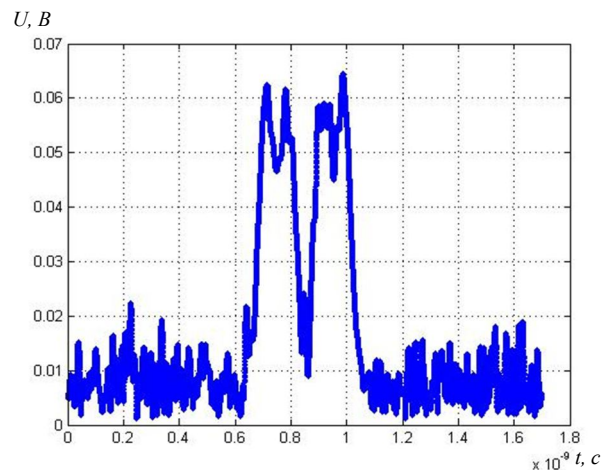


Рис. 10

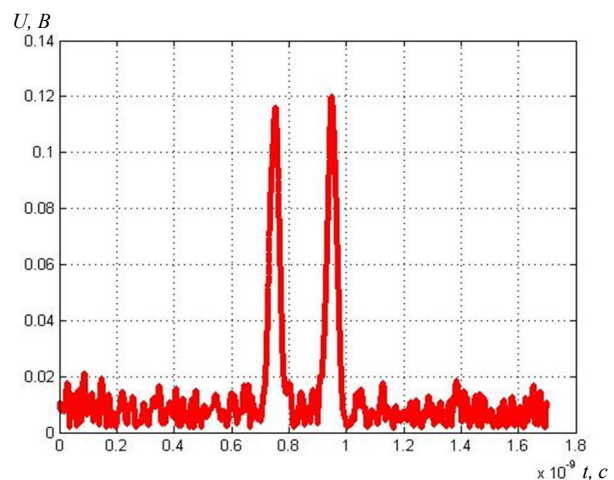


Рис. 11

Результаты статистического моделирования приведены на рис. 12 – 15. На рис. 12 показаны зависимости коэффициента ошибки BER («bit error ratio») в логарифмическом масштабе от отношения сигнал-шум SNR («signal to noise ratio») в линии длиной 120 км без компенсатора дисперсии для одноотсчетного алгоритма приема без ВНФФ (кривая 1) и при его наличии на входе демодулятора (кривая 2). При этом задавался уровень входного сигнала $p_0 = 0$ дБ.

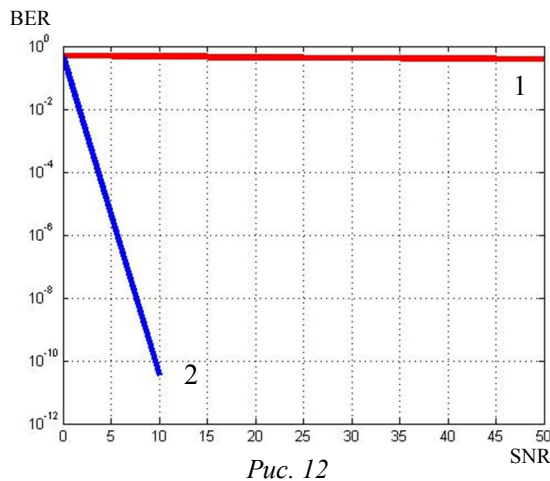


Рис. 12

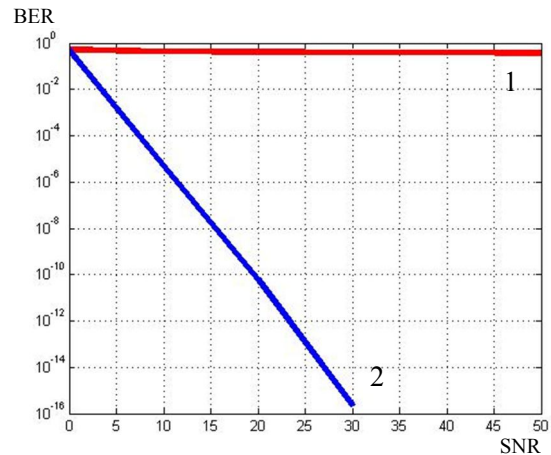


Рис. 15

На рис. 13 приведены аналогичные зависимости при наличии в линии оптического компенсатора хроматической дисперсии, а на рис. 14 представлены аналогичные кривые для повышенного уровня входного сигнала ($p_0 = +6$ дБ). На рис. 15 представлены кривые для ВОЛП длиной 600 км (при этом задавался $p_0 = +3$ дБ).

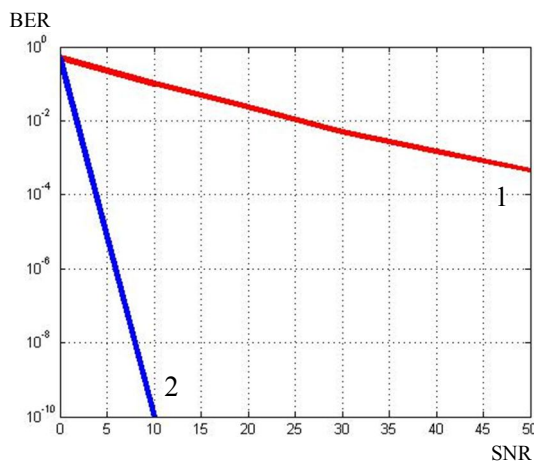


Рис. 13

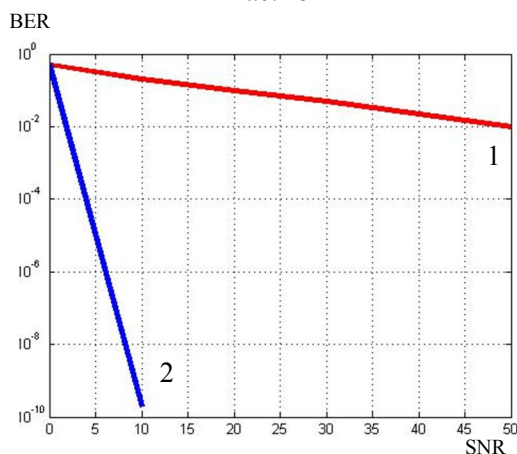


Рис. 14

Выводы. Из полученных результатов статистического моделирования можно сделать следующие выводы:

1) при отсутствии компенсатора дисперсии в линии относительно небольшой протяженности (120 км) одноотсчетный алгоритм приема практически не работает даже при больших отношениях сигнал-шум, что обусловлено дисперсией и нелинейными эффектами (ФСМ и ФКМ);

2) ВНФФ в этой ситуации обеспечивает хорошее восстановление сигнала и, как следствие, приемлемое качество приема;

3) включение на выходе линии компенсатора дисперсии существенно повышает качество приема при использовании одноотсчетного алгоритма, но использование ВНФФ совместно с компенсатором также достаточно эффективно (энергетический выигрыш от его применения составляет примерно 12 – 13 дБ). При увеличении уровня входного сигнала до +6 дБ этот выигрыш возрастает до 14 – 15 дБ, что обусловлено эффективной компенсацией ФСМ и ФКМ с помощью ВНФФ;

4) при увеличении длины линии эффект от применения ВНФФ возрастает, особенно при большом уровне входного сигнала.

В заключение хотелось бы отметить, что в настоящее время вместо оптических компенсаторов дисперсии (в частности, построенных с использованием волокон DCF) успешно применяются электронные компенсаторы, построенные на базе быст-

родействующих цифровых фильтров [10]. Рассмотренный алгоритм компенсации нелинейного взаимодействия оптических

сигналов с применением НФФ также можно успешно применить совместно с компенсаторами такого типа.

Список литературы

1. Агравал, Г. Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал. – М.: Мир, 1996. – 328 с.
2. Григоров, И.В. Применение теории нелинейных волновых процессов в радиотехнике и телекоммуникациях / И.В. Григоров, С.М. Широков – М.: Радио и связь, 2006. – 351 с.
3. Григоров, И. В. Адаптация нелинейных фазовых фильтров к форме огибающей сигнала при компенсации дисперсии в волоконно-оптических линиях передачи / И. В. Григоров // Инфокоммуникационные технологии. – 2006. – № 2. – С. 43-48.
4. Бурдин, А.В. Сравнительный анализ алгоритмов электронной компенсации дисперсии оптических сигналов / А.В. Бурдин, И.В. Григоров, Е.Л. Цвейбельман // Инфокоммуникационные технологии. – 2012. – Т. 10. – № 3. – С. 34 – 37.
5. Широков, С.М. Метод подавления импульсных помех при обработке сигналов и изображений / С.М. Широков, И.В. Григоров // Компьютерная оптика. – 1996. – Вып. 16. – С. 97-102.
6. Абловиц, М. Солитоны и метод обратной задачи / М. Абловиц, Х. Сигур. – М.: Мир, 1987. – 479 с.
7. Маслов, В.П. Комплексные марковские цепи и континуальный интеграл Фейнмана / В.П. Маслов. – М.: Наука, 1976. – 192 с.
8. Широков, С.М. Приближенные параметрические модели динамики самовоздействия импульсов в нелинейных оптических средах с модовой дисперсией / С. М. Широков // Компьютерная оптика. – 1995. – Вып. 14-15. – Ч. 2. – С.117-125.
9. Штырина, О.В. Исследование волоконно-оптических линий связи с оптической регенерацией сигналов / О.В. Штырина, С.К. Турицын, М.П. Федорук // Квантовая электроника. – 2005. – Т. 35. – № 2. – С.169-174.
10. Le Nguyen Binh. Optical Fiber Communications Systems: Theory and Practice with MATLAB® and Simulink® Models (Optics and Photonics). CRC Press, 2010, 560 p.

References

1. Agraval G. Nelineinaya volokonnaya optika [Nonlinear Fiber Optics]. Moscow, Mir, 1996. 328 p.
2. Grigorov I. V., Shirokov S. M. Primenenie teorii nelineinykh volnovykh protsessov v radiotekhnike i telekommunikatsiyakh [Application of the Theory of Nonlinear Wave Processes in Radio Engineering and Telecommunication]. Moscow, Radio i svyaz', 2006. 351 p.
3. Grigorov I. V. Adaptatsiya nelineinykh fazovykh filtrov k forme ogibayushchei signala pri kompensatsii dispersii v volokonno-opticheskikh liniyakh peredachi [Adaptation of Nonlinear Phase Filters to the Form of Signal Envelope at the Compensation of Dispersion in Fiber-optic Transmission Lines]. Infokommunikatsionnye tekhnologii [Infocommunication Technologies]. 2006. No 2. P. 43-48.
4. Burdin A. V., Grigorov I. V., Tsveibel'man E. L. Sravnitelnyi analiz algoritmov elektronnoi kompensatsii dispersii opticheskikh signalov [Comparative Analysis of Algorithms of Electronic Compensation of Optical Signal Dispersion]. Infokommunikatsionnye tekhnologii [Infocommunication Technologies]. 2012. Vol. 10. No 3. P. 34-37.
5. Shirokov S. M., Grigorov I. V. Metod podavleniya impul'snykh pomekh pri obrabotke signalov i izobrazheniy [The Method of Impulse Noise Suppression when Processing Signals and Images]. Komp'yuternaya optika [Computer Optics]. 1996. Issue 16. P. 97-102.
6. Ablovits M., Sigur H. Solitony i metod obratnoi zadachi [Solitons and Inverse Problem Method]. Moscow, Mir, 1987. 479 p.
7. Maslov V. P. Kompleksnye markovskie tsepi i kontinual'nyi integral Feinmana [Complex Markov Chains and Continual Feynman Integral]. Moscow, Nauka, 1976. 192 p.
8. Shirokov S. M. Priblizhennyye parametricheskie modeli dinamiki vzaimodeistviya impulsov v nelineinykh opticheskikh sredakh s modovoi dispersiei [Approximate Parameter-oriented Models of Impulse Self-interaction Dynamics in Nonlinear Optical Mediums with Mode Dispersion]. Komp'yuternaya optika [Computer Optics]. 1995. Issue 14-15, part 2. P.117-125.
9. Shtyrina O. V., Turitsyn S. K., Fedoruk M. P. Issledovanie volokonno-opticheskikh liniy svyazi s opticheskoi regeneratsiei signalov [The Research on Fiber-optic Communication Lines with Optical Regeneration of Signals]. Kvantovaya elektronika [Quantum Electronics]. 2005. Vol. 35. No 2. P. 169-174.
10. Le Nguyen Binh. Optical Fiber Communications Systems: Theory and Practice with MATLAB® and Simulink® Models (Optics and Photonics). CRC Press, 2010, 560 p.

Статья поступила в редакцию 16.08.13.

БУРДИН Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор, проректор по науке и инновациям, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Российская Федерация, Самара). Область научных интересов – эффективные технологии строительства и технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений оптических сетей связи, в том числе «управление» дисперсией, контроль состояния оптических волокон. Автор 155 публикаций.

E-mail: burdin@psati.ru

ГРИГОРОВ Игорь Вячеславович – кандидат технических наук, доцент кафедры теоретических основ радиотехники и связи, декан факультета заочного обучения, Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики (Российская Федерация, Самара). Область научных интересов – нелинейная обработка сигналов с применением теории нелинейных волновых процессов. Автор 83 публикаций.

E-mail: igor_grogorov@mail.ru

BURDIN Vladimir Aleksandrovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, Vice-Rector for Research and Innovation at Volga State University of Telecommunications and Informatics (Russian Federation, Samara). The sphere of scientific interests is effective technologies of building and technical exploitation of linear cable constructions of optical communication networks, including dispersion «control» and optical fiber condition control. The author of 155 publications.

E-mail: burdin@psati.ru

GRIGOROV Igor Vyacheslavovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair of Radio Engineering and Communication Theory, the Head of the Postal Tuition Faculty at Volga State University of Telecommunications and Informatics (The Russian Federation, Samara). The sphere of scientific interests is nonlinear signal processing with the application of the theory of nonlinear wave processes. The author of 83 publications.

E-mail: igor_grogorov@mail.ru

V. A. Burdin, I. V. Grigorov

APPLICATION OF NONLINEAR PHASE FILTERS IN HIGH-SPEED, FIBRE-OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS WITH THE SPECTRAL MULTIPLEX

Key words: *fibre-optical transmission systems with the spectral multiplex; chromatic dispersion; electronic dispersion compensation; self-phase modulation; phase cross modulation; nonlinear Schrödinger equation; operator with unitary nonlinearity; nonlinear phase filter.*

The problems of the application of nonlinear phase filters for the electronic compensation of nonlinear signal interaction in high-speed, fibre-optical transmission systems are discussed in the article. The signal interaction in such systems is determined by the combined action of chromatic dispersion and self-phase modulation. If a transmission system is multichannel and it uses several optical carriers then besides the self-phase modulation, phase cross modulation has a considerable influence on signal transmission.

Nonlinear phase filters are electronic equivalent of a generalized nonlinear Schrödinger equation, describing the process of signal propagation in optical fiber. An operator describing such a filter refers to the operator class with unitary nonlinearity for which there is an inverse filter complex conjugate with the initial one. Corresponding inverse filter realized by analogy in a digital form can be used for the restoration of signals, passing a transmission line with the aim of the decrease of the influence of specified dispersive and nonlinear effects both in single-channel and multichannel transmission systems.

The results of modeling and the analysis of the noise immunity of signal reception with the application of the considered algorithm are presented. It is shown that this algorithm gives the considerable gain (several decibels) both in single-channel and multichannel transmission systems in comparison with the well-known linear method of dispersion compensation using optical fiber, compensating the dispersion.

УДК 621.396

Н. С. Хохлов, А. В. Сидоров

ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ РАДИОСВЯЗИ И УПРАВЛЕНИЯ К ДЕСТРУКТИВНЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ВОЗДЕЙСТВИЯМ

Дана характеристика системы радиосвязи и управления (СРСиУ) органов внутренних дел, рассмотрены каналы деструктивного воздействия сверхкоротких импульсов электромагнитного излучения (СКИ ЭМИ) на СРСиУ, разработана модель деструктивного воздействия СКИ ЭМИ, предложена методика оценки соответствия сети связи заданным требованиям обеспечения устойчивости ее функционирования.

Ключевые слова: система радиосвязи и управления; деструктивное электромагнитное воздействие; устойчивость; сверхкороткие импульсы; модель воздействия; методика оценки; электромагнитная совместимость; теория графов.

Введение. Системы радиосвязи и управления органов внутренних дел (СРСиУ ОВД) являются основным видом связи со стационарными и подвижными объектами, а в ряде случаев единственным видом связи, обеспечивающим управление органами и подразделениями внутренних дел при осложнении оперативной обстановки и ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. Использование радиосвязи позволяет в короткие сроки сконцентрировать в нужном месте необходимое количество оперативных сил и средств для проведения мероприятий, согласовать по месту и времени их действия и осуществлять единое руководство ими [1].

Исходя из вышесказанного, современная СРСиУ ОВД, со всеми её цифровыми функциями и возможностями (групповой, индивидуальный вызовы, передача коротких текстовых сообщений, телеметрии, постоянный контроль радиоканала, регистрация абонентов в сети и т.д.), не может полноценно функционировать без системы управления. Например, в базовой станции СРСиУ основным элементом

управления является контроллер, который управляет работой базовой станции, коммутирует каналы ретрансляторов (осуществляет соединение, разъединение, постановку в очередь абонентов), обеспечивает выход на телефонную сеть общего пользования или другую сеть фиксированной связи и др.

Поэтому в современных условиях необходимо рассматривать СРСиУ как единый механизм, который представляет собой сложный программно-аппаратный комплекс, состоящий из цифровых радиоэлектронных устройств, подверженных электромагнитному воздействию.

СРСиУ должна обеспечивать:

- минимальное время установления связи;
- возможность установления и вхождения в связь;
- возможность разделения абонентов на группы и организации групповой связи с неограниченным числом абонентов;
- возможность индивидуального вызова;
- устойчивую радиосвязь на больших расстояниях;

- возможность осуществления прямого режима связи между абонентскими радиостанциями;
- возможность выхода в телефонную сеть общего пользования;
- возможность защиты информации (скремблирования);
- высокую надежность и простоту использования;
- достаточную стойкость к внешним дестабилизирующим факторам, независимо от природы возникновения этих факторов (механические, электромагнитные, и т.п.);
- и т.д.

Одним из наиболее опасных видов воздействия является электромагнитное излучение.

В настоящее время активно развиваются средства электромагнитного поражения радиоэлектронных систем и устройств, и особенно средства поражения, основанные на новых физических принципах. Так, в последние годы появились новые мощные генераторы, излучающие периодические и однократные сверхкороткие электромагнитные импульсы (СКИ ЭМИ). Они обладают новыми качествами, отсутствующими у традиционных источников преднамеренных помех – сверхширокополосностью и большой амплитудой. Спектральная плотность их распределена в интервале от сотен МГц до единиц ГГц [2,3].

Характерной особенностью данного излучения является соизмеримость длительности воздействующих импульсов с длительностью рабочих импульсов при обработке цифровой информации. Поэтому при воздействии СКИ ЭМИ на средства и линии связи системы передачи информации в них наводятся сигналы, аналогичные рабочим, что приводит к нарушению работы этих систем, а в большинстве случаев, при достаточно большой амплитуде и частоте воздействующих импульсов, возможен выход из строя трансляционного оборудования и (или) системы связи в целом.

Одной из возможных областей применения таких излучателей является дистанционное поражение микропроцессоров устройств СРСиУ. Такие микропроцессорные устройства составляют основную часть используемых элементов в РЭС, работают на все более высоких частотах и низких напряжениях, в силу чего становятся все более восприимчивы к СКИ ЭМИ [3].

Целью исследования является оценка устойчивости системы радиосвязи и управления (СРСиУ) к деструктивным электромагнитным воздействиям.

Для достижения сформулированной цели необходимо решить следующие **задачи**:

- 1) провести анализ способов вредоносного электромагнитного воздействия на СРСиУ ОВД;
- 2) разработать функциональную модель вредоносного воздействия на инфокоммуникационные системы ОВД;
- 3) привести методы расчётной оценки устойчивости СРСиУ ОВД к деструктивным электромагнитным воздействиям.

Проведенный анализ показывает, что средства радиосвязи и управления и транспортная среда передачи данных могут быть подвержены деструктивному воздействию СКИ ЭМИ по трем основным каналам:

- 1) по сети питания;
- 2) по проводным линиям;
- 3) по радиоканалу.

Наиболее опасные каналы деструктивного воздействия (ДВ) на средства радиосвязи и управления – это *проводные линии и радиоканал*.

Для проникновения энергии ДВ по *проводным линиям* необходимо преодолеть предельную поглощающую способность компонентов, которые могут быть использованы во входных цепях. Для деградации этих компонентов (микросхем, транзисторов, диодов и т.п.) достаточно воздействия импульса с энергией 1–1000 мкДж, причем этот импульс может

быть весьма коротким, так как время пробоя МОП-структуры или р-п перехода составляет 10–1000 нс. Как известно, напряжения пробоя р-п переходов составляют от единиц до десятков вольт. Так, запоминающие устройства имеют пороговые напряжения около 7 В, логические ИС на МОП-структурах – от 7 до 15 В. И даже кремниевые сильноточные биполярные транзисторы, обладающие повышенной прочностью к перегрузкам, имеют напряжение пробоя в диапазоне от 15 до 65 В [4]. Такие напряжения характерны при воздействии СКИ ЭМИ.

Опасным является также деструктивное воздействие *по радиоканалу*.

В современных условиях известны достаточно малогабаритные электромагнитные технические средства силового деструктивного воздействия (ТС СДВ), которые размещаются либо в непосредственной близости с аппаратурой СРСиУ ОВД, либо на незначительном удалении, но достаточном для маскировки и атаки [1].

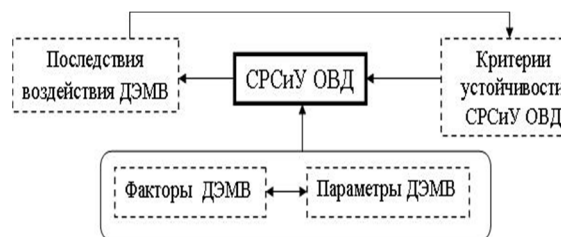
В настоящее время наиболее привлекательным для злоумышленника в качестве ТС СДВ является генератор с виртуальным катодом (виркатор), который обладает такими свойствами, как простота конструкции, излучение мощного электромагнитного импульса осуществляется с использованием направленной антенны или антенной системы, токи в виркаторах составляют величины 1–10 кА, а мощности от 170 кВт до 40 ГВт в сантиметровом и дециметровом диапазонах.

Согласно экспериментальным данным, приведённым в [5], даже кратковременное воздействие мощных наносекундных импульсов ЭМИ на средства связи приводит к сбою в работе, а при длительном воздействии – выводит их из строя.

Таким образом, СКИ ЭМИ воздействует на все радиоэлектронные устройства в пределах зоны электромагнитного воздействия, а ТС СДВ могут привести как к разрушению передаваемой инфор-

мации и нарушению нормального функционирования системы радиосвязи, так и физическому выводу из строя (прекращению функционирования), оправдывая установившееся название «электромагнитной бомбы» [6].

На рисунке показана модель деструктивного воздействия СКИ ЭМИ.



Модель деструктивного воздействия СКИ ЭМИ

Для определения эффективного функционирования СРСиУ необходимо определить устойчивость используемых линий связи и средств радиосвязи ОВД. Для этого необходимо определить факторы и параметры деструктивного электромагнитного воздействия (ДЭМВ), так как без их качественной и количественной оценки дальнейшее исследование устойчивости средств радиосвязи и управления затруднено. Критерии устойчивости системы могут быть определены при условии известного воздействия на систему и после снятия этого воздействия. Последствия воздействия ДЭМВ можно определить по вышеупомянутым критериям.

Известные нормативные документы (ГОСТ Р 51317.4.4-99 (МЭК 61000-4-4:1995) «Электромагнитная совместимость (ЭМС) – Часть 4: Методы испытаний и измерений – Раздел 4: Испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам» и ГОСТ Р 51317.6.1-2006 (МЭК 61000-6-1:2005) «Электромагнитная совместимость – часть 6: Требования и методы испытаний раздел 1: Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением») определяют вид стандартных по-

мех (наносекундные импульсные); параметры (амплитуду импульсов – $\pm 0,5$ кВ, длительность фронта импульса/длительность импульса – 5/50 нс, частоту импульсов 5 кГц); критерии качества функционирования (А, В, С), и др. [7,8].

Согласно ГОСТ Р 53111-2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования: требования и методы проверки», устойчивость функционирования сети электросвязи – это способность сети электросвязи выполнять свои функции при выходе из строя части элементов сети в результате воздействия дестабилизирующих факторов.

В соответствии с Пограничным словарём, устойчивость системы связи – это способность системы обеспечить управление при совокупном воздействии дестабилизирующих факторов, восстанавливать исходное состояние после какого-либо возмущения, проявляющегося в отклонении параметров системы от номинального значения.

Существует ещё множество определений устойчивости системы связи. Обобщив данные понятия, получаем, что устойчивость системы радиосвязи и управления – это способность системы выполнять свои функции при воздействии дестабилизирующих факторов и восстанавливать работоспособное состояние с заданными параметрами после воздействия данных факторов.

Под дестабилизирующим фактором понимают воздействие на СРСиУ, источником которого является физический или технологический процесс внутреннего или внешнего по отношению к СРСиУ характера. Отсюда, по отношению к СРСиУ дестабилизирующие факторы подразделяются на внутренние и внешние.

Внутренние дестабилизирующие факторы – факторы, источники воздействия которых находятся внутри СРСиУ и имеется достаточная информация о характеристиках их воздействий, позволяющая принимать эффективные решения по их

локализации и проведению соответствующих профилактических и ремонтно-восстановительных мероприятий [9].

Источниками таких факторов являются: некачественные электрические контакты; изменение характеристик радиокомпонентов и узлов радиоэлектронных средств (РЭС) – «старение» аппаратуры; перепады напряжения; перебои в электропитании; нарушение норм и рекомендаций по электромагнитной совместимости (ЭМС).

Внешние дестабилизирующие факторы – факторы, источники которых расположены вне СРСиУ. Источниками данных факторов являются физические объекты, которые в совокупности с системами или событиями, определяющими моменты и характер возбуждения источника, выделяют энергию на образование дестабилизирующих факторов [1].

Они разделяются: по признаку отношения к природе возникновения – на субъективные (искусственные) и объективные (естественные). Объективные источники внешних дестабилизирующих факторов, моменты возбуждения и направленность выделения энергии которых носят случайный характер, являются источниками непреднамеренных дестабилизирующих факторов. К таким источникам относятся: землетрясение, разряд молнии, радиоактивное заражение местности вследствие техногенных катастроф, линия электропередачи в аварийном режиме, контактная сеть железных дорог, радиолокационные станции, радиопередающие станции. Субъективные источники внешних факторов, моменты возбуждения которых и направленность выделяемой ими энергии имеют целью нарушение работоспособности системы электросвязи, представляют собой источники преднамеренных дестабилизирующих факторов. К таким источникам относятся все виды современного оружия, ориентированного на поражение сетей электросвязи, террористические акты, преднаме-

ренные электромагнитные воздействия, в том числе осуществляемые кондуктивным путем [10].

В соответствии с характером воздействия дестабилизирующих факторов, обеспечение устойчивости СРСиУ сводится к обеспечению живучести, помехоустойчивости и надёжности.

Под живучестью системы связи понимают способность сохранять или быстро восстанавливать способность к выполнению своих функций с требуемым качеством в условиях воздействия дестабилизирующих факторов.

Помехоустойчивость – способность системы связи выполнять свои функции с требуемым качеством в условиях воздействия радиоэлектронных помех. Помехоустойчивость оценивается по двум параметрам: помехозащищенность и электромагнитная совместимость.

Помехозащищенность – способность системы связи функционировать в условиях воздействия преднамеренных помех.

Электромагнитная совместимость – способность РЭС одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством и не создавать недопустимых помех другим РЭС [1].

Надежность системы связи – способность системы связи обеспечивать связь, сохраняя во времени значение эксплуатационных показателей в пределах норм технической эксплуатации, технического обслуживания и восстановления.

Можно сделать вывод, что для обеспечения и повышения устойчивости СРСиУ необходимо комплексное решение задачи по повышению ее живучести, помехоустойчивости и надежности.

Для того чтобы применять конкретные меры по повышению устойчивости СРСиУ, необходимо оценить устойчивость системы связи путём оценки устойчивости применяемого оборудования и аппаратуры к воздействию дестабилизирующих факторов (механических, климатических, электромагнитных) и соответ-

ствие его требованиям нормативных документов; оценки размещения данного оборудования и аппаратуры на объекте; оценки возможного резервирования канала связи и разветвлённости сети, возможности взаимодействия с другими СРСиУ.

Данная оценка невозможна без определения уровня возможного воздействия дестабилизирующих факторов (высокий, средний, низкий) [1, 9]. Уровень воздействия определяется в зависимости от назначения и значимости системы связи, например, для СРСиУ ОВД уровень воздействия будет выше по сравнению с системами радиосвязи коммерческих структур, т.к. СРСиУ является системой радиосвязи специального назначения и к ней предъявляются повышенные требования (к механическим, климатическим воздействиям, по полосе частот, по защите передаваемой информации, и т.д.), обусловленные спецификой решаемых задач.

После определения уровня воздействия и прогнозирования возможного ущерба от него приступают к расчётной (количественной) оценке устойчивости элементов системы радиосвязи и управления на основе (качественных) показателей устойчивости.

Существует методика оценки соответствия сети электросвязи заданным требованиям обеспечения устойчивости ее функционирования [9].

Данная методика расчётной оценки устойчивости основана на использовании математического аппарата случайных графов и нахождения связности между элементами графа с помощью метода перебора простых цепей (МППЦ). Сеть связи моделируется графом сети, вершинами и ребрами которого являются узлы и линии связи. Вершины графа представляют собой узлы связи, а ребра – совокупность линий связи, которые соединяют вершины графа между собой. Всем элементам графа (вершинам и ребрам) присваивают весовой коэффициент, представляющий собой коэффициент готовности узла или ли-

нии связи при расчете показателей надежности сети связи (при расчете показателей живучести весовыми коэффициентами являются коэффициенты оперативной готовности узлов и линий связи). На построенном графе сети связи выделяют два полюса (две вершины – «исток» и «сток»), которые отмечают выбранное направление связи. Метод расчётной оценки связности между элементами графа с помощью перебора простых цепей заключается в том, что для выбранных полюсов графа сети, в соответствии с алгоритмом установления связи, отмечаются все цепи (или пути), по которым может быть установлено соединение. Под событием связности понимают такое событие, когда между «исток» и «сток» в работоспособном состоянии существует хотя бы одна простая цепь. Если между полюсами сети в работоспособном состоянии нет ни одной простой цепи, то в двухполюсной сети наступает событие несвязности. Под «простой цепью» понимают последовательность ребер и вершин графа без петель и параллелей, замыкающую полюсы (выбранные вершины) между собой. Далее на графе сети выделяют все простые цепи (μ_{ij}) между выделенной парой полюсов (узлов) v_i и v_j сети.

При заданных коэффициентах готовности (или оперативной готовности) для всех элементов графа связность двухполюсной сети между выделенными узлами v_i и v_j рассчитывается методом объединения простых цепей с учетом эффекта поглощения.

При практических расчётах перечень простых цепей или путей μ_{ij} между узлами v_i и v_j ограничивают только теми путями, которые содержат допустимое число транзитных участков, зависящее от допустимого уровня искажений передаваемой по линии связи информации. Число транзитных участков определяет ранг простых цепей – $r_{\max}$. Таким образом, полный перечень простых цепей между узлами связи определяется с учетом максимально допу-

стимого числа транзитных участков (ограничения ранга простых цепей).

Связностью ρ_{ij}^k k -го пути μ_{ij}^k из перечня всех цепей μ_{ij} называется совместная вероятность исправного состояния всех ребер и вершин, образующих эту цепь:

$$\rho_{ij}^k = \prod_{a \in \mu_{ij}^k} (1 - q_a) = \prod_{a \in \mu_{ij}^k} \rho_a, \quad (1)$$

где ρ_a – коэффициент готовности (или оперативной готовности) a -го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащих пути μ_{ij}^k ; $q_a = (1 - \rho_a)$ – коэффициент неготовности (или оперативной неготовности) a -го элемента последовательности ребер и вершин, принадлежащего пути μ_{ij}^k .

Коэффициент готовности канала электросвязи рассчитывается:

$$K_r = T_o / (T_o + T_b),$$

где T_o – среднее время наработки на отказ канала электросвязи; T_b – среднее время восстановления работоспособности канала электросвязи.

Коэффициенты готовности элементов сети связи находят в соответствии с паспортными данными на оборудование и кабели связи. Они также могут быть вычислены по среднему времени наработки на отказ и времени восстановления, которые приводятся изготовителем в технической документации на устанавливаемое оборудование электросвязи.

Коэффициент оперативной готовности $K_{o.r}$ канала электросвязи, определяемый выражением

$$K_{o.r} = P(T) K_r,$$

где K_r – коэффициент готовности; $P(T)$ – вероятность сохранения работоспособности канала электросвязи при воздействии ВДФ.

При воздействии ВДФ отказ любого элемента сети связи равновероятен, поэтому при выбранном возможном уровне ущерба на сети электросвязи после воздействия значение $P(T)$ для всех элементов сети одинаково и может принимать значения: 0,5; 0,7; 0,9 [1].

Вероятность связности ρ_{ij}^k от v_i к v_j – это вероятность исправного состояния хотя бы одной цепи из всех возможных цепей или (при ограничении числа транзитных участков $r_{\max}$) хотя бы одной цепи с допустимым рангом:

$$\rho_{ij} = \rho_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k} (1 - \rho_{ij}^k). \quad (2)$$

В реальных условиях цепи часто взаимозависимы, т.е. имеют общие ребра и вершины. При этом вероятность связности, вычисленная по формуле (2), имеет завышенное значение. Действительное значение получится, если при вычислениях по формуле (2) после раскрытия скобок все члены, имеющие показатели степени больше единицы, заменить на единицу, что соответствует исключению события многократного учета коэффициента готовности (или оперативной готовности) одного ребра или одной вершины.

Такое действие обозначают символом E и называют поглощением. Формула для вычисления связности принимает следующий вид:

$$\rho_{ij} = E \left\{ \rho_{ij}^{\max} = 1 - \prod_{\forall \mu_{ij}^k} (1 - \rho_{ij}^k) \right\}. \quad (3)$$

Список литературы

1. Хохлов, Н.С. Моделирование и оптимизация противодействия разрушению информации в системах управления и связи органов внутренних дел при электромагнитных воздействиях: монография / Н.С. Хохлов; под научн. ред. С.В. Скрыля. – Воронеж: Воронежский институт МВД России, 2005. – 181 с.

2. Балюк, Н.В. Мощный электромагнитный импульс: воздействие на электронные средства и методы защиты / Н.В. Балюк, Л.Н. Кечиев, П.В. Степанов – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 478 с.

3. Авдеев, В.Б. Особенности формирования помех мобильной УКВ-радиосвязи в городе и зданиях в условиях многолучевости: монография / В.Б. Авдеев. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр Воронежского государственного университета, 2012. – 138 с.

Число перемножаемых сомножителей в формулах (2) и (3) равно числу простых цепей, а число перемножаемых сомножителей в формуле (1) равно числу ребер и вершин в одной цепи. Таким образом, показатели надежности и живучести сети электросвязи (по вероятностям связности двухполюсного графа) вычисляют по формуле (3).

Вывод. Оценка возможности использования конкретной системы радиосвязи и управления в условиях воздействия на них ДЭМВ является актуальной задачей.

Для её решения необходим анализ данных систем с целью выработки критерияльных уровней устойчивости к ДЭМВ. Полученная оценка должна проверяться, для чего необходимы испытания используемого оборудования на стойкость к ДЭМВ.

Таким образом, возможности поражающего действия нового информационного оружия на системы связи ОВД приводят к необходимости защиты данных систем от ДВ СКИ ЭМИ.

References

1. Hohlov N. S. Modelirovanie i optimizatsiya protivodeistviya razrusheniyu informatsii v sistemakh upravleniya i svyazi organov vnutrennikh del pri elektromagnitnykh vozddeistviyakh: monografiya [Modeling and Optimization of Resistance to Information Destruction in Systems of Control and Communication of Internal Affairs Agencies during Electromagnetic Control: monograph]. Edited by S. V. Skryl. Voronezh, Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia, 2005. 181 p.

2. Balyuk N. V., Kechiev L. N., Stepanov P. V. Moshchnyi elektromagnitnyi impuls: vozddeistvie na elektronnye sredstva i metody zashchity [Power Electromagnetic Pulse: Effect on Electronic Instrumentation and Defense Methods. Moscow, LLC «Gruppa IDT», 2007. 478 p.

3. Avdeev V. B. Osobennosti formirovaniya pomekh mobil'noi UKV-radiosvyazi v gorode i zdaniyakh v usloviyakh mnogoluchevosti: monografiya [The Features of Noise Formation of Mobile USB-radio communication in a City and Buildings in Conditions of Multipath Propagation: monograph]. Voronezh, Publishing and Printing Centre of Voronezh State University, 2012. 138 p.

4. Барсуков, В. Защита компьютерных систем от силовых деструктивных воздействий / В. Барсуков // Информационный бюллетень «Jet Info». – 2000. – № 2(81). – С.8-17.

5. Авдеев, В.Б. Мощные сверхкороткоимпульсные и сверхширокополосные электромагнитные излучения и их помеховое и поражающее воздействия на электронную аппаратуру передачи-приема, обработки и хранения информации: монография / В.Б. Авдеев; под ред. В.Г. Герасименко, В.Б. Авдеева, А.В. Бердышева. – Воронеж: Научная книга, 2008. – 397 с.

6. Богданов, В. Электромагнитная угроза: от мифа - к реальности / В. Богданов, М. Жуковский, С. Ларионов, В. Чванов. – Безопасность, достоверность, информация». – 2010. – № 3. – С.12-15.

7. ГОСТ Р 51317.4.4-99 (МЭК 61000-4-4:1995) «Электромагнитная совместимость (ЭМС) – Часть 4: Методы испытаний и измерений – Раздел 4: Испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам». – М.: Стандартиформ, 2008. – 28 с.

8. ГОСТ Р 51317.6.1-2006 (МЭК 61000-6-1:2005) «Электромагнитная совместимость – часть 6: Требования и методы испытаний – Раздел 1: Устойчивость к электромагнитным помехам технических средств, применяемых в жилых, коммерческих зонах и производственных зонах с малым энергопотреблением». – М.: Стандартиформ, 2007. – 16 с.

9. ГОСТ Р 53111-2008 «Устойчивость функционирования сети связи общего пользования: требования и методы проверки». – М.: Стандартиформ, 2009. – 16 с.

10. ГОСТ Р 51275-2006 «Защита информации. Объект информатизации. Факторы, воздействующие на информацию. Общие положения». – М.: Стандартиформ, 2007. – 6 с.

4. Barsukov V. Zashchita kompyuternykh sistem ot silovykh destruktivnykh vozdeystviy [Protection of Computer Systems from Force Destructive Effect]. Information Bulletin «Jet Info». 2000. No 2 (81). – P. 8-17.

5. Avdeev V. B. Moshchnye sverkhkorotkoimpul'snye i sverkhshirokopolosnye elektromagnitnye izlucheniya i ikh pomekhovoe i porazhayushchee vozdeystviya na elektronnyu apparaturu peredachipriema, obrabotki i khraneniya informatsii: monographiya [Power Ultrashort Pulse and Ultra Broadband Electromagnetic Radiation and their Interference and Destructive Effect on Electronic Equipment of Transmission-reception, Processing and Storage of Information: monograph]. Edited by V.G. Gerasimenko, V. B. Avdeev, A. V. Berdyshev. Voronezh, Nauchnaya kniga, 2008. 397 p.

6. Bognanov V., Zhukovsky M., Larionov S., Chvanov V. Elektromagnitnaya ugroza: ot mifa k realnosti [Electromagnetic Threat: from Myth to Reality]. – Bezopasnost', dostovernost', informatsiya [Safety, Reliability, Information]. 2010. No 3. P.12-15.

7. GOST (in Russian) P 51317.4.4-99 (МЭК 61000-4-4:1995) «Elektromagnitnaya sovместimost' (EMS) Chast' 4: Metody ispytaniy i izmereniy – Razdel 4: Ispytaniya na ustoichivost' k nanosekundnym impul'snym pomekham». [Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4: Test and Measurement Methods – Unit 4: Tests of Resistance to Nanosecond Impulse Noise]. Moscow, Standartinform, 2008. 28 p.

8. GOST (in Russian) P 51317.6.1-2006 (МЭК 61000-6-1:2005) «Elektromagnitnaya sovместimost' - Chast' 6: Trebovaniya i metody ispytaniy – Razdel 1: Ustoichivost' k elektromagnitnym pomekham tekhnicheskikh sredstv, primenyaemykh v zhilykh, kommercheskikh zonakh i proizvodstvennykh zonakh s malym energopotrebleniem». [Electromagnetic Compatibility – Part 6: Requirements and Test Methods – Unit 1: Resistance to Electromagnetic Interference of Technique, used in Residential, Commercial Zones and Production Areas with Low Energy Consumption]. Moscow, Standartinform, 2007. 16 p.

9. GOST (in Russian) P 53111-2008 «Ustoichivost' funktsionirovaniya seti svyazi obshchego polzovaniya: trebovaniya i metody proverki». [The Stability of Functioning of the Public Communications Network. Requirements and Check Methods]. Moscow, Standartinform, 2009. 16 p.

10. GOST (in Russian) P 51275-2006 «Zashchita informatsii. Ob'ekt informatsii. Faktory, vozdeistvuyushchie na informatsiyu. Obshchie polozheniya». [Protection of information. Object of informatisation. Factors influencing the information. General Terms]. Moscow, Standartinform, 2007. 6 p.

Статья поступила в редакцию 29.07.13.

ХОХЛОВ Николай Степанович – доктор технических наук, профессор кафедры инфокоммуникационных систем и технологий, Воронежский институт МВД России (Российская Федерация, Воронеж). Область научных интересов – эффективность и моделирование безопасного функционирования систем и процессов. Автор более 100 публикаций.

E-mail: nikolayhohlov@rambler.ru

СИДОРОВ Александр Викторович – преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем и технологий, Воронежский институт МВД России (Российская Федерация, Воронеж). Область научных интересов – системы безопасности и радиосвязи. Автор четырех публикаций.

E-mail: sidorov-av80@mail.ru

HOHLOV Nikolay Stepanovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair of Infocommunication Systems and Technologies at Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Russian Federation, Voronezh). The sphere of scientific interests is effectiveness and modeling of the safe functioning of systems and processes. The author of 100 publications.

E-mail: nikolayhohlov@rambler.ru

SIDOROV Aleksandr Viktorovich – a lecturer of the Chair of Infocommunication Systems and Technologies at Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia (Russian Federation, Voronezh). The sphere of scientific interests is safety and radio communication systems. The author of 4 publications.

E-mail: sidorov-av80@mail.ru

N. S. Hohlov, A. V. Sidorov

ESTIMATION OF RADIO COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEM RESISTANCE TO DESTRUCTIVE ELECTROMAGNETIC EFFECT

Key words: *system of radio communication and control; destructive electromagnetic effect; resistance; ultra short impulses; effect model; estimation method; electromagnetic compatibility; graph theory.*

The system of radio communication and control of the department of internal affairs is characterized in the article, the channels of the destructive effect of ultra short impulses of electromagnetic radiation on the system of radio communication and control are considered. The model of the destructive effect of ultra short impulses of electromagnetic radiation is offered. The concepts of the resistance of the system of radio communication and control and a destabilizer are defined; the classification and the sources of such factors are presented. In accordance with the nature of the destabilizing factor effect, the resistance support of the system of radio communication and control is reduced to survivability, noise immunity and reliability control. For the support and the increase of the resistance of the system of radio communication and control, the integrated problem solving of its survivability, noise immunity and reliability increase is necessary. The estimation method of the communication network correspondence to specified requirements of its functioning stability support based on the use of the mathematical apparatus of random graphs and the finding of the connection between graph elements with the help of the method of the enumeration of simple chains of the theory is suggested. The received estimation must be checked, the tests of the resistance of the used equipment to destructive electromagnetic effect are necessary.

УДК 621.396.2

А. Ю. Чернышев, В. Г. Шибанаев

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТАКТОВОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ В ЦИФРОВЫХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ НА ОСНОВЕ МНОГОУРОВНЕВЫХ КОДОВ С ВНУТРЕННЕЙ ИЗБЫТОЧНОСТЬЮ

Предложен и обоснован способ обеспечения тактовой синхронизации в цифровых системах передачи на основе многоуровневых кодов с внутренней избыточностью, основанный на ограничении длительности однородных участков в линейном сигнале. Определены требования к избыточности кодов с учётом допустимой длины однородных участков. Получены оценки физической реализуемости кодов линий и их спектральной эффективности. Представлены формальные модели относительного многоуровневого кодирования и декодирования.

Ключевые слова: код линии; тактовая синхронизация; самосинхронизирующийся код; многоуровневый код; относительный код.

Введение. Несмотря на интенсивное развитие в последние два десятилетия беспроводных инфокоммуникационных технологий, во многих случаях, особенно при построении сложных сетей связи, незаменимыми остаются проводные и кабельные линии [1]. В цифровых системах передачи на их основе роль несущего колебания выполняют коды линий [2], иногда называемые линейными кодами. Они представляют собой сигналы специальной формы, параметры которых согласованы с характеристиками соответствующей линии электрической связи.

Для всех без исключения кодов линий обязательным является требование однозначности прямого и обратного преобразований. Кроме того, в зависимости от вида линии и особенностей системы передачи к линейным сигналам, т.е. к кодам линий, могут предъявляться специфические требования [3]: а) код линии должен включать в себя механизмы для выделения или восстановления тактовой частоты, т.е. обладать свойством самосинхронизации; б) спектр сигнала должен быть

сосредоточен в узкой полосе частот, т.е. код линии должен обладать спектральной эффективностью; в) в спектре линейного сигнала должна отсутствовать постоянная составляющая, что обязательно лишь в системах с дистанционным питанием по общей физической линии [4].

Как правило, коды линий формируются таким образом, чтобы гарантированно обеспечить выполнение одного из перечисленных выше требований. В то же время на практике нередко требуется одновременное выполнение двух, а то и трёх требований. Наиболее сложным является обеспечение устойчивой синхронизации при высокой спектральной эффективности [5]. Однако именно такое сочетание требуется в современных высокоскоростных системах передачи информации [2].

Цель работы – исследовать механизмы реализации самосинхронизации и сжатия спектра в кодах линий и синтезировать универсальные сигнальные структуры, одновременно обеспечивающие возможность самосинхронизации и спектральную эффективность.

Типовые механизмы обеспечения самосинхронизации и спектральной эффективности в кодах линий. Как известно, выделение или восстановление тактовой частоты из линейного сигнала гарантировано, если в спектре сигнала имеется составляющая на частоте тактовой синхронизации или ее гармонике/субгармонике (спектральное условие) или если на каждом тактовом интервале происходит хотя бы одно изменение уровня линейного сигнала (конструктивное условие) [5]. С точки зрения устойчивости восстановления тактовой частоты наиболее эффективным является биполярный код с возвратом к нулю, обычно обозначаемый *RZ-2*, в котором выполняются оба условия, и спектральное, и конструктивное. Однако существенным недостатком кода *RZ-2* является расширение спектра сигнала вдвое вследствие соответствующего сокращения длительности значащих сигнальных импульсов.

С другой стороны, высокая спектральная эффективность за счёт сжатия спектра линейного сигнала характерна для многоуровневых кодов. Например, популярный код *2B1Q* обеспечивает сжатие спектра сигнала вдвое, код *3B2T* – в полтора раза, код *4B3T* – примерно в 1,3 раза [3]. Однако практически все многоуровневые коды не содержат никаких механизмов самосинхронизации.

Следовательно, *одновременно получить самосинхронизацию и сжатие спектра можно при помощи многоуровневых кодов с конструктивными модификациями.* Первый вариант такого рода модификаций заключается в периодическом возврате к нулю на каждом символьном интервале многоуровневого кода, как, например, в четырехуровневом сигнале с принудительным возвратом к нулю *2B1Q-RZ* [5]. При этом на каждом символьном интервале фактически происходят два изменения уровня сигнала, что действительно обеспечивает устойчивую тактовую синхронизацию.

Установлено, что *в системах с пакетным способом передачи информации и специальными сигналами синхронизации в заголовках пакетов для обеспечения достаточной устойчивости тактовой синхронизации межуровневые переходы на каждом тактовом интервале не требуются и можно допустить в линейном сигнале появление однородных фрагментов, не превышающих определенной длины* [3, 4]. На этом принципе, в частности, построены коды с высокой плотностью единиц (*KBП* или *HDB*), являющиеся модификацией кодов с чередованием полярности импульсов (*ЧПИ* или *AMI*). Данный принцип ограничения однородных фрагментов в линейном сигнале может быть положен и в основу второго варианта синтеза многоуровневых самосинхронизирующихся кодов линий.

Общая методика синтеза самосинхронизирующихся многоуровневых кодов. Многоуровневые коды линий традиционно обозначаются четырехзначной комбинацией вида $nBmX$, где n – число двоичных элементов, образующих информационный символ, преобразуемый в многоуровневый код; B – условное обозначение исходного двоичного кода; m – количество элементов многоуровневого кода, необходимое для однозначного отображения информационного символа; X – основание (число уровней) многоуровневого выходного кода. Обычно в качестве символа X используются обозначения: T – для троичного (трехуровневого) кода, Q – для четырехуровневого кода, P – для пятиуровневого кода и так далее.

Количество информационных символов в исходном двоичном коде определяется выражением

$$V_{\text{инф}} = 2^n. \quad (1)$$

Очевидно, что для однозначного представления всех информационных символов в многоуровневом коде его объем $V_{\text{код}}$ должен удовлетворять условию

$$V_{\text{код}} \geq V_{\text{инф}}. \quad (2)$$

Изначально объём многоуровневого кода составляет $V_{\text{код } 0} = X^m$. Однако за счёт исключения комбинаций, содержащих достаточно длинные однородные последовательности элементов, допустимое количество символов многоуровневого кода сокращается. Результаты оценки потенциально возможных объёмов некоторых многоуровневых кодов $V_{\text{код}}$ при различных требованиях к допустимой длине однородных фрагментов L_d приведены в табл. 1, где $N_{\text{одн}}$ – количество комбинаций, содержащих однородные фрагменты длиной L_0 .

Учитывая, что однородные последовательности многоуровневых элементов большой длины, в том числе больше допустимой, могут образоваться на стыках информационных символов, необходимо обеспечить обязательное различие между последним элементом предыдущего символа и первым символом очередного символа. Это легко достигается за счёт принципа относительного кодирования, детально рассмотренного на примере модифицированных кодов $3B2T$ и $4B3T$ в работах [5, 6]. Данный метод относительного кодирования основан на том, что весь алфавит разрешенных символов троичного кода $2T$ или $3T$ разделяется на три блока, каждый из которых содержит не менее четырех (для $3B2T$) или восьми (для $4B3T$) симво-

лов в виде 2- или 3-разрядных троичных комбинаций и начинается с определённого троичного элемента. В зависимости от значения последнего элемента предыдущего троичного символа очередная троичная комбинация выбирается только из двух разрешенных блоков. Аналогичным образом производится и декодирование. Поскольку кодирование однозначно, то неоднозначности при декодировании также не возникает. Метод описывается простыми математическими моделями для обоих кодов [5] и имеет достаточную простую физическую реализацию для кода $4B3T$ [7]. Очевидно, что описанный метод кодирования можно обобщить на произвольные многоуровневые коды.

Относительное кодирование, обеспечивающее различие крайних элементов соседних кодовых символов, в отношении произвольных многоуровневых кодов $nBmX$ основано на разделении всего алфавита символов X -уровневого кода на X блоков. С целью обеспечения однозначности кодирования и декодирования каждый из них должен содержать не менее чем $2^n/(X-1)$ символов. Следовательно, условие (2) с учётом относительного кодирования принимает вид

$$V_{\text{код}} \geq 2^n X/(X-1). \quad (3)$$

Таблица 1

Оценка объёмов сокращенных алфавитов многоуровневых кодов

Код	$V_{\text{код } 0}$	$N_{\text{одн}}$						$V_{\text{код}}$				
		$L_0=1$	$L_0=2$	$L_0=3$	$L_0=4$	$L_0=5$	$L_0=6$	$L_d=1$	$L_d=2$	$L_d=3$	$L_d=4$	$L_d=5$
$1T$	3	3	-	-	-	-	-	3	-	-	-	-
$2T$	9	6	3	-	-	-	-	6	9	-	-	-
$3T$	27	12	12	3	-	-	-	12	24	27	-	-
$4T$	81	24	42	12	3	-	-	24	66	78	81	-
$5T$	243	48	132	48	12	3	-	48	180	228	240	243
$6T$	729	96	396	174	48	12	3	96	492	666	714	726
$1Q$	4	4	-	-	-	-	-	4	-	-	-	-
$2Q$	16	12	4	-	-	-	-	12	16	-	-	-
$3Q$	64	36	24	4	-	-	-	36	60	64	-	-
$4Q$	256	108	120	24	4	-	-	108	228	252	256	-
$5Q$	1024	324	540	132	24	4	-	324	864	996	1020	1024
$1P$	5	5	-	-	-	-	-	5	-	-	-	-
$2P$	25	20	5	-	-	-	-	20	25	-	-	-
$3P$	125	80	40	5	-	-	-	80	120	125	-	-
$4P$	625	320	260	40	5	-	-	320	580	620	625	-

Как видно из неравенства (3), многоуровневый код должен обладать внутренней избыточностью с коэффициентом не менее $X/(X-1)$. Только при ее наличии возможны однозначные кодирование и декодирование, а также устойчивая тактовая синхронизация. Конкретное распределение разрешенных многоуровневых комбинаций по блокам может быть произвольным. Единственное условие состоит в том, что все комбинации одного и того же блока должны начинаться с одного и того же элемента.

Оценка физической реализуемости и эффективности многоуровневых кодов линий. Понятно, что согласно условию (3) физически реализуемы только определённые коды линий. Кроме того, очевидно, что они отличаются друг от друга параметрами эффективности. С точки зрения эффективности самосинхронизации таким параметром можно считать

допустимую длину однородных фрагментов L_d , уже использованную ранее при оценке потенциальных объемов алфавитов многоуровневых кодов (см. табл. 1). Спектральную эффективность удобно оценивать коэффициентом сжатия спектра K_F , который в простейшем виде можно свести к отношению

$$K_F = n/m.$$

Результаты оценки реализуемости различных кодов линий и их эффективности представлены в табл. 2.

Потенциально возможные коды линий определяются в зависимости от показателя $V_{ИНФ\max}$, который представляет собой максимально возможное для кода mX количество информационных символов, определяемое с учётом дополнительного округления до ближайшего меньшего целого по формуле:

$$V_{ИНФ\max} = V_{КОД}(X-1)/X.$$

Таблица 2

Потенциально возможные многоуровневые коды линий и их свойства

Код	L_d	$V_{КОД}$	$V_{ИНФ\max}$	Код линии	K_F	$K_{ИЗБ}$
$1T$	1	3	2	$1B1T$	1,000	1,000
$2T$	1	6	4	$2B2T$	1,000	1,000
	2	9	6	$2B2T$	1,000	1,500
$3T$	1	12	8	$3B3T$	1,000	1,000
	2	24	16	$4B3T$	1,333	1,000
	3	27	18	$4B3T$	1,333	1,125
$4T$	1	24	16	$4B4T$	1,000	1,000
	2	66	44	$5B4T$	1,250	1,375
	3	78	52	$5B4T$	1,250	1,625
$5T$	1	48	32	$5B5T$	1,000	1,000
	2	180	120	$6B5T$	1,200	1,875
	3	228	152	$7B5T$	1,400	1,188
$6T$	1	96	64	$6B6T$	1,000	1,000
	2	492	328	$8B6T$	1,333	1,281
	3	666	444	$8B6T$	1,333	1,734
$1Q$	1	4	3	$1B1Q$	1,000	1,500
$2Q$	1	12	9	$3B2Q$	1,500	1,125
	2	16	12	$3B2Q$	1,500	1,500
$3Q$	1	36	27	$4B3Q$	1,333	1,688
	2	60	45	$5B3Q$	1,667	1,406
	3	64	48	$5B3Q$	1,667	1,500
$4Q$	1	108	81	$6B4Q$	1,500	1,266
	2	228	171	$7B4Q$	1,750	1,336
	3	252	189	$7B4Q$	1,750	1,477
$1P$	1	5	4	$2B1P$	2,000	1,000

Именно на его основе определяются возможные коды линий $nBmX$, такие, что $V_{\text{инфmax}}/2^n \geq 1$. Реальный коэффициент избыточности многоуровневого кода на уровне блоков определён по формуле:

$$K_{\text{изб}} = V_{\text{инфmax}}/2^n.$$

В целом из табл. 2 видно, что с ростом основания кода линии X спектральная эффективность кодов (коэффициент сжатия спектра K_F) также возрастает. Однако следует иметь в виду, что при этом не учтены реальные требования к ширине полосы пропускания канала передачи многоуровневых сигналов, которая увеличивается с ростом числа уровней.

Один и тот же код, например, $2B2T$, $4B3T$, $5B4T$ и другие, позволяет получить различные значения длины однородных фрагментов. Несомненно, более эффективны варианты с меньшей длиной L_d , одновременно дающие меньшее значение дополнительной избыточности.

Определённый интерес представляют примитивные относительные троичные коды класса $nBnT$, имеющие нулевую дополнительную избыточность ($K_{\text{изб}}=1$) и единичную спектральную эффективность ($K_F=1$) и гарантированно позволяющие получить межуровневые переходы на каждом тактовом интервале. По этим же соображениям перспективен код $2B1P$, в отличие от примитивных троичных кодов имеющий более высокую спектральную эффективность ($K_F=2$).

По совокупности критериев (отсутствие дополнительной избыточности, малая длина однородных фрагментов, наличие сжатия спектра) наиболее эффективным и перспективным можно считать относительный код $4B3T$.

Обобщенные модели кодирования и декодирования. Для физической реализации кодеров и декодеров линий необходимо наличие как минимум математических моделей процессов кодирования и декодирования. Частные модели для кода $4B3T$ приведены в [5] и сводятся к системе выражений:

$$A = (C+D) \bmod 24;$$

$$C = (24B+A-D) \bmod 16,$$

где A – десятичный эквивалент троичной комбинации в конечном числовом поле $GF(24)$, определяемый в соответствии с заданной таблицей кодирования; C – десятичный эквивалент четырехразрядной двоичной комбинации; D – параметр смещения, определяемый в зависимости от значения T_3 последнего элемента предыдущей троичной комбинации (в работах [5, 7] при $T_3 = -1$ $D=8$, при $T_3=0$ $D=16$ и при $T_3 = +1$ $D=0$); B – множитель поправки, определяемый по правилу: $B=0$, если $A \geq D$, и $B=1$, если $A < D$.

Для произвольных многоуровневых кодов, во-первых, иными будут основания числовых полей, в которых вычисляются десятичные эквиваленты n -разрядных двоичных и m -разрядных многоуровневых комбинаций: для двоичных комбинаций оно составит $V_{\text{инф}}=2^n$, а для многоуровневых – $Z=2^n X/(X-1)$. Во-вторых, количество значений параметра смещения D равно числу уровней X , а сам параметр D принимает значения $(i-1)Z/X$, где $0 \leq i \leq X-1$. Поправочный множитель B принимает те же значения 0 или 1 согласно тому же правилу. С учётом такого рода изменений формальные математические модели относительного многоуровневого кодирования и декодирования можно записать в виде системы выражений:

$$A = (C+D) \bmod Z;$$

$$C = (ZB+A-D) \bmod V_{\text{инф}},$$

дополнив их необходимыми таблицами представления символов A и C соответственно троичными и двоичными комбинациями.

Выводы. В цифровых системах передачи информации на основе проводных и кабельных линий связи можно одновременно обеспечить устойчивую тактовую синхронизацию и сжатие спектра линейного сигнала за счёт применения методики относительного кодирования и многоуровневых кодов с внутренней избыточностью. Устойчивость тактовой синхро-

низации достигается путём устранения из линейного сигнала однородных фрагментов с длиной больше критической.

Физическая реализуемость многоуровневых кодов, обеспечивающих устойчивую тактовую синхронизацию, зависит от допустимой длины однородных фрагментов и имеющейся внутренней избыточности.

Процедуры относительного многоуровневого кодирования и декодирования описываются достаточно простыми математическими выражениями на основе вычислений в конечных числовых полях.

Список литературы

1. Мешковский, К. А. Инновационные тенденции развития кабельных цифровых систем передачи / К. А. Мешковский, Н. Л. Сторожук // Электросвязь. – 2005. – № 9. – С. 32-35.
2. Берлин, А. Н. Терминалы и основные технологии обмена информацией / А. Н. Берлин. – М.: Интернет-Университет Информационных Технологий; БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 511 с.
3. Гольдштейн, Б. С. Протоколы сети доступа. Том 2 / Б. С. Гольдштейн. – М.: Радио и связь, 2001. – 292 с.
4. Уайндер, С. Справочник по технологиям и средствам связи / С. Уайндер; пер. с англ. – М.: Мир, 2000. – 429 с.
5. Чернышев, А. Ю. Синхронизация многоуровневых кодов линий передачи / А. Ю. Чернышев // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2009. – № 2(6). – С. 13-21.
6. Шибанаев, В. Г. Модифицированный код 4B3T и его применение в цифровых системах передачи / В. Г. Шибанаев, А. Ю. Чернышев // XV Вавиловские чтения: материалы Всеросс. междисциплин. науч. конф. – Йошкар-Ола: Марийск. гос. техн. ун-т, 2012. – Ч. 2. – С. 291-292.
7. Патент на полезную модель 117240 Российская Федерация, МПК7 Н 03 М 7/02, Н 03 М 13/13. Устройство передачи и приема данных с использованием сигнала 4B3T / Чернышев А. Ю., Шибанаев В. Г.; заявитель и патентообладатель Марийск. гос. техн. ун-т. – №2011154666/08; заявл. 30.12.11; опубл. 20.06.12, Бюл. №17. – 2с.: ил.

Среди физически реализуемых кодов существует класс примитивных троичных кодов $nBnT$, обеспечивающих абсолютную устойчивость тактовой синхронизации за счёт наличия межуровневых переходов на каждом тактовом интервале.

По совокупности критериев наиболее эффективным и перспективным является относительный код 4B3T, имеющий нулевую дополнительную избыточность, обеспечивающий сжатие спектра с коэффициентом 1,33 и допускающий однородные фрагменты длиной не более 2.

References

1. Meshkovsky K. A., Storozhuk N. L. Innovatsionnye tendentsii razvitiya kabelnykh tsifrovyykh sistem peredachi [Innovation Tendencies of the Development of Cable Digital Transmission Systems]. *Elektrosvyaz'* [Electric Communication]. 2005. No 9. P. 32-35.
2. Berlin A. N. Terminaly i osnovnye tekhnologii obmena informatsiei [Terminals and Basic Technologies of Information Exchange]. Moscow, Internet – University of Information Technologies; BINOM. Knowledge Laboratory, 2007. 511 p.
3. Goldshtein B. S. Protokoly seti dostupa [Protocols of the Network Access] Volume 2. Moscow, Radio i svyaz', 2001. 292 p.
4. Winder S. Spravochnik po tekhnologiyam i sredstvam svyazi [Reference Book on Technologies and Communication Means]; translation from English. Moscow, Mir, 2000. 429 p.
5. Chernyshev A. Yu. Sinkhronizatsiya mnogourovnevnykh kodov linii peredachi [Synchronization of Multilevel Codes of Transmission Lines]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2009. No 2 (6). P.13-21.
6. Shibanaev V. G., Chernyshev A. Yu. Modifitsirovannyi kod 4B3T i ego primenenie v tsifrovyykh sistemakh peredachi [Modified Code 4B3T and its Application in Digital Transmission Systems]. XV Vavilovskie chteniya: materialy Vserossiiskoy mezhdistsiplinarnoi nauchnoi konferentsii [XV Vavilov Readings: Proceedings of All-Russian interdisciplinary scientific conference]. Yoshkar-Ola, Mari State Technical University, 2012. Part 2. P.291-292.
7. Chernyshev A. Yu., Shibanaev V. G. Ustroistvo peredachi i priema dannykh s ispolzovaniem signala 4B3T [The Device for Data Transmission and Receive with the Use of the Signal 4B3T]. Patent RF, no. 117240, 2012.

Статья поступила в редакцию 21.01.13.

ЧЕРНЫШЕВ Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – формирование колебаний и сигналов; сверхширокополосные радиотехнические системы; системы передачи информации; защита информации в каналах связи. Автор более 100 публикаций, в том числе научно-методических и учебно-методических работ.

E-mail: ChernyshevAY@volgatech.net

ШИБАНАЕВ Владимир Геннадьевич – магистр техники и технологий, ОАО «Марийский машиностроительный завод» (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – цифровые системы передачи информации; защита информации в каналах связи. Автор пяти публикаций.

E-mail: sonik.89@mail.ru

CHERNYSHEV Aleksandr Yuryevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair of Radio Engineering and Communication at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is oscillation and signal forming; ultra broadband radio engineering systems; information transfer systems; information security in communication channels. The author of more than 100 scientific, scientific-methodical, teaching and methodical works.

E-mail: ChernyshevAY@volgatech.net

SHIBANAEV Vladimir Gennadyevich – Master of Engineering and Technologies, OJSC «Mari Engineering Plant » (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is digital systems of information transmission; information security in communication channels. The author of 5 published scientific works.

E-mail: sonik.89@mail.ru

A. Yu. Chernyshev, V. G. Shibanaev

CLOCK SYNCHRONIZATION SUPPORT IN DIGITAL SYSTEMS OF TRANSMISSION ON THE BASIS OF MULTILEVEL CODES WITH BUILT-IN REDUNDANCY

Key words: *line code; clock synchronization; self-synchronizing code; multilevel code; relative code.*

The method of clock synchronization support in digital transmission systems with the help of line signals in the form of relative multilevel codes is suggested and substantiated. The stability of clock synchronization is reached due to regular interlevel transitions in a line signal. This regularity is the consequence of code alphabet reduction by means of the exception of code combinations with inadmissibly long uniform fragments and the formation of required interlevel transitions on the borders of code combinations based on relative coding logic. In this connection the reduced multilevel code alphabet must have the redundancy which is determined by design code parameters. The estimations of physical realizability and spectral effectiveness of line codes with different uniform fragment length limitations are received. It is stated that the additional code redundancy is possible besides the necessary one. The class of codes nBnT without the additional redundancy is revealed which provides the absolute stability of clock synchronization due to the interlevel transitions on each clock interval. Presented formal coding and decoding models are described by simple mathematical expressions in finite number fields and they assume different variants of practical realization.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 004.912

*А. Г. Коробейников, С. Ю. Блинов,
А. В. Лейман, Г. Л. Маркина, И. М. Кутузов*

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СПАМНОСТИ ДОКУМЕНТОВ НА БАЗЕ ФЕЙЕРОВСКИХ ОТОБРАЖЕНИЙ

Рассмотрена задача построения алгоритма определения спамности документов на основе метода опорных векторов. Предложена модификация построения разделяющей гиперплоскости с использованием фейеровских отображений. Это позволяет работать с нестационарными данными, характерными для задач классификации документов.

Ключевые слова: классификация информации; спам; задачи сильной отделимости; гильбертово пространство.

Введение. Информационные технологии породили все увеличивающийся поток разнородной информации. Основной задачей поисковых систем (поисковых машин) является предоставление качественных результатов, т.е. наиболее важных релевантных страниц. Для этого необходимо решать задачу классификации. Поэтому теория, методы и алгоритмы классификации информации являются бурно развивающимся научным направлением.

Одной из важнейших проблем, встающей практически перед каждым пользователем Интернета, является борьба со спамом, то есть задача фильтрации (классификации) поступающей информации.

В настоящее время разработан ряд технологий построения фильтров – сервисов для отсеивания нежелательной информации. Эти технологии можно разделить на настраиваемые вручную и автома-

тизированные. Настраиваемые вручную фильтры основываются на списках доступа и настраиваются непосредственно пользователем, который выбирает либо нежелательные адреса, при политике пропуска по «черному списку», либо разрешенные адреса, при политике пропуска по «белому списку». Однако ручные способы фильтрации нежелательных сообщений малоэффективны и требуют постоянного обновления списков доступа, создавая дополнительную нагрузку на пользователя. Кроме того, ручная категоризация неприменима, если необходимо классифицировать большой объем информации за ограниченное время.

Применение автоматизированных технологий фильтрации основано на использовании методов распознавания образов, искусственного интеллекта, применении математической статистики и т.д. [1, 2].

Одним из самых популярнейших на сегодняшний день является фильтр, основанный на байесовском подходе (наивный байесовский классификатор), в котором предполагается, что различные термы сообщения независимы друг от друга. Но для повышения эффективности таких фильтров необходимо учитывать семантические связи между термами, что требует привлечения методов семантического анализа, что существенно повышает нагрузку на систему и увеличивает время работы самого фильтра, при незначительном повышении эффективности фильтрации.

Таким образом, исходя из вышеизложенного, существует потребность в разработке новых методов и алгоритмов классификации информации для решения задачи фильтрации нежелательных сообщений, что делает актуальной тему данной статьи.

В работе предложен алгоритм построения классификатора на базе метода построения разделяющей гиперплоскости в гильбертовом пространстве на основе фейеровского отображения [3,4].

Постановка задачи классификации. Формально постановка задачи классификации выглядит следующим образом.

Пусть дано конечное множество категорий (классов) $C = \{c_1, c_2, \dots, c_{|C|}\}$ и конечное множество документов $D = \{d_1, d_2, \dots, d_{|D|}\}$. Целевая функция (функционал, классификатор) $\Phi: D \times C \rightarrow \{-1, 1\}$, определяющая для каждой пары <документ, категория> соответствие их друг другу, не известна. Требуется найти классификатор Φ' , т.е. функцию, максимально близкую к функции Φ [4]. Если пересечение двух категорий пусто, то классификация бинарная, которая часто используется в фильтрации спама.

Если имеются образцы из каждой категории (объекты), про которые заранее известно, к какой категории они принадлежат, то такие задачи называют обучением с учителем, а известные данные называются обучающей выборкой. В предлага-

емом методе используется именно этот подход.

Машинное обучение предполагает наличие обучающей и контрольной выборки, т.е. дана начальная коллекция документов $\Omega = \{d_1, d_2, \dots, d_{|\Omega|}\} \subset D$, где значения целевой функции Φ известны для $\forall (d_i, c_j) \in \Omega \times C$. Эта коллекция Ω разбивается на два непересекающихся множества: $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ и $\Omega_1 \cap \Omega_2 = \emptyset$. (Ω_1 – спам, Ω_2 – не спам). Формирование этих подмножеств может происходить вручную, то есть эксперты после работы с множеством документов мощности $|\Omega|$ говорят, что если документ d_i является спамом, то тогда он принадлежит множеству $d_i \in \Omega_1$. И наоборот, если документ не спам, то $d_i \in \Omega_2$.

Обозначим обучающее множество как $Q = \{(d_i, y_i)\}$, где $d_i \in \Omega$, $y_i \in C$. Классификатор Φ обучается индуктивно на основе выявленных характеристик документов [5].

Анализ метода построения классификатора. Построение классификатора будем проводить на основе метода опорных векторов (SVM – support vector machines) [6]. SVM – это набор схожих алгоритмов на основе обучения с учителем, применяющийся для анализа данных и распознавания образов в задачах классификации и регрессионном анализе. SVM является линейным классификатором. На основе обучающей выборки алгоритм помогает предсказать, в какую из двух заранее заданных категорий попадает элемент, подлежащий классификации.

Особым свойством SVM является непрерывное уменьшение эмпирической ошибки классификации и увеличение зазора, поэтому этот метод также известен как метод классификатора с максимальным зазором. SVM также считается очень перспективным для решения задач классификации (кластеризации) с использованием методов теории искусственного интеллекта.

Основная идея, используемая в SVM, это построение гиперплоскости или набора гиперплоскостей в пространстве более

высокой размерности и максимизация расстояния между построенной гиперплоскостью и классами обучающей выборки. Но в настоящее время еще не разработаны общие методы построения таких гиперплоскостей (спрямляющих пространств или ядер классификатора), наиболее подходящих для конкретной задачи. Построение адекватного ядра является искусством и, как правило, опирается на априорные знания о предметной области. На практике «вполне разумные» ядра классификатора, выведенные из содержательных соображений, далеко не всегда оказываются положительно определенными, что, естественно, не может не сказаться на качестве решения. Именно построению такой гиперплоскости посвящена данная статья.

Разработка алгоритма решения задачи защиты от спама на базе SVM. В задаче классификации информации для задачи защиты от спама необходимо определять, является ли данный документ спамом или нет. В предлагаемом подходе для решения этой задачи вводится система метрик. Пользователь разделяет свои письма и отмечает те, которые считает спамом, то есть строит обучающее множество Q . На основании этой информации строятся выпуклые оболочки в виде систем линейных неравенств. Первая система задает множество точек-документов, определяемых как спам. Вторая система – множество точек-документов, определяемых как не спам. Построив слой наибольшей толщины, разделяющий два многогранника, можно разработать процедуру, позволяющую автоматически разделять (классифицировать) документы на «хорошие» и «плохие». Получив новый документ и прочитав его характеристики, получаем точку в рассматриваемом пространстве. Если данная точка попадает в «плохое» полупространство, мы делаем предположение, что это спам; если в «хорошее» – не спам. Если точка попадает внутрь слоя, письмо

доставляется пользователю с пометкой «возможно, спам».

Для решения задачи сильной отделимости обычно применяют итерационный процесс, использующий операцию проектирования. Однако на практике применение этого метода существенно ограничено тем фактом, что далеко не всегда удается построить конструктивную формулу для вычисления проекции точки на выпуклое множество. Поэтому целесообразно произвести замену операции проектирования последовательностью фейеровских отображений [7].

Кроме того, алгоритмы разделения многогранников на основе фейеровских отображений обладают тем преимуществом по сравнению с проективными и другими известными методами, что они применимы к нестационарным задачам, т.е. к задачам, в которых исходные данные могут меняться в процессе решения задачи. Такой нестационарной задачей является, например, задача о спам-филт্রে.

А теперь рассмотрим алгоритмы для решения задачи сильной отделимости.

Пусть даны два выпуклых непересекающихся многогранника $M \subset R^n$ и $N \subset R^n$, заданные системами линейных неравенств:

$$M = \{x | Ax \leq b\} \neq \emptyset; N = \{x | Bx \leq d\} \neq \emptyset. \quad (1)$$

Задача сильной отделимости заключается в нахождении слоя наибольшей толщины, разделяющего M и N . Эта задача эквивалентна задаче отыскания расстояния между M и N в смысле метрики:

$$\rho(M, N) = \min \{ \|x - y\| \mid x \in M, y \in N \}. \quad (2)$$

Если $x_1 \in M$ и $y_1 \in N$ являются $\arg$ -точками задачи (2), то есть $\rho(M, N) = \|x_1 - y_1\|$, то слоем наибольшей толщины, разделяющим множества M и N , является:

$$P = \{x | x \in P_1 \cap P_2\},$$

где $\langle, \rangle$ – скалярное произведение двух векторов; P_1 и P_2 – полупространства, задаваемые линейными неравенствами:

$$\langle x - x_1, x_1 - y_1 \rangle \leq 0 \text{ и } \langle y - y_1, x_1 - y_1 \rangle \geq 0.$$

Следовательно, задачу сильной отделимости можно сформулировать так:

$$\{x_1, y_1\} = \text{Arg min} \{ \|x - y\| \mid x \in \mathbf{M}, y \in \mathbf{N} \}. \quad (3)$$

Задачу (3) можно решить при помощи известного алгоритма последовательного проектирования.

Рассмотрим алгоритм решения задачи сильной отделимости ($\mathfrak{R}$).

Даны два выпуклых непересекающихся многогранника $\mathbf{M} \subset \mathbf{R}^n$ и $\mathbf{N} \subset \mathbf{R}^n$, заданные системами линейных неравенств (1).

Обозначим отображение (проектирование) точки на $\mathbf{M}$ через $\pi_{\mathbf{M}}$, а на $\mathbf{N}$ – $\pi_{\mathbf{N}}$. Зададим произвольное начальное приближение $w_0 \in \mathbf{R}^n$. Выберем фиксированное положительное вещественное число ε . Тогда алгоритм решения задачи сильной отделимости будет состоять из следующих шести шагов.

Шаг 0. $k := 0$.

Шаг 1. $x_{k+1} := \pi_{\mathbf{M}}(w_k)$.

Шаг 2. $y_{k+1} := \pi_{\mathbf{N}}(w_k)$.

Шаг 3. $w_{k+1} := (x_{k+1} + y_{k+1})/2$.

Шаг 4. $k := k + 1$.

Шаг 5. Если $\min \{ \|x_{k+1} - x_k\|, \|y_{k+1} - y_k\| \} \geq \varepsilon$, то перейти к Шагу 1.

Шаг 6. Конец.

Если множества $\mathbf{M}$ и $\mathbf{N}$ достаточно просты в смысле реализации операции проектирования точек на них, то представленный алгоритм $\mathfrak{R}$ может быть использован на практике. Но если $\mathbf{M}$ и $\mathbf{N}$ – произвольные многогранники, то $\mathfrak{R}$ не может быть признан эффективным, так как не известен универсальный конструктивный метод построения проекции точки на многогранник. В этом случае решить задачу можно, если вместо операции проектирования использовать фейеровские отображения.

Дадим определение фейеровского отображения.

Пусть $\varphi : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$. Отображение φ называется *M-фейеровским*, если выполняются следующие два условия:

$$\varphi(y) = y, \forall y \in \mathbf{M}; \quad \|\varphi(x) - y\| < \|x - y\|, \\ \forall x \notin \mathbf{M}, y \in \mathbf{M}.$$

Класс *M-фейеровских* отображений обозначим через $\mathbf{F}_{\mathbf{M}}$.

Под фейеровским процессом, порожаемым однозначным *M-фейеровским* отображением $\varphi \in \mathbf{F}_{\mathbf{M}}$ при произвольном начальном приближении $x_0 \in \mathbf{R}^n$, будем понимать последовательность $\{\varphi^k(x_0)\}_{k=0}^{+\infty}$.

Известно [8], что в случае, когда однозначное *M-фейеровское* отображение φ является непрерывным, фейеровский процесс сходится к точке, принадлежащей множеству:

$$\mathbf{M}: \{\varphi^k(x_0)\}_{k=0}^{+\infty} \rightarrow \bar{x} \in \mathbf{M}.$$

Это означает, что для любого вещественного $\varepsilon > 0$ существует целое положительное число K , такое, что для всех $k > K$ имеем $\|x_k - \bar{x}\| < \varepsilon$.

Спроектируем *M-фейеровское* отображение, согласно [8]. Представим систему линейных неравенств, задающих многогранник $\mathbf{M}$ в виде:

$$\mathbf{M} = \{x \mid Ax \leq b : l_j(x) = \langle a_j, x \rangle - b \leq 0, j=1, \dots, m\},$$

где $\langle a_j, x \rangle > 0$ для любого j . Зададим $l_j^{plus}(x)$ следующим образом:

$$l_j^{plus}(x) = \max \{ l_j(x), 0 \}, j = 1, \dots, m.$$

Тогда отображение вида:

$$\varphi(x) = x - \sum_{j=1}^m (a_j)^2 \lambda_j \frac{l_j^{plus}(x)}{\|a_j\|^2}$$

будет *M-фейеровским* для любой системы положительных коэффициентов $\{a_j > 0\}, j = 1, \dots, m$, таких, что $\sum_{j=1}^m a_j = 1$ и коэффициентов релаксации $0 < l_j < 2$.

Аналогичным образом сконструируем *N-фейеровское* отображение ψ . Используя отображения φ и ψ можно построить алгоритм, решающий задачу сильной отделимости с использованием фейеровских отображений.

Определение. Пусть задано однозначное непрерывное отображение $\varphi \in \mathbf{F}_M$. Под φ -проектированием (псевдопроектированием) точки $x \in \mathbf{R}^n$ на множество $\mathbf{M}$ будем понимать отображение $\pi_M^\varphi: \mathbf{R}^n \rightarrow M$, задаваемое соотношением $\pi_M^\varphi(x) = \lim_{k \rightarrow \infty} \varphi^k(x)$. Точку $\pi_M^\varphi(x)$ будем называть псевдопроекцией точки x на множество $\mathbf{M}$.

Предположим, что в контексте решения задачи (3) существуют два однозначных непрерывных фейеровских отображения $\varphi \in \mathbf{F}_M$ и $\psi \in \mathbf{F}_N$. Используя операции φ - и ψ -проектирования, построим алгоритм $\hat{A}$, решающий задачу сильной отделимости с использованием фейеровских отображений.

Алгоритм $\hat{A}$. Зададим произвольное начальное приближение $w_0 \in \mathbf{R}^n$. Выберем фиксированное положительное вещественное число ε . Тогда алгоритм решения задачи сильной отделимости с использованием фейеровских отображений будет состоять из следующих шести шагов.

Шаг 0. $k := 0$.

Шаг 1. $x_{k+1} := \pi_M^\varphi(w_k)$.

Шаг 2. $y_{k+1} := \pi_N^\psi(w_k)$.

Шаг 3. $w_{k+1} := (x_{k+1} + y_{k+1})/2$.

Шаг 4. $k := k + 1$.

Шаг 5. Если $\|w_{k+1} - w_k\| \geq \varepsilon$, то перейти к Шагу 1.

Шаг 6. Конец.

Основной вопрос при обосновании применимости алгоритма $\hat{A}$ к задаче классификации информации заключается в доказательстве сходимости этого алгоритма к требуемому решению.

Обычно для обоснования сходимости алгоритма $\hat{A}$ необходимо более сильное свойство, чем просто фейеровость отображения φ , а именно локально-сильное фейеровское отображение [9]. В этом случае сходимость алгоритма строго доказана [9].

Очевидно, что в алгоритме $\hat{A}$ ресурсоемкими являются Шаг 1 и Шаг 2. На каждом из этих шагов реализуется *последо-*

вательный фейеровский процесс, в результате которого получаем *псевдопроекцию* точки на многогранник. Многогранник, задаваемый системой линейных неравенств, всегда является выпуклым замкнутым множеством, то есть всегда существует решение.

А теперь рассмотрим алгоритм создания обучающей выборки.

Будем производить действия по следующему алгоритму.

1. Берем обучающее множество Ω и считываем его термы. Получаем множество термов:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_p\}, p = 1, \dots, |T|, T = \bigcup d_i, i = 1, \dots, |D|.$$

2. Проводим лексикографическое упорядочивание множества, то есть преобразуем T в T_{base} , т. е.

$$T \rightarrow T_{base}, |T_{base}| \leq |T|, L_{base} = |T_{base}|.$$

3. На базе обучающего множества Ω формируется частотный словарь слов (термов) $Datatable$, в котором каждому $t_i \in T_{base}, i = 1, \dots, |L_{base}|$ соответствуют числа: v_{1i} – частота встречаемости в Ω_1 и v_{2i} – частота встречаемости в Ω_2 , $Datatable = \{t_1, v_{11}, v_{12}, t_2, v_{21}, v_{22}, \dots, t_r, v_{r1}, v_{r2}\}$, $r = L_{base}$.

4. Берем последовательно все документы $d_i \in \Omega_1, i = 1, \dots, |\Omega_1|$.

5. Считываем все термы из документа d_i : $TT = \{tt_1, \dots, tt_k\}, k = |d_i|$.

6. Проводим лексикографическое упорядочивание множества TT , то есть преобразуем TT в TT_{base} , т. е. $TT \rightarrow TT_{base}, |TT_{base}| \leq |TT|, l_{base} = |TT_{base}|$.

7. На базе множеств T_{base}, TT_{base} , частотного словаря и вектора признаков формируем вектор:

$$x_i = \{v_{11}, v_{12}, v_{21}, v_{22}, \dots, v_{p1}, v_{p2}, sv_1, \dots, sv_n\},$$

где $p = L_{base}$ и $v_{ij} = 0$, если $tt_i \in TT \cap T_{base} = \emptyset$.

Обозначим множество векторов x_i через $X = \{x_i\}, i = 1, \dots, |\Omega_1|$. Получили множество, соответствующее спаму.

8. Повторяем шаги 4 – 7, но только для множества Ω_2 . Обозначим множество, полученное на шаге 8 через Y . Получили множество, соответствующее не спаму.

9. Строим по алгоритму $\hat{A}$ разделяющую гиперплоскость между X и Y . Получили нормальный вектор к гиперплоскости w и параметр b (порог классификации).

10. Строим классифицирующую функцию Φ' .

Окончательно алгоритм определения спамности документа выглядит так.

1. Берем документ $d_i \in D \setminus \Omega$, $i=1, \dots, |D \setminus \Omega|$.

2. Считываем все термины из документа d_i : $TT = \{tt_1, \dots, tt_k\}$, $k = |d_i|$.

3. Проводим лексикографическое упорядочивание множества TT , то есть преобразуем TT в $TT_{base} : TT \rightarrow TT_{base}$, $|TT_{base}| \leq |TT|$, $l_{base} = |TT_{base}|$.

4. Определяем множество признаков для данного документа. Если данный признак не определен, то присваиваем $sv_i = 0$.

5. На базе множеств T_{base} , TT_{base} , частотного словаря и множества признаков формируем вектор

$x = \{v_{11}, v_{12}, v_{21}, v_{22}, \dots, v_{p1}, v_{p2}, sv_1, \dots, sv_n\}$, где $p = l_{base}$, $v_{ij} = 0$, если $tt_i \in TT \cap T_{base} = \emptyset$.

6. Определяется спамность документа d_i при помощи классификатора:

$$\Phi'(x) = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b).$$

Заключение. Разработанный алгоритм определения спамности документа или классификации, конечно же, имеет свои недостатки. Попытки построить для решения задачи классификации один алгоритм, удовлетворяющий всех, заранее обречены на провал. Поэтому имеет смысл объединить несколько алгоритмов в композицию в надежде на то, что погрешности различных алгоритмов взаимно компенсируются. Но в этом случае возникает масса вопросов. Например, при каких условиях качество композиции окажется лучше, чем у отдельных базовых алгоритмов? Как настраивать базовые алгоритмы, учитывая, что они будут работать в составе композиции? Возможно ли

приспособить для их настройки стандартные методы обучения? Как обойтись минимальным числом базовых алгоритмов?

Формально эти вопросы можно записать следующим образом.

Пусть имеется задача обучения по прецедентам $\{X, Y, y^*, X', Y'\}$,

где X – множество объектов; Y – множество ответов; $y^* : X \rightarrow Y$ – отображение (неизвестная целевая зависимость); $X' = (x_1, \dots, x_l)$ – обучающая выборка; $Y' = (y_1, \dots, y_l)$ – вектор ответов на обучающих объектах, $y_i = y^*(x_i)$.

Требуется построить алгоритм $alg: X \rightarrow Y$, аппроксимирующий целевую зависимость y^* на всём множестве X .

Введем множество R , называемое пространством оценок [9]. Рассмотрим алгоритмы, имеющие вид суперпозиции:

$$alg(x) = \Pi(b(x)),$$

где $b : X \rightarrow R$ – алгоритмический оператор, $\Pi : R \rightarrow Y$ – решающее правило.

Многие алгоритмы классификации имеют именно такую структуру: сначала вычисляются оценки принадлежности объекта категориям (классам), а затем решающее правило переводит эти оценки в номер класса. Значение оценки, как правило, характеризует степень уверенности классификации. В одних алгоритмах это вероятность принадлежности объекта заданному классу, в других – расстояние от объекта до разделяющей поверхности. Возможны и другие интерпретации оценок. В статье был использован вариант:

$$Y = \{-1, +1\}, \Pi(z) = \text{sign}(z), \\ alg(x) = \Phi'(x) = \text{sign}(\langle w, x \rangle + b).$$

Так вот, разработкой теоретических положений построения

$$alg(x) = \Pi(b(x))$$

и будут посвящены дальнейшие научные исследования, которые позволят повысить эффективность фильтрации спама.

Список литературы

1. Коробейников, А.Г. Алгоритм распознавания трехмерных изображений с высокой детализацией / А.Г. Коробейников, П.А. Кудрин, И.Г. Сидоркина // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2010. – № 2 (9). С. 91-99.
2. Гришенцев, А.Ю. Декомпозиция N-мерных цифровых сигналов по базису прямоугольных всплесков / А.Ю. Гришенцев, А.Г. Коробейников // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2012. – № 4 (80). – С. 75-79.
3. Халмош, П. Гильбертово пространство в задачах / П. Халмош; Перевод с английского И. Д. Новикова и Т. В. Соколовской; под ред. Р. А. Минлоса. – М.: Издательство «Мир», 1970. – 352 с.
4. Ерёмин, И.И. Фейеровские методы сильной отделимости выпуклых полиэдральных множеств / И.И. Ерёмин // Известия вузов. Сер.: Математика. – 2006. – № 12. – С. 33-43.
5. Лифшиц, Ю. Классификация текстов. Алгоритмы для Интернета. 2005. URL: <http://yury.name/internet> (дата обращения: 15.06.2013)
6. Fan, R.-E. Working set selection using second order information for training SVM / R.-E. Fan, P.-H. Chen, C.-J. Lin // Journal of Machine Learning Research. – 2005. – Vol. 6. – Pp. 1889–1918.
7. Ерёмин, И.И. Нестационарные процессы математического программирования / И.И. Ерёмин, В.Д. Мазуров. – М.: Наука, 1979. – 288 с.
8. Ерёмин, И.И. Теория линейной оптимизации / И.И. Ерёмин. – Екатеринбург: УрО РАН, 1999. – 312 с.
9. Нурминский, Е.А. Использование дополнительных малых воздействий в фейеровских моделях итеративных алгоритмов / Е.А. Нурминский // Журнал вычислительной математики и математической физики. – 2008. – Т. 48. – № 12. – С. 2121–2128.

References

1. Korobeynikov A. G., Kudrin P. A., Sidorikina I. G., Algorithm raspoznavaniya trekhmernykh izobrazheniy s vysokoi detalizatsiei [The Algorithm of the Recognition of Three-dimensional Images with High Resolution]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser.: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 2 (9). P. 91-99.
2. Grishentsev A. Yu., Korobeynikov A. G. Dekompozitsiya N-mernykh tsifrovyykh signalov po bazisu pryamougol'nykh vspleskov [Decomposition of N-dimensional Digital Signals on the Basis of Square Bursts] Nauchno-tekhnicheskiiy vestnik informatsionnykh tekhnologiy, mekhaniki i optiki [Scientific and Technical Vestnik of Information Technologies, Mechanics and Optics]. 2012. No 4 (80). P. 75-79.
3. Halmosh P. Gil'bertovo prostranstvo v zadachakh [Hilbert Space in Sums]. Translation from English I. D. Novikov and T. V. Sokolovskaya; edited by R. A. Minlos. Moscow, «Mir», 1970. – 352 p.
4. Eremin I. I. Feierovskie metody sil'noi otделимости выпуклых polyedral'nykh mnozhestv [Fejer Methods of Strong Separability of Convex Polyhedral Sets] Izvestiya vuzov. Ser.: matematika. [University News. Ser.: Mathematics]. 2006. No 12. P. 33-43.
5. Lifshits Yu. Klassifikatsiya tekstov. Algoritmy dlya Interneta [Text classification. Algorithms for the Internet]. – 2005. URL: <http://yury.name/internet>. (Access date: 15.06.2013)
6. Fan R.-E., Chen P.-H., Lin C.-J. Working set selection using second order information for training SVM. Journal of Machine Learning Research. 2005. Vol. 6. Pp. 1889–1918.
7. Eremin I. I., Mazurov V. D. Nestatsionarnye protsessy matematicheskogo programmirovaniya [Nonstationary Processes of Mathematical Programming]. Moscow, Nauka, 1979. 288 p.
8. Eremin I. I. Teoriya lineinoy optimizatsii [Linear Optimization Theory]. Ekaterinburg, The Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 1999. 312 p.
9. Nurminsky E. A. Ispol'zovanie dopolnitel'nykh malykh vozdeystviy v feierovskikh modelyakh iterativnykh algoritmov. [The Use of Additional Small Effects in Fejer Models of Iterative Algorithms]. Zhurnal vychislitel'noy matematiki i matematicheskoy fiziki. [Computational Mathematics and Mathematical Physics]. 2008. Vol. 48. No 12. P. 2121-2128.

10. Журавлёв, Ю. И. Об алгебраическом подходе к решению задач распознавания или классификации // Проблемы кибернетики. – 1978. – Т. 33. – С. 5–68. <http://www.ccas.ru/frc/papers/zhuravlev78prob33.pdf> (дата обращения: 15.06.2013)

10. Zhuravlev Yu. I. Ob algebroicheskom podkhode k resheniyu zadach paspoznavaniya ili klassifikatsii. Problemy kibernetiki [About Algebraic Approach to the Problem Solving of Recognition or Classification. Cybernetics Problems]. 1978. Vol. 33. P. 5-68. <http://www.ccas.ru/frc/papers/zhuravlev78prob33.pdf>. (Access date: 15.06.2013).

Статья поступила в редакцию 27.06.13.

КОРОБЕЙНИКОВ Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке, Санкт-Петербургский филиал Государственного бюджетного учреждения науки Института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В.Пушкова Российской академии наук (СПбФ ИЗМИРАН) (Российская Федерация, Санкт-Петербург). Область научных интересов – защита информации, математика, математическое моделирование, САПР, геомагнетизм. Автор 280 публикаций.

E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

БЛИНОВ Станислав Юрьевич – аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Российская Федерация, Санкт-Петербург). Область научных интересов – защита информации, теория игр. Автор 10 публикаций.

E-mail: stasblino@yandex.ru

ЛЕЙМАН Альберт Владимирович – аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Российская Федерация, Санкт-Петербург). Область научных интересов – защита информации, теория игр. Автор 10 публикаций.

E-mail: allxxl@yandex.ru

МАРКИНА Галина Леонидовна – начальник отдела информационного сопровождения открытых конкурсов для государственных и муниципальных нужд, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Российская Федерация, Санкт-Петербург). Область научных интересов – защита информации, САПР. Автор трёх публикаций.

E-mail: lina@mail.ifmo.ru

КУТУЗОВ Илья Михайлович – студент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (Российская Федерация, Санкт-Петербург). Область научных интересов – защита информации. Автор пяти публикаций.

E-mail: formalizator@gmail.com

KOROBAYNIKOV Anatoly Grigoryevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor and Deputy Director for Science, St. Petersburg Branch of the State Budget Science Establishment of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation named after N. V. Pushkov of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN) (Russian Federation, St. Petersburg). The sphere of scientific interests is information security, Mathematics, Mathematic Modeling, CAD, Geomagnetism. The author of 280 publications.

E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

BLINOV Stanislav Yuryevich – a postgraduate student at St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (Russian Federation, St. Petersburg). The sphere of scientific interests is information security, game theory. The author of 10 publications.

E-mail: stasblino@yandex.ru

LEIMAN Albert Vladimirovich – a postgraduate student at St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (Russian Federation, St. Petersburg). The sphere of scientific interests is information security, game theory. The author of 10 publications.

E-mail: allxxl@yandex.ru

MARKINA Galina Leonidovna – the head of the department of the information support of open competitions for state and municipal needs at St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (Russian Federation, St. Petersburg). The sphere of scientific interests is information security, CAD. The author of 3 publications.

E-mail: lina@mail.ifmo.ru

KUTUZOV Ilya Mikhailovich – a student at St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (Russian Federation, St. Petersburg). The sphere of scientific interests is information security. The author of 5 publications.

E-mail: formalizator@gmail.com

*A. G. Korobeynikov, S. Yu. Blinov,
A. V. Leyman, G. L. Markina, I. M. Kutuzov*

ALGORITHM OF SPAM DOCUMENT DETECTION ON THE BASIS OF FEJER MAPPINGS

Key words: *information classification; spam; problems of strong separability; Hilbert space.*

The problem of unwanted information (spam) filtering in e-mail messages is investigated in the work. The methods of this problem solution on the basis of the support vector method are analyzed. The given problem is reduced to the problem of strong separability, consisting in finding the layer of maximum thickness, dividing two convex nonintersecting polyhedrons. For the solution of the problem of strong separability, the iterative process, using a design operation is usually used. But in practice the application of this method is considerably limited by the fact that one doesn't always succeed in creating a constructive formula for calculating the point projection on a convex set. The disadvantages of the existing algorithm are considered. The modification of the creation of a separating hyperplane with the use of Fejer mappings is suggested. The algorithm modification with the help of the substitute of design operation for the sequence of Fejer mappings is suggested. It allows working with nonstationary data characteristic of document classification problems. Besides, the algorithm of the creation of a learning sample, on which basis the separating hyperplane is built is suggested.

УДК 621.391

Р. Г. Хафизов, Т. В. Яранцева, Т. П. Киселева, А. М. Суслова**РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ СО СЛУЧАЙНОЙ ФОРМОЙ**

Рассмотрен подход к формированию модели контура изображения со случайной формой. При этом контур представлен как комплексная случайная функция, заданная совокупностью возможных реализаций. Предложена методика распознавания изображений со случайной формой.

Ключевые слова: контур; форма изображения; статистическая модель; линейные преобразования; распознавание.

Введение. Форма значительного числа окружающих нас объектов случайна. Примерами случайных изображений могут быть изображения органов человека, облачности, листьев деревьев, профиля лица человека и т.п. Существенная вариативность формы таких изображений не позволяет рассматривать их как зашумленные изображения некоторых эталонных объектов [1].

Традиционно задача распознавания изображений решается на основе процедуры пространственной корреляции. Этот подход неизбежно связан со следующими недостатками: чувствительностью алгоритмов к изменению масштаба и взаимной угловой ориентации анализируемых изображений, а также с обработкой большого количества точек изображений. Если параметры угла поворота $\Delta\varphi$ и масштаба $|\mu|$ неизвестны, то при распознавании изображений требуется перебор каждой комбинации этих параметров, что приводит к значительным временным затратам.

В работе [1] предложен подход к решению данной задачи на основе метода контурного анализа. Из-за небольшого, по сравнению со всеми изображениями, количества контурных точек, временные затраты при этом снижаются [2]. Предложены полиномиальная и марковская модели случайных дискретных контуров.

Первая из них предполагает независимость элементарных векторов (ЭВ) $\gamma(n)$ контура $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0,s-1}$ и известную вероятность $P(\gamma(n))$ появления каждого из них. Во втором случае устанавливается зависимость между случайными величинами $\gamma(n)$. При этом изменение масштаба $|\mu|$ и (или) угла поворота $\Delta\varphi$ приводит к изменению размерности контура и, как следствие, к зависимости элементов матрицы вероятностей переходов от параметров этих преобразований.

Целью данной работы является разработка модели изображения со случайной формой и на её основе методики распознавания.

Модель контура изображения со случайной формой. При анализе изображений со случайными формами контур представим как комплексную случайную функцию $X(l) = \text{Re}(X(l)) + i \text{Im}(X(l))$, т.е. как функцию неслучайного аргумента l , которая при каждом фиксированном значении аргумента является комплексной случайной величиной [3,4]. Здесь $\text{Re}(X(l))$ и $\text{Im}(X(l))$ – действительные случайные функции действительного аргумента l . Комплексную случайную функцию $X(l)$ будем рассматривать как совокупность её возможных реализаций (траекторий) $\chi_1(l), \chi_2(l), \dots, \chi_n(l)$ (рис.1).



Рис. 1. Примеры контуров изображений со случайной формой, образующих совокупность реализаций случайного контура $X(l)$

Математическое ожидание $m_X(l)$ случайного контура $X(l)$ есть неслучайная комплексная функция, значение которой при каждом фиксированном значении аргумента l равно математическому ожиданию сечения, соответствующего этому же фиксированному значению аргумента: $m_X(l) = M[X(l)]$. При этом $m_X = m_{\text{Re}(X)} + im_{\text{Im}(X)}$. Геометрически математическое ожидание случайного контура можно истолковать как «средний контур», около которого расположены другие контуры – реализации. При фиксированном значении аргумента математическое ожидание есть среднее значение сечения («средняя ордината»), вокруг которого расположены его возможные значения (ординаты) [5].

Дисперсия $D_X(l)$ случайного контура $X(l)$ есть неслучайная неотрицательная функция, значение которой при каждом фиксированном значении аргумента l равно дисперсии сечения, соответствующего этому же фиксированному значению

аргумента: $D_X(l) = D[X(l)]$. При этом

$$D_X(l) = M[|\dot{X}(l)|^2], \text{ где } \dot{X}(l) = X(l) - m_X(l)$$

– центрированная функция. Дисперсия характеризует степень рассеяния возможных реализаций (контуров) вокруг математического ожидания случайного контура («среднего контура»). При фиксированном значении аргумента дисперсия характеризует степень рассеяния возможных значений сечения вокруг математического ожидания сечения (рис. 2).

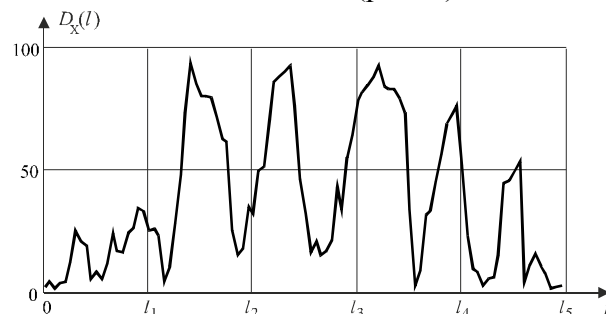


Рис. 2. Дисперсия комплексного случайного контура $X(l)$, представленного реализациями, показанными на рис. 1

При двух фиксированных значениях аргумента, например при $l = l_1$ и $l = l_2$, получим два сечения – систему двух комплексных случайных величин $\mathbf{X}(l_1)$ и $\mathbf{X}(l_2)$ с корреляционным моментом $M[\dot{\mathbf{X}}(l_1)\overline{\dot{\mathbf{X}}(l_2)}]$. Корреляционной функцией комплексного случайного контура $\mathbf{X}(l)$

назовём неслучайную функцию $K(l_1, l_2)$ двух независимых аргументов l_1 и l_2 , значение которой при каждой паре фиксированных значений аргументов равно корреляционному моменту сечений, соответствующих этим же фиксированным значениям аргументов:

$$K_{\mathbf{X}}(l_1, l_2) = M[\dot{\mathbf{X}}(l_1)\overline{\dot{\mathbf{X}}(l_2)}].$$

На рис. 3 представлена корреляционная функция $K(l_1, l_2)$ комплексного случайного контура $\mathbf{X}(l)$, представленного реализациями на рис. 1.

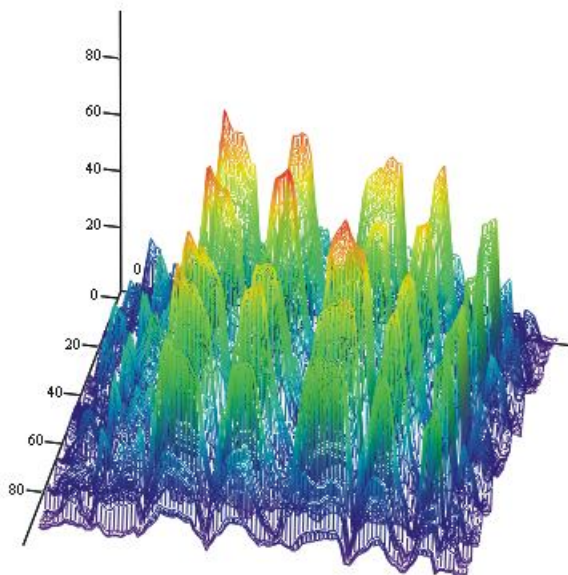
Нормированной корреляционной функцией $\rho_{\mathbf{X}}(l_1, l_2)$ случайного контура

$\mathbf{X}(l)$ назовём неслучайную функцию двух независимых переменных l_1 и l_2 , значение которой при каждой паре фиксированных значений аргументов равно коэффициенту корреляции сечений, соответствующих этим же фиксированным значениям аргументов [5]:

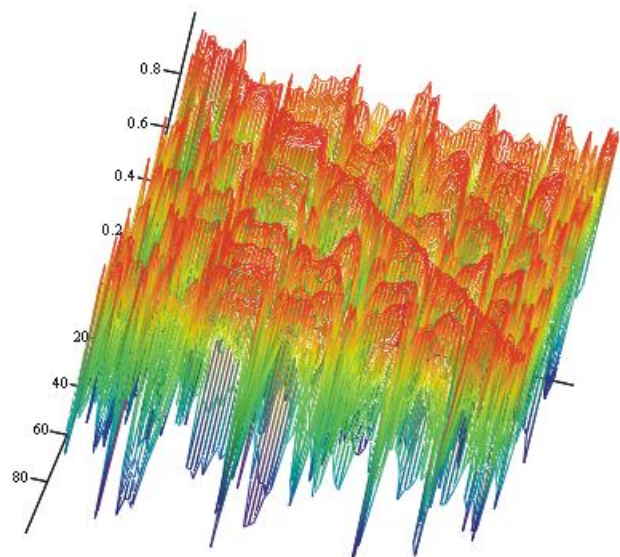
$$\rho_{\mathbf{X}}(l_1, l_2) = \frac{K_{\mathbf{X}}(l_1, l_2)}{D_{\mathbf{X}}(l_1)D_{\mathbf{X}}(l_2)}.$$

На рис. 3, б представлен результат нормирования корреляционной функции, показанной на рис. 3, а.

При формировании модели контура со случайной формой требуется обеспечить равенство между собой значений параметров линейных преобразований контуров его реализаций. Они должны иметь одинаковый масштаб $|\mu|$, нулевое значение угла $\Delta\varphi$ взаимного поворота и совпадающие положения начальных точек a_0 . Выравнивание этих параметров должно производиться в процессе формирования модели контура со случайной формой.



а)



б)

Рис. 3. Корреляционная (а) и нормированная (б) функции комплексного случайного контура

Процедуру формирования модели контура со случайной формой определим следующим образом. Пусть $|\eta_{jk}(l)|$ – модуль взаимокорреляционной функции контуров $Y_{j,n}$ и $Y_{k,n}$ изображений W_j и W_k , причем $|\eta_{jk}(l_0)|$ – максимальное значение этого модуля, т.е. $|\eta_{jk}(l_0)| = |\eta_{jk}|_{\max}$. Сдвинем начальную точку a_0 одного из изображений на величину l_0 таким образом, чтобы отсчёт взаимокорреляционной функции $|\eta_{jk}(0)|$ стал максимальным, т.е. чтобы $|\eta_{jk}(0)| = |\eta_{jk}|_{\max}$.

Далее осуществляется коррекция угла взаимного поворота $\Delta\varphi = \arctg \frac{\text{Im}\eta_{jk}(l_0)}{\text{Re}\eta_{jk}(l_0)}$.

В результате проведения перечисленных операций над контурами $Y_{j,n}$ и $Y_{k,n}$ они будут оптимально совмещены по критерию максимальной схожести [1, 4].

На рис. 4 представлены полученные в результате преобразований реализации

$\chi_1(l), \chi_2(l), \chi_3(l), \chi_4(l)$ случайного контура $X(l)$ и контур математического ожидания. Таким образом, случайный контур $X(l)$ задаётся своими реализациями $\chi_1(l), \chi_2(l), \dots, \chi_n(l)$ с учётом параметров взаимного угла поворота и сдвига начальной точки. Для случайного контура $X(l)$ определены контур математического ожидания, дисперсия и корреляционная функция.

Распознавание контуров изображений со случайной формой. Рассмотрим задачу распознавания зашумленных контуров со случайной формой. Пусть $X_{(1)}, X_{(2)}, \dots, X_{(M)}$ – случайные контуры, характеризующие соответственно классы $A_1, A_2, \dots, A_M$. На устройство распознавания подается зашумленная реализация, принадлежащая одному из классов: $Y_{(k)} = X_{(k)} + Z$, где Z – шумовой контур. При этом параметры масштаба $|\mu|$, угла поворота $\Delta\varphi$ и сдвига начальной точки d предполагаются неизвестными.

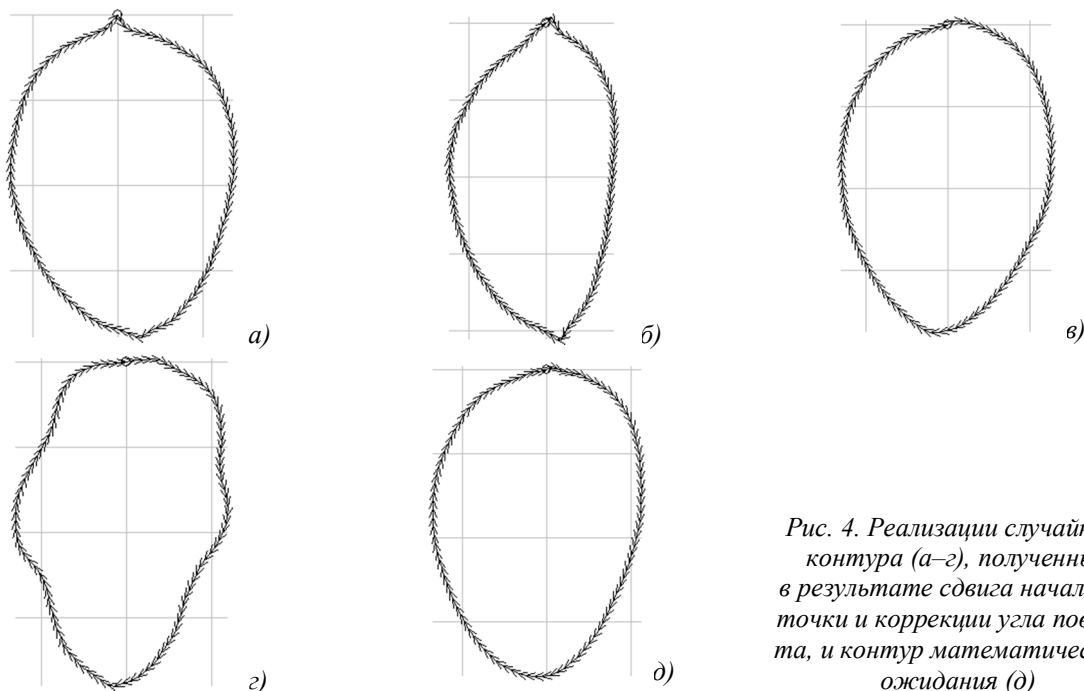


Рис. 4. Реализации случайного контура (а–в), полученные в результате сдвига начальной точки и коррекции угла поворота, и контур математического ожидания (д)

Задача распознавания состоит в обоснованном отнесении зашумленного контура Y к одному из классов $A_1, A_2, \dots, A_M$. Для принятия решения необходимо сформировать безусловное отношение правдоподобия и сравнить его с пороговым значением. Функция правдоподобия контура $Y_{(k)}$ имеет вид

$$\Lambda(Y, |\mu_{(k)}|, \Delta\varphi_{(k)}, d_{(k)}) = c \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2\sigma^2} \left[\|Y\|^2 + \|X_{(k)}\|^2 - 2\operatorname{Re}(Y, X_{(k)}) \right] \right\}.$$

Логарифм условного отношения правдоподобия запишется как

$$\begin{aligned} \ln \left[L(Y, |\mu_{(k)}|, |\mu_{(w)}|, \Delta\varphi_{(k)}, \Delta\varphi_{(w)}, d_{(k)}, d_{(w)}) \right] = \\ = -\frac{1}{2\sigma^2} \left\{ \|X_{(k)}\|^2 - \|X_{(w)}\|^2 - \right. \\ \left. - 2[\operatorname{Re}(Y, X_{(k)}) - \operatorname{Re}(Y, X_{(w)})] \right\}. \end{aligned}$$

Если на вход распознающего устройства подается зашумленный контур из некоторого алфавита объемом M классов, то алгоритм распознавания предусматривает многоканальную по числу классов процедуру. В каждом канале находится фильтр, согласованный с эталонным контуром класса, и устройство, вырабатывающее мгновенное значение с максимальным модулем. Далее отмечается канал, модуль мгновенного значения на выходе которого превышает модули выходных сигналов остальных каналов. Если величина максимального модуля больше порогового значения, то распознаваемый контур относится к классу, номер которого равен номеру канала [6–8].

Для исследования характеристик распознавания изображений со случайной формой было сформировано шесть классов изображений, образованных десятью реализациями каждый (рис. 5).

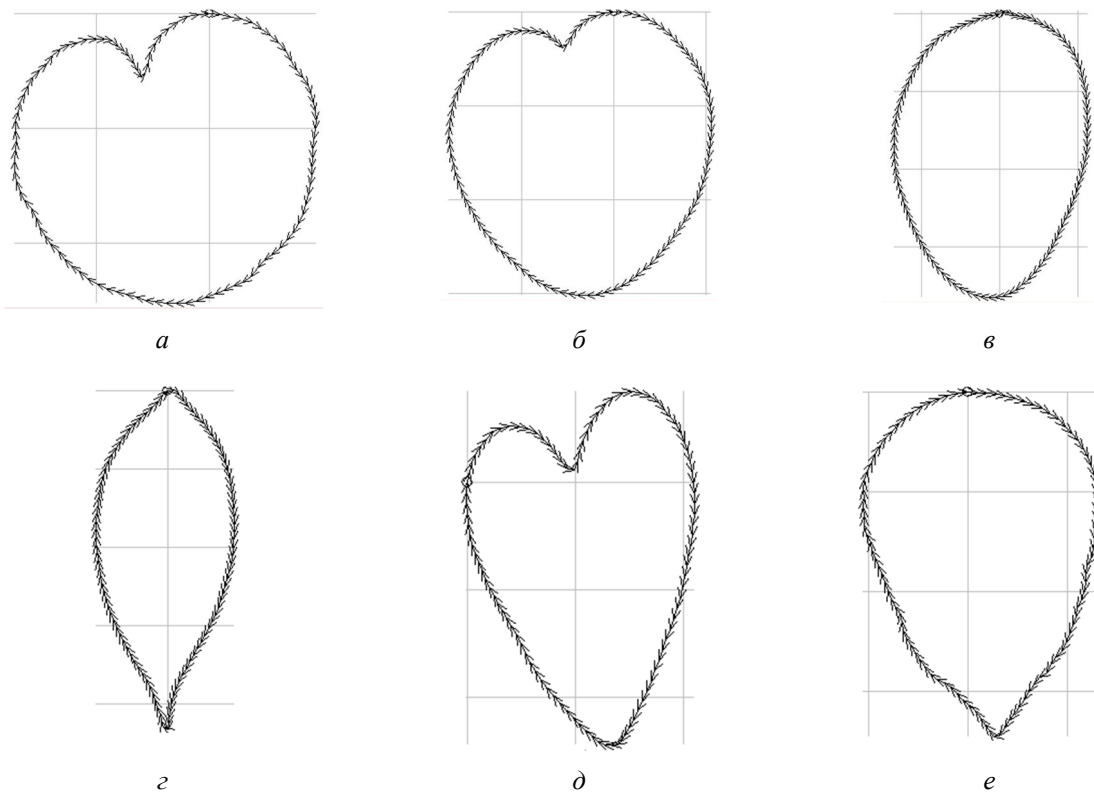


Рис. 5. Контурные математических ожиданий случайных контуров типа: а – «Герань», б – «Цикламен», в – «Фигус 1», г – «Фигус 2», д – «Листок», е – «Роза»

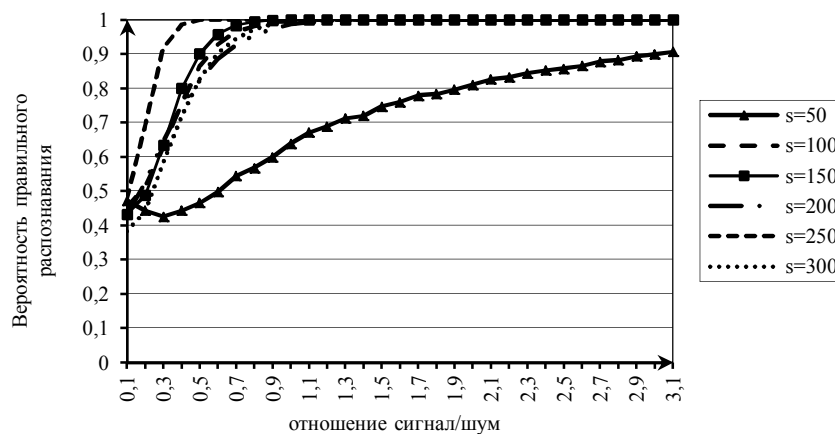


Рис. 6. Вероятность правильного распознавания $P_{пр}$ зашумленного контура типа «Листок» от отношения сигнал/шум при разных размерностях контуров

На рис. 6 приведены графики зависимости вероятности правильного распознавания $P_{пр}$ зашумленного контура типа «Листок» от отношения сигнал/шум при размерности контуров s , равных 50, 100, 150, 200, 250 и 300.

Увеличение вероятности $P_{пр}$ при распознавании зашумленных контуров при возрастании их размерности s объясняется более точным представлением контуров изображений.

На рис. 7 приведены графики зави-

симости вероятности правильного распознавания $P_{пр}$ зашумленного контура типа «Фигус 1» от отношения сигнал/шум при объеме алфавита M , равного 2, 3, 4, 5 и 6.

Снижение вероятности $P_{пр}$ при распознавании зашумленных контуров, связанное с увеличением количества M классов, объясняется возрастанием количества параллельно работающих каналов, для каждого из которых может быть принято ошибочное решение о распознавании.

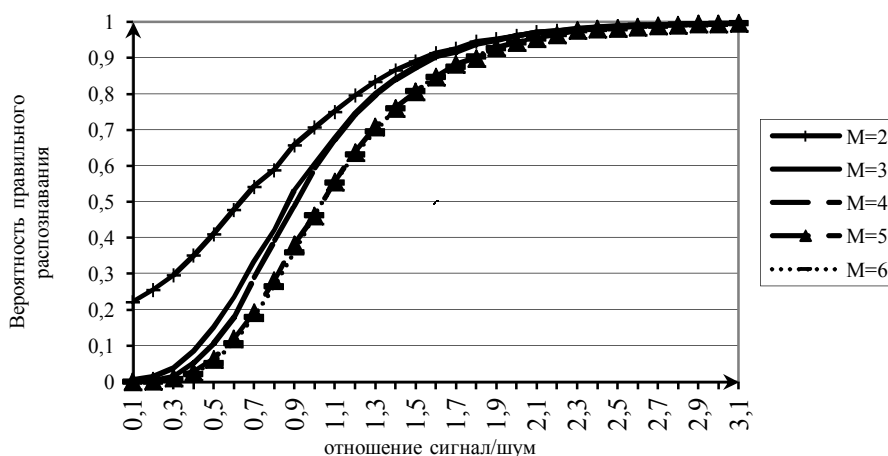


Рис. 7. Вероятность правильного распознавания $P_{пр}$ зашумленного контура типа «Фигус 1» от отношения сигнал/шум при разных объемах алфавита

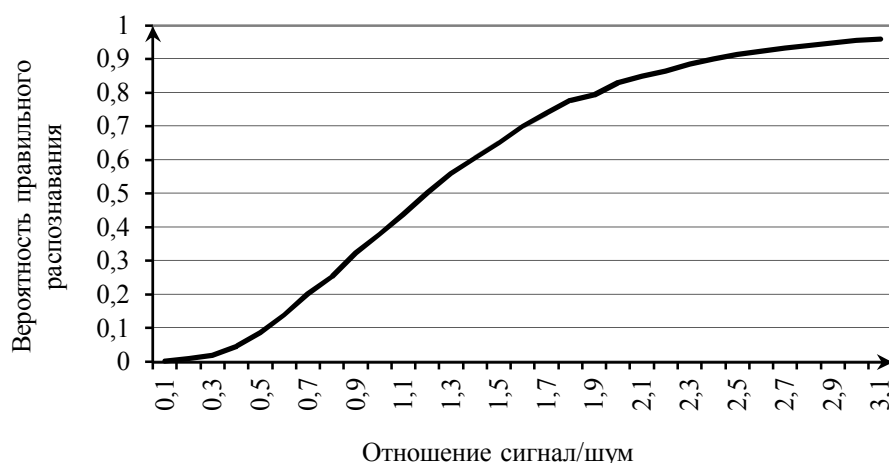


Рис. 8. Характеристика распознавания контура, не использованного при формировании моделей случайного контура «Цикламен»

Рассмотрены случаи, когда на распознавание подаются контуры, не использованные в формировании моделей случайного контура. На рис. 8 представлена характеристика распознавания контура типа «Цикламен».

Заключение. В работе рассмотрен подход к формированию модели контура изображения со случайной формой. При этом контур представлен как комплексная случайная функция и задан как совокупность возможных реализаций. Для случайного контура $X(l)$ определены контур математического ожидания, дисперсия и корреляционная функция.

Список литературы

1. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я.А. Фурман, А. В. Кривецкий, А.К. Передреев и др.; под ред. А. Я. Фурмана. – М.: Физматлит, 2002. – 588 с. : ил.
2. Фурман, Я.А. Контурный анализ сигналов и изображений в инфокоммуникационных системах / Я.А. Фурман, Р.Г. Хафизов, А.А. Роженцов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – № 2 (16). – С. 29-63.
3. Хафизов, Р.Г. Анализ непрерывных комплекснозначных сигналов, задающих контуры изображений плоских объектов / Р.Г. Хафизов //

Показано, что условием формирования модели контура со случайной формой является равенство между собой значений параметров линейных преобразований (масштабирование, угол поворота и сдвиг начальной точки) контуров его реализаций.

Получены характеристики распознавания контуров изображений со случайной формой. Показано, что при увеличении размерности контуров происходит увеличение вероятности правильного распознавания. Увеличение же количества объема алфавита при распознавании приводит к снижению вероятности правильного распознавания.

References

1. Vvedenie v konturnyi analiz i ego prilozheniya k obrabotke izobrazheniy i signalov [Introduction to Contour Analysis and its Image and Signal Processing Application]. Ya.A. Furman, A.V. Krevetsky, A.K. Peredreev and others]; edited by Ya. A. Furman. Moscow, Fizmatlit, 2002. 588 p.: il.
2. Furman Ya. A., Hafizov R. G., Rozhentsov A.A. Konturnyi analiz signalov i izobrazheniy v infokommunikatsionnykh sistemakh [Contour Analysis of Signals and Images in Infocommunication Systems]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser.: Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2012. No 2 (16). P. 29-63.
3. Hafizov R.G. Analiz nepreryvnykh kompleksnoznachnykh signalov, zadayushchikh kontury izobrazheniy ploskikh ob'ektov [Analysis of Continu-

Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева. – 2006. – № 4. – С. 24-27.

4. *Хафизов, Р.Г.* Статистическая модель изображений со случайной формой / Р.Г. Хафизов, А. М. Суслова, Т. П. Киселева // Сборник материалов XI междунар. науч.-техн. конф. «Опτικο-электронные приборы и устройства в системах распознавания образов, обработки изображений и символической информации» (Распознавание – 2013). – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – С. 112-115.

5. *Гмурман, В. Е.* Теория вероятностей и математическая статистика: Учеб. пособие для вузов / В. Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 423 с.: ил.

6. *Хафизов, Р.Г.* Дискретизация непрерывных контуров изображений, заданных в комплекснозначном виде / Р.Г. Хафизов, С.А. Охотников // Компьютерная оптика. – 2012. – Т. 36, № 2. – С. 274-278.

7. *Хафизов, Р.Г.* Линейная фильтрация непрерывных контуров изображений, заданных в комплекснозначном виде / Р.Г. Хафизов, С.А. Охотников // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 3. – С. 408-416.

8. *Хафизов, Р.Г.* Распознавание непрерывных комплекснозначных контуров изображений / Р.Г. Хафизов, С.А. Охотников // Известия Вузов. Приборостроение. – 2012. – Т. 55, № 5. – С. 3-9.

ous Complex-valued Signals Defining Flat Object Image Contours]. Vestnik KGTU im. A.N. Tupoleva [Vestnik of KSTU named after A. N. Tupolev]. 2006. No 4. P. 24-27.

4. *Hafizov R.G., Suslova A.M., Kiseleva T.P.* Statisticheskaya model izobrazheniy so sluchainoi formoi [The Statistical Model of Images with Random Shape]. Sbornik materialov XI mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Optiko-elektronnye pribory i ustroystva v sistemakh raspoznavaniya obrazov, obrabotki izobrazheniy i simvol'noi informatsii» (Raspoznavanie-2013) [Proceedings of the XI International Scientific-Technical Conference «Optical-electronic Instrumentation and Devices in Image Recognition Systems, Image Processing and Symbolic Information» (Recognition 2013)]. Kursk, Southwest State University, 2013. P. 112-115.

5. *Gmurman V.E.* Teoriya veroyatnostey i matematicheskaya statistika [Theory of Probability and Mathematical Statistics]: Textbook for institutes of higher education / V.E. Gmurman. – 9-th edition. M., Vysshaya shkola, 2003. 423 p.: il.

6. *Hafizov R.G., Okhotnikov S.A.* Diskretizatsiya nepreryvnykh konturov izobrazheniy [Discretization of Continuous Contours of Images, Defined in a Complex-valued Form]. Komp'yuternaya optika [Computer Optics]. 2012. Vol. 36, No 2. P. 274-278.

7. *Hafizov R.G., Okhotnikov S.A.* Lineinaya fil'tratsiya nepreryvnykh konturov izobrazheniy v kompleksnoznachnom vide [Linear Filtering of Continuous Contours of Images, Defined in a Complex-valued Form]. Komp'yuternaya optika [Computer Optics]. 2010. Vol. 34, No 3. P. 408-416.

8. *Hafizov R.G., Okhotnikov S.A.* Raspoznavanie nepreryvnykh kompleksnoznachnykh konturov izobrazheniy [The Recognition of Continuous Complex-valued Contours of Images]. Izvestiya Vuzov. Priboro-stroenie. [University news. Instrument-making]. 2012. Vol. 55, No 5. P. 3-9.

Статья поступила в редакцию 21.08.13.

ХАФИЗОВ Ринат Гафиятуллович – доктор технических наук, профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов: цифровая обработка сигналов, обработка и распознавание изображений. Автор более 120 публикаций.

E-mail: HafizovRG@volgatech.net

ЯРАНЦЕВА Татьяна Валентиновна – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор двух публикаций.

E-mail: krtmbs@volgatech.net

КИСЕЛЕВА Татьяна Павловна – студентка 4 курса радиотехнического факультета, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор двух публикаций.

E-mail: krtmbs@volgatech.net

СУСЛОВА Анастасия Михайловна – студентка 4 курса радиотехнического факультета, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор двух публикаций.

E-mail: krtmbs@volgatech.net

*HAFIZOV Rinat Gafiyatullovi*ch – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Chair of Medical and Biological System Engineering, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is digital signal processing, image processing and recognition. The author of more than 120 publications.

E-mail: HafizovRG@volgatech.net

YARANTSEVA Tatyana Valentinovna – a postgraduate student of the Chair of Medical and Biological System Engineering, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is digital processing of images and signals. The author of 2 publications.

E-mail: krtmbs@volgatech.net

KISELEVA Tatyana Pavlovna – a fourth year student of the Radio Engineering Faculty, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is digital processing of images and signals. The author of 2 publications.

E-mail: krtmbs@volgatech.net

SUSLOVA Anastasiya Mikhailovna – a fourth year student of the Radio Engineering Faculty, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is digital processing of images and signals. The author of 2 publications.

E-mail: krtmbs@volgatech.net

R. G. Hafizov, T. V. Yarantseva, T. P. Kiseleva, A. M. Suslova

RECOGNITION OF IMAGES WITH A RANDOM SHAPE

Key words: *contour; image shape; statistical model; linear transformations; recognition.*

The shape of the considerable number of the objects that surround us is random. The examples of random images can be the images of man's organs, cloudiness, tree leaves, the profile of a man's face etc. The considerable variability of the shape of such images doesn't allow considering them as noisy images of some reference objects.

The purpose of the work is the development of the model of the image with a random shape and the recognition method on its basis.

The approach to the formation of the image contour model with a random shape is considered. Meanwhile the contour is presented as a complex random function and it is defined as a set of possible realization. For the random contour the mathematical expectation contour, dispersion and a correlation function are determined.

It is stated that the condition of the formation of the model of the contour with a random shape is the equality of values of parameters of linear transformations (scaling, rotation angle and the initial point shift) of the contours of its realization.

The characteristics of the recognition of the contour of images with the random shape are received. It is stated that while increasing the dimension of contours the probability of the correct recognition is increased. The increase in the alphabet volume quantity during the recognition leads to the decrease in the probability of the correct recognition.

УДК 519.2

А. О. Евдокимов, А. В. Зуев, А. А. Кислицын

КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ОБРАБОТКИ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ ДАННЫХ И АНАЛИЗА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ КОРРЕКТИРОВКИ МАРШРУТА ДВИЖЕНИЯ НАЗЕМНОГО ТРАНСПОРТНОГО СРЕДСТВА

Предложена структура современного комплекса навигационного оборудования, который позволит получать данные о местоположении мобильного объекта, его скорость и ускорение, сравнивать с картографической информацией, определять точку маршрута, принимать решение о параметре дальнейшего движения. Представлены результаты эксперимента изменения радионавигационных данных для различных климатических периодов в зависимости от температуры воздуха, атмосферного давления, осадков, влажности воздуха.

Ключевые слова: *распознавание образов; радионавигация; метеоусловия; отношение сигнал/шум; система технического зрения; транспортное средство; корректировка движения.*

Введение. Современная навигационная аппаратура представляет собой симбиоз спутниковой системы позиционирования, современной радиосвязи и электронной картографии, позволяет определять местоположение и скорость транспортного средства, вычислять расстояния, прокладывать маршруты и отслеживать их соблюдение, получать справки о картографических объектах. При этом требуемая точность находится на уровне десятков метров, что позволяет в некоторых случаях использовать спутниковую радионавигационную систему (СРНС) в качестве основного средства навигации. Реализация систем навигации полностью автономных транспортных средств сдерживается по ряду причин, одной из которых является то, что отечественная СРНС ГЛОНАСС развернута не полностью, а использование СРНС GPS осложняется из-за возможности намеренного загробления данных системы над тем или иным регионом, в зависимости от обстановки. При этом важное значение приобретают вопросы комплексирования СРНС ГЛО-

НАСС с полностью развернутой СРНС GPS и интегрирования с другими средствами, в частности, с инерциальными навигационными системами (ИНС), системами технического зрения (СТЗ). Повышение точности измерительной информации от СРНС предполагает исследование погрешностей и последующую их алгоритмическую компенсацию на основе сопоставления с данными, получаемыми от других измерительных систем [1–11]. В данной работе рассмотрены вопросы повышения точности навигационных систем, функционирующих в различных режимах на основе компенсации различных факторов, влияющих на помехоустойчивость радионавигационных сигналов, а также сопоставления навигационной информации с данными от системы технического зрения.

Цель работы – получение структуры комплексной системы корректировки движения автономных транспортных средств.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи:**

- разработать алгоритм работы модели автономной навигации;
- провести анализ экспериментальных измерений отношения S/N радионавигационных сигналов при различных климатических условиях;
- сформировать структурную схему системы коррекции маршрута движения наземного транспортного средства.

Модель автономной навигации.

При движении транспортного средства (ТС) по жестко заданному маршруту, например, в случае привязки к дорожной сети, прокладка маршрута выполняется заранее с учетом решаемых автономным транспортным средством задач. При этом система формирования маршрута должна учитывать возможность возникновения препятствий на пути следования транспортного средства и обеспечивать возможность их обхода с последующим скорейшим возвращением на маршрут. В подобных ситуациях эффективные алгоритмы могут быть получены на базе комплексирования навигационной информации и подходов, выработанных в теории обработки изображений.

Для построения модели автономной навигации предлагается использовать три уровня навигации. Первым уровнем является система спутникового позиционирования, определяющая положение ТС на карте. Обычно карта спутниковой навигации представляет собой граф. Система спутникового позиционирования определяет, на каком ребре графа в данный момент находится ТС. С помощью этого уровня определяется глобальное положение ТС: город, улица и т.п. Также первый уровень создает массив контрольных точек, через которые должно будет пройти ТС. Данный массив является координатами вершин графа карты. Для поиска этих вершин используются алгоритмы поиска пути в графе, такие как волновой алгоритм и алгоритм A* [12].

Вторым уровнем навигации являются системы технического зрения автомобиля,

использующие в качестве датчиков лазерный сканер или видеокамеры. С помощью этого уровня строится карта окружающего мира, а также находится путь до следующей контрольной точки. На данном уровне невозможно применить алгоритмы поиска пути на графе, ввиду отсутствия всей карты окружающего мира, а также ввиду возможности непрогнозируемого движения элементов мира.

Третьим уровнем являются системы управления ТС. К таким системам относятся механизм переключения передач, поворот руля, контроль за габаритами ТС. Данный уровень определяет комплекс поворотов ТС для установления правильной траектории движения и последующего достижения контрольной точки, а также ориентацию в ограниченном пространстве.

Реализация первого уровня навигации. Реализация первого уровня навигации осуществляется через системы GPS-навигации. Программа для спутниковой навигации строит путь по вершинам графа карты. Данные системы возвращают набор контрольных точек, движение по которым осуществляется с помощью второго и третьего уровней. Контрольные точки находятся с помощью алгоритмов поиска пути в графах. Предполагается, что обязанность вычисления маршрута на графе полностью ложится на систему навигации.

Реализация второго уровня навигации. Результатом работы второго уровня навигационной системы является ломаная, огибающая препятствия на пути к контрольной точке. На данный момент существует ряд алгоритмов по нахождению пути между двумя точками, такие как A* или волновой алгоритм. Невозможность использования одного из них для решения поставленной задачи обусловлена тем, что все известные алгоритмы данного класса ищут путь по готовой карте, содержащей всю информацию о препятствиях. В данной задаче вся карта местно-

сти не известна, и имеется информация лишь о тех непроходимых точках, которые были получены в результате сканирования из текущей точки положения ТС, поэтому предварительная прокладка оптимального маршрута оказывается невозможной. Одной из главных задач навигации автономного ТС является выявление проходимых зон – участков поверхности, по которым возможно движение ТС, а также глобальное позиционирование.

Контур непроходимых точек строится путем сканирования лазерным датчиком с шагом $0,1^\circ$. Если при сканировании луч прошел через контрольную точку, то считается, что точка находится непосредственно в поле зрения и можно следовать к ней напрямую. В противном случае следует исследовать способ обхода препятствия на пути до конечной точки маршрута.

Следующим шагом является установление разрыва в контуре препятствия. Свидетельством разрыва является большое расстояние между соседними точками контура. Далее следует определить, к какому из двух разрывов следует двигаться.

После нахождения следующей точки маршрута можно приступить к осуществлению комплекса маневров для его достижения.

Реализация третьего уровня навигации. Для разработки комплекса методов по установлению правильной траектории необходимо определить понятие ТС.

Понятие ТС должно обладать следующими свойствами:

- 1) габариты;
 - 2) передача, задняя (R) или передняя (D);
 - 3) радиус поворота;
 - 4) угол текущего разворота относительно начала глобальных координат;
- а также следующими методами:

- 1) движение по окружности. В зависимости от передачи, по часовой или против часовой стрелки;

- 2) движение прямо.

Первое, что необходимо идентифи-

цировать, это направление разворота – вправо или влево.

После определения направления поворота следует определить, возможен ли разворот в данном направлении, т.е. нет ли на пути непроходимой точки.

Если хотя бы одна из этих точек является непроходимой, передача меняется на противоположную.

Если во время комплекса предыдущих маневров угол направления ТС α совпал с углом отклонения следующей точки β , то ТС приняло необходимую ориентацию, чтобы двигаться прямо к следующей точке, в таком случае передача переключается на переднюю. Но во время комплекса маневров следующая точка могла исчезнуть из поля зрения ТС, в этом случае запускается алгоритм переопределения следующей точки. В любом случае с каждой итерацией алгоритма ТС будет приближаться к заданной точке.

Анализ радионавигационной информации

Влияние температуры на помехоустойчивость радионавигационных сигналов. Измерения проводились в зимний период, месяц – февраль. Объем экспериментальных данных составил порядка 40320 отчетов. Пронаблюдаем, как изменение значения температуры воздуха в приземном слое влияет на качество сигнала. Для сравнения выберем четыре дня с различными значениями температуры (3, 14, 22 и 26 февраля), отличающимися в среднем на 5°C . Графики изменения значения S/N с течением времени при разной температуре для спутников № 21 (GPS) и № 45 (ГЛОНАСС) с частотами L1 (1575,42 МГц) и L2 (1227,60 МГц) приведены на рис. 1.

Оценивая полученные результаты, можно сделать следующий вывод: изменение температуры воздуха в приземном слое оказывает влияние на помехоустойчивость радионавигационного сигнала. Понижение температуры в зимний период увеличивает отношение S/N . Причем из-

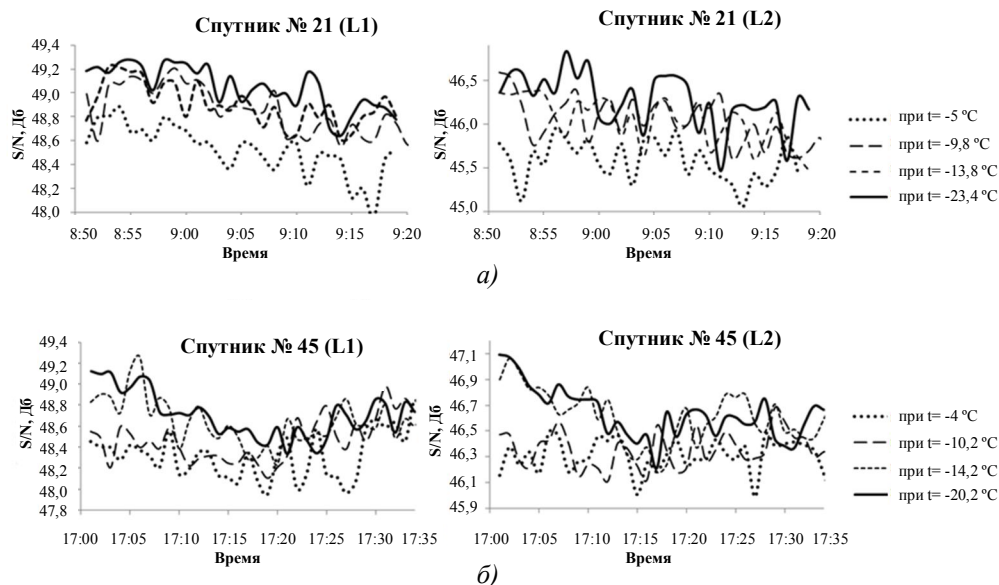


Рис. 1. Графики изменения значения S/N с течением времени при разной температуре для спутников № 21 (а) и № 45 (б) частотами L1 и L2

менение температуры от -5°C до -15°C привело к улучшению качества спутникового сигнала системы ГЛОНАСС в среднем на 0,37 дБ для частоты L1 и на 0,44 дБ для частоты L2, для системы GPS на 0,57 и 0,7 дБ соответственно. Это может быть связано с тем, что из-за понижения температуры уменьшается количество и интенсивность естественных шумов, а соответственно и помех.

Влияние атмосферного давления на помехоустойчивость радионавигационных сигналов. Проанализируем влияние атмосферного давления на помехоустойчивость радионавигационного сигнала. Анализ проводился для трех различных

значений атмосферного давления, причем температура воздуха в приземном слое одинаковая и составляет $(-13^{\circ}\text{C}) - (-14^{\circ}\text{C})$, осадки отсутствуют.

Графики изменения отношения S/N с течением времени при разном значении атмосферного давления для спутника № 21 (GPS) с частотами L1 и L2 приведены на рис. 2.

На основании полученных экспериментальных данных и построенных по ним эмпирических моделей получаем, что отношение S/N для радионавигационных сигналов практически не меняется с изменением значений атмосферного давления.

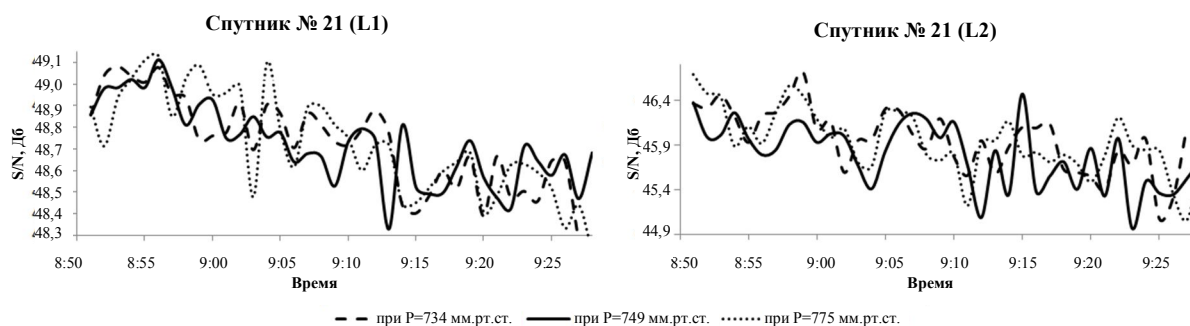


Рис. 2. Графики изменения отношения S/N с течением времени при разном значении давления для спутника № 21 с частотами L1 и L2

Влияние количества осадков на помехоустойчивость радионавигационных сигналов. Степень ослабления радиоволн в осадках зависит от их водности, размеров капель. Наименьшее ослабление наблюдается в тумане, наибольшее – в дожде. Облака влияют на ослабление радиосигнала так же, как и туманы, т. е. ослабление пропорционально водности, и только мощные кучевые и кучево-дождевые облака сильно ослабляют сигналы из-за больших размеров капель в них. Ослабление радиоволн при выпадении града обычно много меньше, чем в случае выпадения дождя той же водности. Сигналы, отраженные от снега, зависят от интенсивности снега (водности), размеров снежинок и главным образом от наличия на них слоя воды (смачивания). При низких температурах отраженные от снега сигналы намного слабее сигналов от дождя равной водности. Отраженные сигналы от мокрого снега больше, чем сигналы от дождя равной интенсивности. Это объясняется тем, что отражающая поверхность мокрого снега больше, чем капель с таким же количеством воды, а электрическая проницаемость его смоченной поверхности равна таковой для капель дождя.

Сухой же снег имеет электрическую проницаемость в десятки раз меньшую, чем вода, вследствие чего он слабо отражает радиоволны [13].

В рамках исследования для оценки помехоустойчивости радионавигационных сигналов в качестве осадков учитывались интенсивности выпадения дождя и снега. В процессе эксперимента значение дождя составило 3,3 мм/ч. Это значение относится к уровню умеренных осадков [14–16]. Результаты исследования для спутника № 2 (GPS) и частотами L1 и L2 приведены на рис. 3.

Проведенные эксперименты показали, что при наличии осадков отношение S/N падает. Этот эффект можно объяснить тем, что осадки (дождь, туман, снег) ослабляют сигнал. Чем интенсивней осадки, тем больше ослабление сигнала. Также заметно, что при дожде сигнал ослабевает больше, чем во время снега. Возможно, здесь играет роль линейная поляризация (горизонтальная или вертикальная). Капля воды, как оптическая линза, отклоняет или вращает вектор поляризации. А таких капель при дожде много. Для системы GPS сигнал во время дождя ослабевает в среднем на 7 Дб.

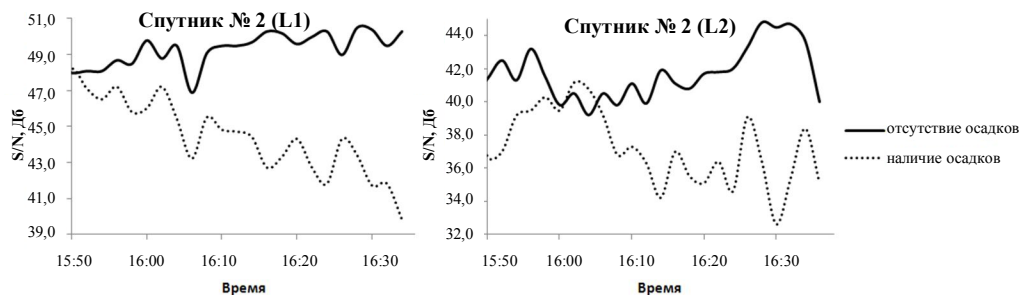


Рис. 3. График изменения отношения S/N с течением времени для спутника № 2 с частотами L1 и L2

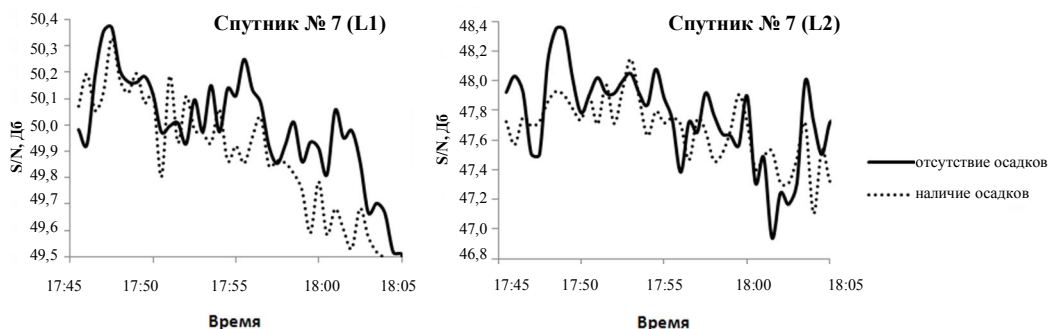


Рис. 4. График изменения отношения S/N с течением времени для спутника № 7 с частотами L1 и L2

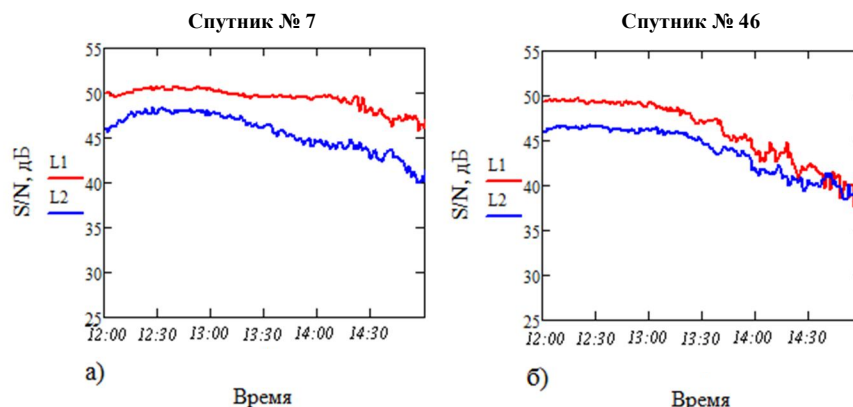


Рис. 5. График отношений S/N частоты $L1$ и $L2$ за 02.06.12
а) по спутнику № 7 б) по спутнику № 46 при влажности 37 %

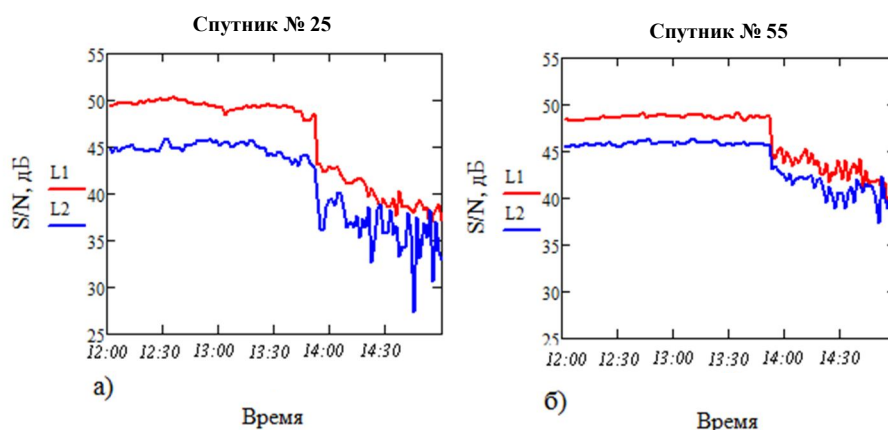


Рис. 6. График отношений S/N частоты $L1$ и $L2$ за 18.10.12
а) по спутнику № 25; б) по спутнику № 55 при влажности 58 %

Влияние влажности на помехоустойчивость радионавигационных сигналов. В ходе экспериментов были построены зависимости влияния влажности на отношение S/N в течение года. Частично графики изменения отношения S/N с течением времени приведены на рис. 5, 6.

В ходе дальнейших экспериментов были построены зависимости S/N в течение года при различной влажности, из которых следует, что при изменении влажности в среднем на 20 % сигнал ухудшается:

- в весенний период в среднем в 1,25 раза для частоты $L1$ и в 1,56 раза для частоты $L2$ для спутников GPS и в 1,4 раза для частоты $L1$ и в 1,56 раза для частоты $L2$ для спутников ГЛОНАСС;
- в летний период в среднем в 1,4 раза для частоты $L1$ и в 1,78 раза для частоты $L2$ для спутников GPS и в 1,56 раза для частоты $L1$ и в 1,78 раза для частоты $L2$ для спутников ГЛОНАСС;

ты $L2$ для спутников GPS и в 1,56 раза для частоты $L1$ и в 1,78 раза для частоты $L2$ для спутников ГЛОНАСС;

- в осенний период в среднем в 1,56 раза для частоты $L1$ и в 2 раза для частоты $L2$ для спутников GPS и в 1,78 раза для частоты $L1$ и в 2 раза для частоты $L2$ для спутников ГЛОНАСС;
- в зимний период в среднем в 1,25 раза для частоты $L1$ и в 1,56 раза для частоты $L2$ для спутников GPS и в 1,4 раза для частоты $L1$ и в 1,56 раза для частоты $L2$ для спутников ГЛОНАСС.

Комплексирование алгоритмов обработки информации СРНС и СТЗ. Существующие в настоящее время системы предполагают, что ключевые элементы траектории движения (точки взлета, посадки и т.п.) задаются человеком заранее и не могут в случае необходимости изме-

Выводы. Современный комплекс навигационных средств дает возможность получать данные о местоположении подвижного объекта, его скорости и ускорении, сопоставлять с картографической информацией, определять точку маршрута, принимать решение о параметрах дальнейшего движения. При этом важной задачей является получение разных алгоритмов комплексирования доступных наблюдений с целью определения их эффективности. В соответствии с простейшим алгоритмом комплексирования предусматривается использование на выходе навигационного комплекса координат и скорости СРНС при ее нормальной работе и информации автономной системы при неработоспособности СРНС. В настоящее время актуальной является задача разработки устройств, которые на основе анализа изображений окружающего пространства способны определять собственное местоположение, принимать решения о коррекции или об изменении маршрута следования транспортного средства, находить удобные площадки для временной остановки транспортного средства и т.п. Принятие решений в реальном времени можно обеспечить за счет введения необходимой коррекции координат на основании информации о текущей погрешности

СРНС и интеграции необходимого объема информации, извлекаемой в текущий момент из СТЗ. Полученные в проекте результаты могут использоваться при разработке систем ориентации и навигации автономных транспортных средств, в частности, для выбора посадочных площадок беспилотными летательными аппаратами, выбора плоских фрагментов морского дна подводными аппаратами, управления наземными транспортными средствами при их движении по городским и загородным автомагистралям, для решения задач астроориентации по изображениям звездного неба и т.д. Помимо указанных областей, полученные результаты могут быть использованы в системах распознавания трехмерных изображений в радиолокационных системах обзора воздушного пространства и подстилающей поверхности, в системах биометрической идентификации и т.п. Экономический эффект от внедрения обеспечивается за счет снижения требований к аппаратному обеспечению систем обработки 3D-изображений, за счет возможности уменьшения количества операторов, осуществляющих поддержку функционирования беспилотных летательных аппаратов, за счет снижения рисков сбоя в системах ориентации и навигации и связанных с этим потерь.

Список литературы.

1. Фурман, Я.А. Визуализация изображений в трехмерных сценах: учебное пособие / Я.А. Фурман. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2007. – 278 с.
2. Evdokimov, A.O. Pattern Recognition of Space Group Point Objects on the Basis of their Shaping Flat Representations / A.O. Evdokimov // 8th Open German-Russian Workshop (OGRW-8-2011). – Nizhni Novgorod: Workshop Proceedings. – 2011. – P. 56-59.
3. Иванов, В.А. Исследование влияния на помехоустойчивость радионавигационных сигналов ГЛОНАСС/GPS метеословий и космической погоды / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А.В. Зувев, А.А. Кислицын, С.В. Крылов // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – №3. – С. 25-35.

References

1. Furman Ya. A. Vizualizatsiya izobrazheniy v trekhmernykh stsenakh [Image Visualization in 3D Scenes]. Yoshkar-Ola, MarSTU, 2007. 278 p.
2. Evdokimov A.O. Pattern Recognition of Space Group Point Objects on the Basis of their Shaping Flat Representations. okimov 8th Open German-Russian Workshop (OGRW-8-2011). Nizhni Novgorod, Workshop Proceedings. 2011. P. 56-59.
3. Ivanov V. A., Ryabova N. V., Zuev A. V., Kislytsyn A. A., Krylov S. V. Issledovanie vliyaniya na pomekhoustoichivost' radionavigatsionnykh signalov GLONASS/GPS meteouosloviy i kosmicheskoi pogody [The Research on the Influence of Meteorological Conditions and Cosmic Weather on the Interference Immunity of Radio Navigation Signals GLONASS/GPS]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2011. No 3. P. 25-35.

4. *Иванов, В.А.* Численные и полунатурные исследования функции рассеяния узкополосных дециметровых радиоканалов / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, И.Е. Царев // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2009. – Т. 14. – № 8. – С. 46-54.
5. *Иванов, В.А.* Зондирование ионосферы и дециметровых каналов связи сложными радиосигналами / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова // *Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – 2010. – № 1. – С. 3-37.
6. *Иванов, В.А.* Зондирование ионосферных каналов высокочастотной связи с поверхности Земли / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, А.В. Мальцев, М.И. Рябова, И.Е. Царев // *Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – 2008. – № 1. – С. 3-20.
7. *Иванов, В.А.* Искажение сложных дециметровых радиосигналов в дисперсных ионосферных радиоканалах при квазизенитном распространении / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, М.И. Рябова, Н.А. Соколин // *Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы*. – 2010. – № 1. – С. 43-53.
8. *Иванов, В.А.* Развитие теории синхронизации РТС дециметровой связи и панорамного зондирования ионосферы / В.А. Иванов, А.А. Чернов // *Телекоммуникации*. – 2012. – № 2. – С. 16-22.
9. *Иванов, В.А.* Многомерный высокочастотный радиоканал и экспериментальные исследования его основных характеристик / В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, А.А. Чернов // *Электромагнитные волны и электронные системы*. – 2013. – Т. 18. – № 8. – С. 40-48.
10. *Иванов, В.А.* Определение основных параметров многомерного коротковолнового радиоканала с использованием панорамного ионозонда /
4. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Tsarev I. E.* Chislennye i polunaturalnye issledovaniya funktsii rasseyaniya uzkopolosnykh dekametrovykh radiosignalov [Numerical and Seminatural Investigations of Narrowband Decameter Radio Signal Scattering Function]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2009. Vol. 14. No 8. P. 46-54.
5. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V.* Zondirovanie ionosfery i dekametrovykh kanalov svyazi slozhnymi radiosignalami [The Sounding of the Ionosphere and Decameter Communication Channels by Complex Radio Signals]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 1. P. 3-37.
6. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Mal'tsev A. V., Ryabova M. I., Tsarev I. E.* Zondirovanie ionosfernykh kanalov vysokochastotnoy svyazi s poverkhnosti Zemli [The Sounding of the Ionospheric Channels of High-frequency Communication from the Surface of the Earth]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2008. No 1. P. 3 - 20.
7. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova M. I., Sorokin N. A.* Iskazhenie slozhnykh dekametrovykh radiosignalov v dispersnykh ionosfernykh radiokanalakh pri kvazizenitnom rasprostranenii [The Distortion of Complex Decameter Radio Signals in Dispersive Ionospheric Radio Channels During their Quasi-zenithal Propagation]. *Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy* [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2010. No 1. P. 43-53.
8. *Ivanov V. A., Chernov A. A.* Razvitie teorii sinkhronizatsii RTS dekametrovoy svyazi i panoramnogo zondirovaniya ionosfery [The Development of Synchronization Theory of Radio Engineering Systems of Decameter Communication and Panoramic Ionospheric Sounding]. *Telekommunikatsii* [Telecommunications]. 2012. No 2. P. 16-22.
9. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., A. A. Chernov.* Mnogomernyi vysokochastotnyi radiokanal i eksperimental'nye issledovaniya ego osnovnykh kharakteristik [Multidimensional High-frequency Radio Channel and Experimental Studies of its Key Features]. *Elektromagnitnye volny i elektronnye sistemy* [Electromagnetic Waves and Electronic Systems]. 2013. Vol. 18. No 8. P. 40-48.
10. *Ivanov V. A., Ivanov D. V., Ryabova N. V., Lashchevsky A. R., Belgibaev R. R., Elsukov A. A., Maltsev A. V., Pavlov V. V., Ryabova M. I., Cher-*

В.А. Иванов, Д.В. Иванов, Н.В. Рябова, А.Р. Лащевский, Р.Р. Бельгибаев, А.А. Елсуков, А.В. Мальцев, В.В. Павлов, М.И. Рябова, А.А. Чернов // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 2. – С. 15-23.

11. *Khafizov, D.G.* Mathematical Theory of Visualization of 3D Radio and Sonar Images and Information Technologies for its Implementation / D.G. Khafizov., A.O. Evdokimov // 8th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies. – Yoshkar-Ola, 2007. – Vol. 1. – Pp. 317-321.

12. *Костюкова, Н. И.* Графы и их применение. Комбинаторные алгоритмы для программистов / Н. И. Костюкова. – М.: Интернет-университет информационных технологий, 2007. – 312 с.

13. Рефракция электромагнитных волн в тропосфере [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://moryak.biz/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=366> (Дата обращения: 15.05.2013).

14. Руководство по автоматическим системам метеорологического наблюдения на аэродромах [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9837_cons_ru.pdf (Дата обращения: 22.05.2013).

15. *Иванов, В.А.* Влияние геомагнитных возмущений на полное электронное содержание ионосферы/ В.А. Иванов, А.Ю. Желонкин, Н.В. Рябова, А.В. Зуев // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – № 1. – С.24-30.

16. *Иванов, В.А.* Исследование влияния атмосферных осадков на помехоустойчивость сигналов GPS, ГЛОНАСС / В.А. Иванов, Н.В. Рябова, А. А. Кислицын, А.В. Зуев и др. // Материалы международного научно-технического семинара «Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов в инфокоммуникациях»: (Синхроинфо-2012) / под ред. д-ра. техн. наук, профессора А.В. Пестрякова – М.: ООО «Брис-М». – С. 109-111.

nov A. A. Opredelenie osnovnykh parametrov mnogomernogo korotkovolnovogo radiokanala s ispol'zovaniem panoramnogo ionozonda [Determination of Basic Parameters of Multidimensional Short-wave Radio Channel with the Use of Panoramic Ionosonde]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2011. No 2. P. 15-23.

11. *Khafizov D.G., Evdokimov A.O.* Mathematical Theory of Visualization of 3D Radio and Sonar Images and Information Technologies for its Implementation. 8th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies. Yoshkar-Ola, 2007. Vol. 1. Pp. 317-321.

12. *Kostyukova, N. I.* Grafy i ikh primenenie. Kombinatornye algoritmy dlya programmistov [Graphs and their Application. Combinatorial Algorithms for Programmers]. Moscow, Internet-university of information technologies, 2007. 312 p.

13. Refraktsiya elektromagnitnykh voln v troposfere [Refraction of Electromagnetic Waves in the Troposphere] [Electronic Resource]. – Access mode: <http://moryak.biz/modules.php?name=Content&pa=showpage&pid=366> (Access date: 15.05.2013).

14. Rukovodstvo po avtomaticheskim sistemam meteorologicheskogo nablyudeniya na aerodromakh [Guidance on Automatic Systems of Meteorological Observation at Aerodromes] [Electronic Resource]. – Access mode: http://www.aviadocs.net/icaodocs/Docs/9837_cons_ru.pdf (Access date: 22.05.2013).

15. *Ivanov V. A., Zhelonkin A. Yu., Ryabova N. V., Zuev A. V.* Vliyanie geomagnitnykh vozmushcheniy na polnoe elektronnoe soderzhanie ionosfery [The Influence of Geomagnetic Disturbance on Full Electronic Content of the Ionosphere]. Vestnik Mariyskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2011. No 1. P. 24-30.

16. *Ivanov V. A., Ryabova N. V., A. A. Kislitsyn, Zuev A. V. et al.* Issledovanie vliyaniya atmosferykh osadkov na pomekhoustoichivost' signalov GPS, GLONASS [The Research of the Influence of Atmospheric Precipitation on the Interference Immunity of Signals GPS/GLONASS]. Materialy mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo seminar «Sistemy sinkhronizatsii, formirovaniya i obrabotki signalov v ifokommunikatsiyakh»: (Sinkhroinfo-2012). [The Proceedings of the International Scientific and Technical Seminar «The Systems of Synchronization, Forming and Processing of Signals in Infocommunications»: (Sinkhroinfo-2012).]. Moscow, LLC «Bris-M», 2012. P.109-111.

17. Фурман, Я.А. Принципы помехоустойчивого упорядочения изображений двумерных и трехмерных изображений групповых точечных объектов / Я.А. Фурман, Д.Г. Хафизов, А.О. Евдокимов, Д.В. Бахтин // Вестник Вятского научного центра Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук Российской Федерации. – 2005. – № 1 (6). С. 98-103.

18. *Evdokimov, A.O.* Comparative analysis of the methods of spatial group point objects marks ordering / A.O. Evdokimov // 9th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies. – Nizhni Novgorod, 2008. – Vol. 1. – Pp. 120-123.

19. Хафизов, Д.Г. Анализ методов оценки параметров вращений пространственных групповых точечных объектов / Д.Г. Хафизов, А.О. Евдокимов // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2013. – № 1 (17). – С54-67.

17. *Furman Ya. A., Hafizov D. G., Evdokimov A. O., Bahtin D. V.* Printsipy pomekhoustoichivogo uporyadocheniya izobrazheniy dvumernykh i trekhmernykh izobrazheniy gruppovykh tochechnykh ob'ektov [The Principles of the Anti-interference Ordering of Two-dimensional and 3D Images of Group Point Objects]. Vestnik Vyatskogo nauchnogo tsentra Verkhne-Volzhskogo otdeleniya Akademii tekhnologicheskikh nauk Rossiyskoy Federatsii [Vestnik of Vyatka Scientific Centre of the Upper Volga Department of the Academy of Technological Sciences of the Russian Federation]. 2005. No 1 (6). P. 98-103.

18. *Evdokimov A.O.* Comparative analysis of the methods of spatial group point objects marks ordering. 9th International Conference on Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies. Nizhni Novgorod, 2008. Vol. 1. Pp. 120-123.

19. *Hafizov D. G., Evdokimov A. O.* Analiz metodov otsenki parametrov vrashcheniy prostanstvennykh gruppovykh tochechnykh ob'ektov [The Analysis of the Estimation Methods of Spatial Group Point Object Rotation Parameters]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Volga State University of Technology. Ser. Radio Engineering and Information Systems]. 2013. No 1(17). P. 54-67.

Статья поступила в редакцию 26.06.13.

ЕВДОКИМОВ Алексей Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – радионавигация, распознавание образов. Автор 45 публикаций.

E-mail: EvdokimovAO@volgatech.net

ЗУЕВ Алексей Валерьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – радионавигационные и телекоммуникационные системы. Автор 45 публикаций.

E-mail: ZuevAV@volgatech.net

КИСЛИЦЫН Алексей Александрович – аспирант кафедры радиотехники и связи, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – исследование ионосферы Земли, радионавигационные системы связи. Автор девяти публикаций.

E-mail: Kis litsinAA@volgatech.net

EVDOKIMOV Aleksey Olegovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair of Medical and Biological System Engineering, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is radio navigation, pattern recognition. The author of 45 publications.

E-mail: EvdokimovAO@volgatech.net

Zuev Aleksey Valeryevich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair of Radio Engineering and Communication, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is radio navigation and telecommunication systems. The author of 45 publications.

E-mail: ZuevAV@volgatech.net

KISLITSIN Aleksey Aleksandrovich – a post graduate of the Chair of Radio Engineering and Communication at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is the research on the Earth's ionosphere, radio navigation communication systems. The author of 9 publications.

E-mail: KislitsinAA@volgatech.net

A. O. Evdokimov, A. V. Zuev, A. A. Kislitsin

COMPLEXATION OF RADIO-NAVIGATION DATA PROCESSING ALGORITHMS AND IMAGE ANALYSIS FOR LAND-BASED VEHICLE ROUTE CORRECTION

Key words: image recognition; radio navigation; meteorological conditions; signal-to-noise ratio; computer vision system; transport vehicle; motion correction.

At present the problem of the development of facilities, that on the basis of the environment image analysis can locate their own position, make decisions on the correction or the change of a transport vehicle route, find convenient places for temporary stops of a transport vehicle, etc. is urgent. Decision making in real time can be guaranteed due to necessary coordinate correction on the basis of the information about the current error of a satellite radio navigation system and the integration of the necessary information volume, received in progress from the computer vision system.

The purpose of the work is obtaining the structure of the integrated system of the motion correction of autonomous transport vehicles.

For attaining the defined goal it was necessary to solve the following problems:

- to develop the algorithm of autonomous navigation model work;*
- to carry out the analysis of experimental measurements of the signal-to-noise ratio of radio navigation signals under different climatic conditions;*
- to form the block diagram of the system of land-based vehicle route correction.*

The structure of the modern complex of navigation equipment that allows us to receive the data about the location of a mobile object, its speed and acceleration, compare it with the cartographical information, determine the route point, make a decision about the parameter of further motion is suggested. The experimental results of the change of radio navigation data for different climatic periods depending on the air temperature, atmospheric pressure, precipitation, air humidity are presented.

The received results can be used while developing the systems of the position control and the navigation of autonomous transport vehicles, particularly, for the choice of fields by pilotless vehicles, the choice of flat fragments of the seabed by submersibles, land-based vehicle control while their motion along city and country highways, for the solution of the problems of stellar sky image astroorientation and etc. Besides the specified fields the received results can be used in the systems of three-dimensional image recognition in radar systems of air and underlying surface surveillance, in the systems of biometrical identification and etc. The saving rate from the implementation is provided due to lowering of requirements for the hardware support of 3D-image processing systems, due to the possibility of the quantity decrease of operators, carrying out the support of pilotless vehicle functioning, due to the failure risk decrease in the systems of position control and navigation and the losses, connected with it.

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 681.586.5

**Д. И. Касимова, А. А. Кузнецов, П. П. Крыницкий, О. Г. Морозов,
И. И. Нуреев, А. Ж. Сахабутдинов, С. М. Кучев, А. В. Петров**

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА С ГАУССОВЫМ ПРОФИЛЕМ ОТРАЖЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ ДАТЧИКА ТЕМПЕРАТУРЫ

Приведена оценка использования симметричного двухчастотного зондирования для определения центральной длины волны отражения волоконных решеток Брэгга (ВРБ) с гауссовым профилем отражения, применяемой в качестве датчика температуры. Описанный метод позволяет определить уход центральной длины волны отражения решетки посредством вычисления коэффициента модуляции сигнала биений, поступающих на фотоприемник. Проведенный численный эксперимент показал достоверность теоретических выкладок.

Ключевые слова: ВРБ; симметричный двухчастотный метод зондирования; биения; коэффициент модуляции.

Введение. Широкое использование волоконных решеток Брэгга в качестве датчиков физических величин (температуры, давления) связано с их высокой чувствительностью, простотой конструкции, невосприимчивостью к электромагнитным помехам. Задача зондирования решеток (определения центральной длины волны отражения – параметра, связанного с физическим воздействием на сенсор) является крайне актуальной. Существует множество методов зондирования [1], основным недостатком которых является использование дорогостоящих и сложных оптических и электронных компонентов, что делает стоимость данных приборов крайне высокой.

В данной статье предложен и описан метод определения центральной длины волны отражения с помощью симметричного двухчастотного зондирования, который позволяет упростить и удешевить прибор и систему измерения физической величины в целом. Кроме того, данный метод позволяет определять в радиотехнике добротность контуров с указанным профилем.

Описание метода. В [2,3] показано, что неизменность профиля отраженного сигнала от ВРБ при смещении центральной длины волны позволяет использовать технологию симметричного двухчастотного зондирования для определения центральной длины волны Брэгга λ_B отраженного сигнала.

Обобщенную амплитудно-частотную характеристику абстрактного контура отражения, на вход которого подается двухчастотный сигнал, можно определить с помощью следующего выражения:

$$Y(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{1 + \varepsilon_{0k}^2}}, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{0k} = Q(\omega / \omega_0 - \omega_0 / \omega)$ – обобщенная расстройка контура.

Амплитудно-частотная и фазочастотная характеристики абстрактного контура, на вход которого подается двухчастотный сигнал, представлены на рис. 1.

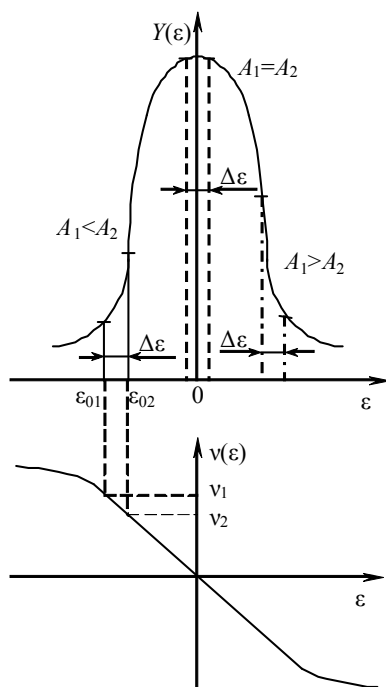


Рис. 1. Амплитудно-частотная (АЧХ) и фазочастотная (ФЧХ) характеристики абстрактного контура

Амплитуда и фаза выходного двухчастотного сигнала, как следует из рис. 1, зависят от значения средней обобщенной расстройки ε_0 и расстройки между частотами $\Delta\varepsilon$. Согласно [2], огибающая выходного двухчастотного сигнала при прохождении его через абстрактный контур на фотодетекторе описывается выражением вида:

$$U_{\text{вых}}(t) = A_{\text{вых}}(t) \cos(\omega_m t + \phi_{\text{вых}}(t)), \quad (2)$$

где $A_{\text{вых}}(t)$ – результирующее значение амплитуды выходного двухчастотного сигнала, $\phi_{\text{вых}}(t)$ – мгновенная фаза, ω_m – мгновенная частота двухчастотного колебания.

На фотодетекторе взаимодействие симметричных зондирующих сигналов при отражении от контура ВРБ приводит к возникновению биений и, как следствие, появлению амплитудной модуляции выходного сигнала. В этом случае коэффициент амплитудной модуляции определяется согласно выражению

$$m = \frac{\sqrt{1 + (\varepsilon_0 + \Delta\varepsilon / 2)^2}}{\sqrt{1 + (\varepsilon_0 - \Delta\varepsilon / 2)^2}}. \quad (3)$$

Из выражения (3) видно, что коэффициент модуляции зависит от средней обобщенной расстройки двухчастотного сигнала ε_0 и от расстройки между частотами двухчастотного сигнала $\Delta\varepsilon$. Зависимость коэффициента модуляции от средней обобщенной расстройки двухчастотного сигнала, $m(\varepsilon_0)$ при разных значениях расстройки между частотами составляющих $\Delta\varepsilon$, представлена на рис. 2.

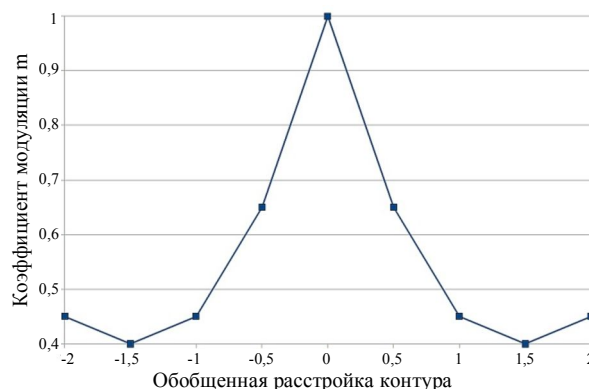


Рис. 2. Зависимость коэффициента модуляции $m(\varepsilon_0)$ при разных значениях средней обобщенной расстройки двухчастотного сигнала ε_0

Из рис. 2 видно, что кривая зависимости $m(\varepsilon_0)$ – непрерывная функция с явно выраженным максимумом в момент $\varepsilon_0 = 0$. Максимум функции – точка возврата 1-го рода. Функция убывает до ми-

нимума и возрастает до единицы, затем снова убывает до минимума. Крутизна кривой $m(\epsilon_0)$ зависит от расстройки между частотами $\Delta\epsilon$. Зависимость крутизны $S(\Delta\epsilon)$ кривой $m(\epsilon_0)$ от расстройки между частотами представлена на рис. 3.

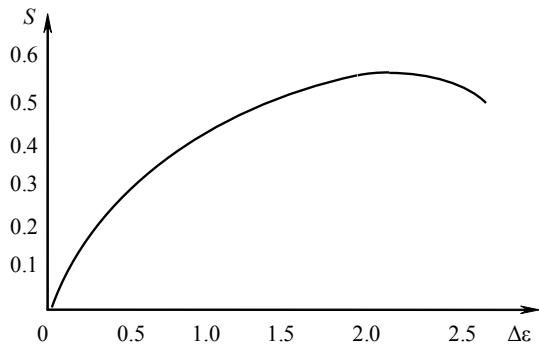


Рис. 3. Зависимость крутизны S коэффициента модуляции от расстройки между частотами $\Delta\epsilon$

Как видно из рис. 3, данная кривая имеет явно выраженный максимум при значении $\Delta\epsilon = 2$. Следовательно, максимальная крутизна кривой зависимости $m(\epsilon_0)$ соответствует случаю, когда расстройка между частотами $\Delta\epsilon$ равна полосе пропускания исследуемого абстрактного контура. При значении $\Delta\epsilon = 2$ погрешности определения амплитуды огибающей выходного сигнала будут минимальны.

Амплитудно-частотный профиль ВРБ, используемый в качестве исследуемого участка, должен соответствовать требованиям по факту создания ВРБ.

На рис. 4 изображены два состояния профиля отражения ВРБ. Синяя линия –

профиль отражения ВРБ в невозмущенном состоянии с центральной длиной волны λ_B и два симметричных относительно λ_B узкополосных зондирующих импульса (зеленые линии).

Коричневая линия на рис. 4 – профиль отражения ВРБ, смещенный в сторону увеличения центральной длины волны (например, при нагреве ВРБ), а красная линия – центральная длина волны λ'_B возмущенной ВРБ.

Как показано в [1], если амплитуды отраженных сигналов равны, то центральная длина волны соответствует исходной (невозмущенной) ВРБ и коэффициент амплитудной модуляции m равен 1. Если же амплитуды зондирующих узкополосных сигналов не равны, то в этом случае профиль отраженного сигнала от ВРБ сместился и коэффициент амплитудной модуляции m лежит в пределах от 0 до 1.

Зная амплитуды зондирующих сигналов после отражения от ВРБ и профиль ВРБ, можно определить центральную длину волны Брэгга λ_B . Направление смещения контура отраженного сигнала в сторону большей или меньшей длины волны определяется относительной величиной амплитуд зондирующих сигналов. Если амплитуда левого зондирующего сигнала меньше амплитуды правого зондирующего сигнала, то происходит смещение контура отражения ВРБ в сторону увеличения длины волны и в сторону уменьшения длины волны, если наоборот.

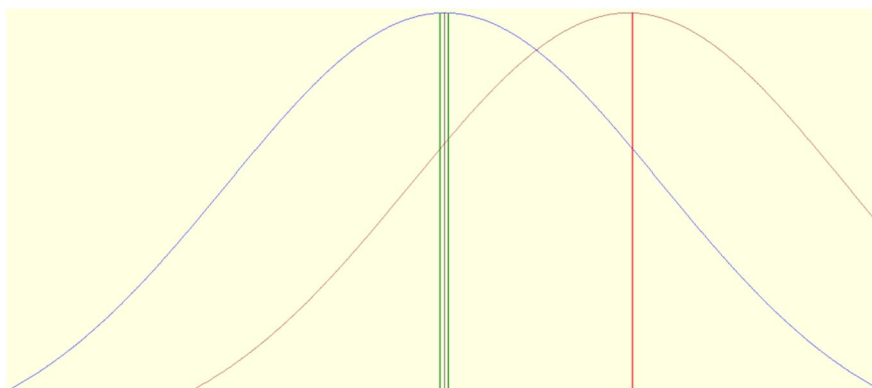


Рис. 4. Симметричное двухчастотное зондирование ВРБ

Алгоритм определения λ_B по амплитудам симметричных зондирующих сигналов и известному профилю ВРБ заключается в следующем.

Амплитудно-частотная характеристика отраженного сигнала для исследуемого участка с ВРБ известна. Обозначим ее функцией $f(\lambda)$, зависящей от длины волны λ . Центральная длина волны, соответствующая конкретной ВРБ, определяет максимальное значение амплитуды отраженного сигнала $A_{\max} = f(\lambda_B)$, где λ_B – центральная длина волны. Для невозмущенного состояния ВРБ нам известны контрольные значения амплитуды левого зондирующего сигнала $A_l = f(\lambda_B - \Delta\lambda)$ и амплитуды правого зондирующего сигнала $A_r = f(\lambda_B + \Delta\lambda)$. Для невозмущенного состояния ВРБ амплитуды левого и правого зондирующих импульсов равны $A_l = A_r$.

Если же исследуемый участок ВРБ испытывает изменение периода решетки, то значения амплитуд отраженных зондирующих сигналов будут отличаться от контрольных: $A_l^* = f(\lambda_B - \Delta\lambda)$ и $A_r^* = f(\lambda_B + \Delta\lambda)$ соответственно. При этом, значения амплитуд будут отличаться. При смещении контура в сторону увеличения центральной длины волны $A_l^* < A_r^*$ и при уменьшении центральной длины волны $A_l^* > A_r^*$.

Профиль остается неизменным и испытывает только сдвиговую деформацию вдоль оси абсцисс. Это позволяет использовать взаимосвязь между невозмущенным и смещенным контурами ВРБ, а именно: $A_l^*(\lambda_B - \Delta\lambda) = A_l(\lambda_B - \Delta\lambda - \lambda_c)$ и $A_r^*(\lambda_B + \Delta\lambda) = A_r(\lambda_B + \Delta\lambda - \lambda_c)$ соответственно. Здесь λ_c – величина сдвига контура по оси абсцисс, которая как раз и определяет смещение центральной длины волны возмущенного амплитудно-частотного контура.

Для нахождения λ_c используется обратная функция $f^{-1}(\lambda) \equiv \lambda(f)$.

Зелеными линиями на рис. 5 обозначены положения левого и правого зондирующих сигналов для смещенного профиля ВРБ (коричневая линия). Для известного профиля вычисляется величина смещения контура λ_c и определяется центральная длина волны возмущенной ВРБ $\lambda_B^* = \lambda_B + \lambda_c$.

Общий вид сигнала на фотодетекторе имеет вид:

$$S = (A_l \cdot \sin(\omega_l \cdot t + \phi_l) + A_r \cdot \sin(\omega_r \cdot t + \phi_r))^2, \quad (4)$$

где A_l , ω_l и ϕ_l – амплитуда, частота и фаза левого зондирующего сигнала соответственно, а A_r , ω_r и ϕ_r , – амплитуда, частота и фаза правого зондирующего сигнала соответственно.

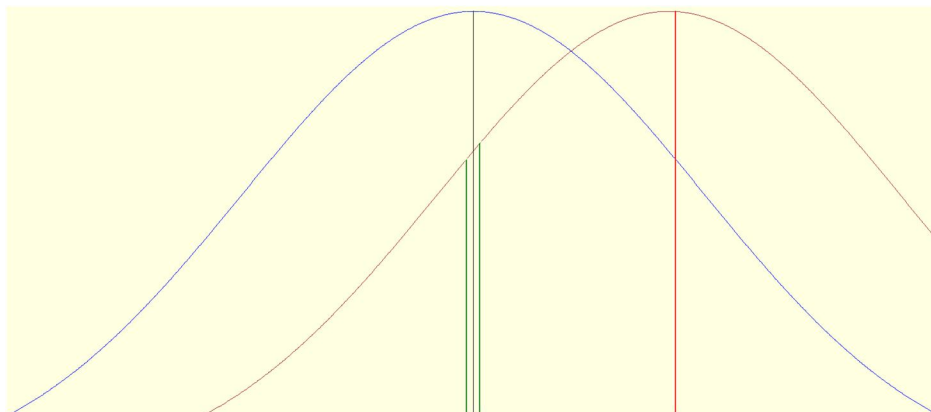


Рис. 5. Определение центральной длины волны смещенного амплитудно-частотного профиля ВРБ

В общем случае амплитуды A_l и A_r не равны и на фотодетекторе будут колебания с частотами ω_l и ω_r , соответствующие частотам зондирования левого и правого сигналов. Связь частот $\omega_l = \frac{c}{\lambda_B - \Delta\lambda}$, а $\omega_r = \frac{c}{\lambda_B + \Delta\lambda}$, где c – скорость света.

Форма отраженного сигнала, поступающего на фотодетектор, изображена синей линией на рис. 6. На фотодетекторе будет происходить изменение напряжения, соответствующего огибающей H сигнала S . Однозначно определив огибающую H , получим значение коэффициента модуляции $m = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{H_{\max} + H_{\min}}$.

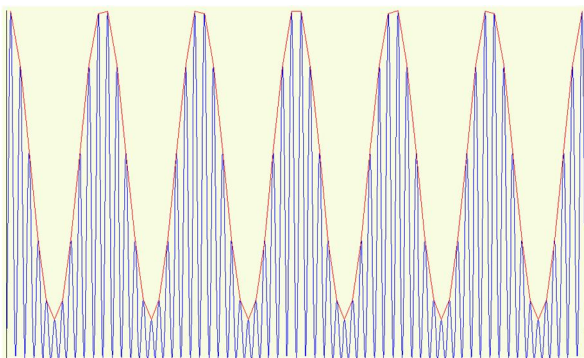


Рис. 6. Форма сигнала, поступающего на фотодетектор

Для ВРБ с нормальным профилем отражения (профиль отражения ВРБ близок к функции нормального распределения) зависимость коэффициента модуляции m от изменения центральной длины волны ВРБ линейная.

Для подтверждения этого утверждения нами был проведен численный эксперимент по установлению зависимости коэффициента модуляции от изменения центральной длины волны ВРБ.

Условия численного эксперимента.

Для численного эксперимента была выбрана ВРБ с гауссовым профилем

$$(f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}, \quad \text{с параметрами}$$

$\mu = 1443$ и $\sigma = 1$). Для этой ВРБ было произведено численное сканирование диапазона длин волн $\lambda = 1542 - 1543$ нм симметричными двухчастотными зондирующими сигналами с разностом частот в $\Delta\lambda = 0,02$ нм. Каждое зондирование соответствует изменению амплитуд отраженных зондирующих сигналов согласно профилю контура.

Для каждого из значений сканирующих сигналов численно строилась кривая колебаний сигнала (рис. 6, синяя линия) и численно искалась огибающая этого сигнала (рис. 6, красная линия) для потока данных в реальном времени. По известным значениям минимума и максимума огибающей вычислялся коэффициент модуляции огибающей и сопоставлялся текущему значению зондирующего сигнала и центральной длине волны ВРБ.

На рис. 7 показана зависимость коэффициента модуляции от изменения центральной длины волны, полученная в результате численного моделирования (красная линия – теоретическая зависимость).

Видно, что кривая численного эксперимента с высокой точностью совпадает с теоретической зависимостью. Отклонения в трех точках (три пика на кривой) соответствуют расхождению алгоритма при вычислениях в этих точках в силу потери точности вычислений. Отсеять такие ошибочные данные можно путем наложения ограничений в небольшое отличие (не более величины погрешности) для соседних значений коэффициентов модуляции. Например, можно наложить условие, чтобы два соседних значения подряд измеренных коэффициентов модуляции не отличались друг от друга более, чем на ε ,

$$\left| \frac{m_{i+1} - m_i}{m_i} \right| \leq \varepsilon.$$

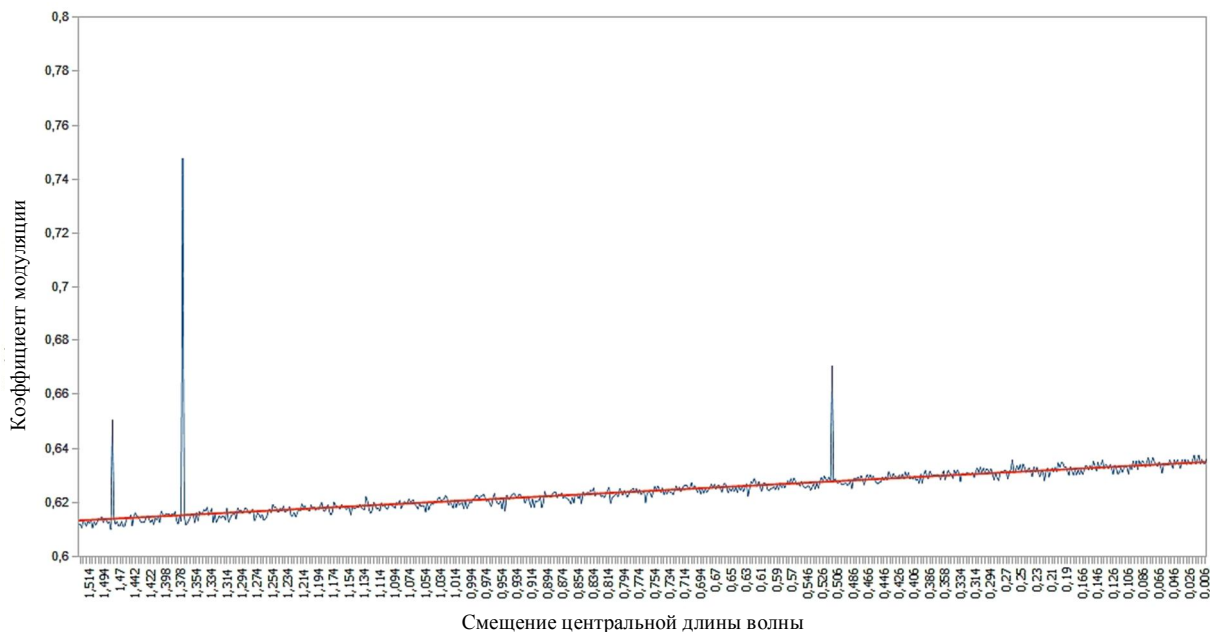


Рис. 7. Результат численного эксперимента.
Зависимость коэффициента модуляции от смещения центральной длины волны

Вывод. Таким образом, полученные данные численного эксперимента позволяют использовать параметры линейной аппроксимации зависимости коэффициента модуляции m от изменения центральной длины волны ВРБ, находящейся под температурным воздействием, согласно выражению:

$$m = m_0 + k \cdot \lambda_B^* . \quad (5)$$

В связи с тем, что зависимость температурного расширения оптоволокна линейная, то предыдущее соотношение можно переписать в виде:

$$m(T) = m_0 + k \cdot \Delta T . \quad (6)$$

Обратная зависимость температуры от коэффициента модуляции тоже будет линейной:

$$T = T_0 + k \cdot m^* . \quad (7)$$

Конкретные параметры линейной зависимости, а именно T_0 и коэффициент k для каждой серии однотипных ВРБ определяются экспериментально.

При формировании ВРБ, используемой в качестве датчика температуры, необходимо использовать технологию, позволяющую формировать ВРБ так, чтобы профиль отражения был близок к функции нормального распределения.

Работа выполнена в рамках договора №9932/17/07-К-12 от 20.11.2012 между ФГБОУ ВПО «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (КНИТУ-КАИ) и ОАО «КамАЗ» по комплексному проекту «Создание семейства двигателей КамАЗ на альтернативных видах топлива с диапазоном мощностей 300...400 л.с. и потенциалом выполнения перспективных экологических требований».

Список литературы.

1. National Instruments Fundamentals of FBG optical sensing // National Instruments, Publish Date: Jun 28, 2011. – Pp. 2-3
2. Морозов, О.Г. Измерение мгновенной частоты с помощью двухчастотного зондирования /

References

1. National Instruments Fundamentals of FBG optical sensing. National Instruments, Publish Date: Jun 28, 2011. Pp. 2-3
2. Morozov O. G., Talipov A. A., Fedorov A. A. et al. Izmerenie mgnovennoy chastoty s pomoshch'yu

О.Г. Морозов, А.А. Талипов, А.А. Федоров, и др. // Научно-технический вестник Поволжья. – 2012. – № 4. – С. 146–149.

3. Айбатов, Д.Л. Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха-Цендера и ROF-фильтр на его основе / Д.Л. Айбатов, О.Г. Морозов, Т.С. Садеев // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8, № 5. – С. 302–309.

4. Морозов, О.Г. Синтез двухчастотного излучения и его применения в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений / О.Г. Морозов, Д.Л. Айбатов, Т.С. Садеев // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13, № 3. – С. 84–91.

5. Morozov, O.G. Fiber optical structures: multifrequency reflectometry / O.G. Morozov. – Kazan: Novoe Znanye, 2010. – 203 p.

dvukhchastotnogo zondirovaniya [Measurement of Instantaneous Frequency Using Two-frequency Sounding]. Nauchno-tekhnicheskii vestnik Povolzh'ya [Scientific and Technical Herald of the Volga Region]. 2012. No 4. P. 146-149.

3. Aibatov D. L., Morozov O. G., Sadeev T. S. Preobrazovanie spektra opticheskogo izlucheniya v dvukhkanal'nom modulyatore Maksa-Tsendera i ROF-fil'tr na ego osnove [Transformation of Optical Radiation Spectrum in Max-Zender Two-channel Modulator and ROF-filter on its Basis]. Nelineinyi mir [Nonlinear World]. 2010. Vol. 8, No 5. P. 302-309.

4. Morozov O. G., Aibatov D. L., Sadeev T. S. Sintez dvukhchastotnogo izlucheniya i ego primeneniya v volokonno-opticheskikh sistemakh raspredelennykh i mul'tipleksirovannykh izmereniy [The Synthesis of Two-frequency Radiation and its Application in Fiber-optic Systems of Distributed and Multiplexed Measurements]. Fizika volnovykh protsessov i radiotekhnicheskie sistemy [Physics of Wave Processes and Radio Engineering Systems]. 2010. Vol. 13, No 3. P. 84-91.

5. Morozov, O.G. Fiber optical structures: multifrequency reflectometry / O.G. Morozov. Kazan, Novoe Znanye, 2010. 203 p.

Статья поступила в редакцию 20.08.13.

КАСИМОВА Диляра Ильинична – аспирант кафедры телевидения и мультимедийных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор семи публикаций.

E-mail: Dilya_kas@mail.ru.

КУЗНЕЦОВ Артём Анатольевич – бакалавр техники и технологии, инженер кафедры телевидения и мультимедийных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации.

E-mail: serius_91@mail.ru

КРЫНИЦКИЙ Павел Павлович – инженер кафедры телевидения и мультимедийных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации.

E-mail: pavel211@yandex.ru

МОРОЗОВ Олег Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации, информационно-измерительные и телекоммуникационные системы оптического и микроволнового диапазонов. Автор более 120 публикаций.

E-mail: microoil@mail.ru

НУРЕЕВ Ильнур Ильдарович – кандидат технических наук, доцент кафедры телевидения и мультимедийных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации. Автор 50 публикаций.

E-mail: n2i2@mail.ru

САХАБУТДИНОВ Айрат Жавдатович – кандидат физико-математических наук, старший преподаватель кафедры телевидения и мультимедийных систем, Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – численные методы моделирования физических процессов. Автор 25 публикаций.

E-mail: kazanboy@yandex.ru

КУЧЕВ Сергей Михайлович – начальник отдела электронных систем управления двигателем Научно-технического Центра ОАО «КамАЗ» (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации.

E-mail: sergey.kuchev@kamaz.org

ПЕТРОВ Александр Владимирович – начальник бюро рабочих процессов дизельных двигателей Научно-технического Центра ОАО КамАЗ (Российская Федерация, Казань). Область научных интересов – волоконно-оптические сенсоры и системы интеррогации.

E-mail: aleksandr.petrov@kamaz.org

KASIMOVA Dilyara Ilyinichna – a post graduate student of the Chair of Television and Multimedia Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KSTU) (Russian Federation, Kazan). The sphere of scientific interests is fiber-optic sensors and interrogation systems. The author of 7 publications.

E-mail: Dilya_kas@mail.ru

KUZNETSOV Artem Anatolyevich – Bachelor of Engineering and Technology, an engineer of the Chair of Television and Multimedia Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KSTU) (Russian Federation, Kazan). The sphere of scientific interests is fiber-optic sensors and interrogation systems.

E-mail: serius_91@mail.ru

KRYNITSKY Pavel Pavlovich – an engineer of the Chair of Television and Multimedia Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KSTU) (Russian Federation, Kazan). The sphere of scientific interests is fiber-optic sensors and interrogation systems.

E-mail: pavel211@yandex.ru

MOROZOV Oleg Gennadyevich – Doctor of Engineering Sciences, Professor, the Head of the Chair of Television and Multimedia Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KSTU) (Russian Federation, Kazan). The sphere of scientific interests is fiber-optic sensors and interrogation systems, information measuring and telecommunication systems of optical and microwave ranges. The author of more than 120 publications.

E-mail: microoil@mail.ru

NUREEV Ilmur Ildarovich – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of the Chair of Television and Multimedia Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KSTU) (Russian Federation, Kazan). The sphere of scientific interests is fiber-optic sensors and interrogation systems. The author of 50 publications.

E-mail: n2i2@mail.ru

SAHABUTDINOV Airat Zhavdatovich – Candidate of Physics and Mathematics, senior lecturer of the Chair of Television and Multimedia Systems at Kazan National Research Technical University named after A. N. Tupolev (KSTU) (Russian Federation, Kazan). The sphere of scientific interests is numerical methods of physical process modeling. The author of 25 publications.

E-mail: kazanboy@yandex.ru

KUCHEV Sergey Mikhailovich – the Head of the Department of Electronic Systems of Engine Control at the Scientific and Technical Centre of OJSC «KAMAZ» (Russian Federation, Kazan). The sphere of scientific interests is fiber-optic sensors and interrogation systems.

E-mail: sergey.kuchev@kamaz.org

PETROV Aleksandr Vladimirovich – the Head of the Bureau of Diesel Engine Working Procedures at the Scientific and Technical Centre of OJSC «KAMAZ» (Russian Federation, Kazan). The sphere of scientific interests is fiber-optic sensors and interrogation systems.

E-mail: aleksandr.petrov@kamaz.org

***D. I. Kasimova, A. A. Kuznetsov, P. P. Krynitsky, O. G. Morozov,
I. I. Nureev, A. Zh. Sahabutdinov, S. M. Kuchev, A. V. Petrov***

ESTIMATION OF POSSIBILITIES OF THE APPLICATION OF FIBRE BRAGG GRATINGS WITH A GAUSSIAN REFLECTION PROFILE AS A TEMPERATURE SENSOR

Key words: FBG; symmetric two-frequency sounding method; beats; modulation coefficient.

The problem of the determination of the central wave length of FBG reflection in real time is urgent, that is connected with the wide use of FBG as temperature (pressure) sensors in the field where the operability of measured value processing is important. The suggested method is based on symmetric two-frequency scanning of the grating profile with the following determination of the modulation coefficient of a beat signal, received as a result of the interaction of harmonics on the photodetector. In view of the fact that the grating profile is symmetrical to the central wave length (Gaussian profile of FBG) one can assert that if the amplitudes of sounding signals are equal, the central wave length corresponds to initial one (unperturbed grating state). While under the effect on FBG (temperature effect, for example) the profile undergoes shear deformation- the central wave length is shifted but the profile form remains constant. The position of sounding signals on the frequency axis is invariant but now they are on characteristics slope so their amplitudes stop being equal - the signal modulation coefficient on the photodetector will change. The given dependencies allow determining the shift of the central grating wave length considering the modulation coefficient value. The conducted numerical experiment confirmed the validity of high precision calculations. For the reason that the shift of the central reflection wave length depending on the temperature is linear, so the dependence of the modulation coefficient on the temperature will be linear as well, that allows using it in temperature sensors on the basis of FBG with the Gaussian profile of reflection.

УДК 621.391.25

Н. М. Скулкин, Е. В. Михеева

СТАБИЛИЗАЦИЯ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ СПАЕВ НА ЭТАПЕ МЕТАЛЛИЗАЦИИ ПЛАСТИЧНЫХ ЗАГОТОВОК КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ

Статья посвящена проблеме повышения прочности металлокерамических спаев коммутационных плат по отношению к ударным и термическим воздействиям в процессе технологической обработки и пайки кристаллов микросхем. Рассмотрена возможность шероховатости границы пластичного металлизационного слоя и пластичной подложки на стадии, предшествующей спеканию.

Ключевые слова: *металлокерамическая плата; металлизационный слой; скалывание; шероховатость; упрочнение.*

Введение. Проблема прочности металлокерамических спаев остается одной из наиболее актуальных при производстве изделий из радиокерамики. Увеличение разрешающей способности коммутационных плат, повышение степени интеграции, рост объемов производства делают проблему прочности спаев еще более значимой. Поскольку преобладающей в области производства металлокерамических плат остается технология, основанная на металлизации пластичных подложек с последующим их спеканием, то проблема упрочнения спаев приобретает ряд специфических признаков. Существенной становится возможность упрочняющего воздействия на стадии, предшествующей спеканию, возможность упрочнения спаев после сослоения плат в единый пакет, возможность согласования операций упрочнения с другими операциями технологической обработки. Анализ физических причин повышенной скалываемости спаев показал, что в основе проблемы лежит, в частности, низкая шероховатость границы пленка – подложка. В свою очередь низкую шеро-

ховатость определяет пластичное связующее, заполняющее пространство между твердыми частицами пластичной керамической заготовки и частицами металла (пленки). В процессе металлизации и спекания контур границы, выглаженный органическим связующим, сохраняется, хотя само связующее удаляется на операциях предобжига, предшествующих спеканию. В процессе спекания пространство, ранее заполненное пластичным связующим, заполняется расплавом стеклообразующих добавок. Гладкая граница пленки и подложки остается гладкой, но уже не пластичной, а хрупкой. Прямолинейность и хрупкость границы как нельзя лучше способствует распространению едва зародившихся трещин.

Целью данной работы является исследование и разработка методики оптимизации структуры спая путем возможного локального воздействия на заготовку плат без корректировки режимов, состава и структуры остальных операций технологического процесса без каких-либо изменений в составе материалов. Общеизвестно, что в технологических процессах, не поддающихся

декомпозиции, подобные изменения режимов, состава материалов или структуры операций сопровождаются существенной потерей контролируемости. Причиной потери контролируемости является жесткая схема регулирования, многооперационность процесса и высокая стоимость пробных прогонов продукции массового производства.

Несмотря на ограничения, вытекающие из существующих моделей разрушения спаев, полученные в работе результаты позволяют сделать ряд выводов и рекомендаций, касающихся теоретической и практической возможности упрочнения спаев, путем шероховатости уже сформированной и недоступной прямому воздействию границы металлизационного слоя и пластичной (неспеченной) керамической подложки.

В плане корректировки существующих моделей следует отметить их вероятностный характер при описании процессов разрушения керамических изделий в зависимости от приложенной нагрузки, чему в полной мере соответствует и методика исследуемой модели. Одним из показательных признаков вероятностного подхода к описанию прочностных свойств хрупких материалов является зависимость вида [1]:

$$P_{разр} = 1 - \exp \left\{ 1 - \frac{1}{41,5} \left(\frac{\sigma_p}{114,0} \right)^{19,75} \right\}, \quad (1)$$

где $P_{разр}$ – вероятность разрушения образца, σ_p – приложенная нагрузка.

Соотношение (1) относится к ситалам – материалам, структура которых близка структуре исследуемых материалов. Представленный автором указанной работы [1] анализ факторов, определяющих значение эмпирических коэффициентов, подтверждает зависимость этих коэффициентов от условий обработки и конструкции образцов.

В подобных условиях теоретической основой поиска и обоснования путей по-

вышения прочности металлокерамических спаев являются работы Вейбулла, К. Хеллана и других авторов в области теории прочности [1–3]. Связь между разрушающей нагрузкой (σ) и диаметром образца (a), применительно к изделиям из хрупких материалов, определяется в этих работах соотношением:

$$\sigma = \frac{\beta}{a^m}, \quad (2)$$

где β , m – эмпирические коэффициенты.

Аналогом диаметра образца применительно к спаю металл–керамика является возможная длина прямолинейного отрезка в толще стеклянной прослойки, формирующейся при спекании между слоем металлизации и подложкой платы. Вдоль таких отрезков трещина в стекле распространяется без препятствий. В случае нанесения металлизации на плоскую поверхность платы длина отрезков существенно превышает критическую длину трещинообразования и сравнима с шириной спая. В спаях с шероховатой границей длина отрезков определяется расстоянием между выступами шероховатости и уменьшается, согласно результатам исследования слепков с торцов, не спеченных заготовок плат, до размера шероховатостей торца, то есть до значений 5...50 мкм. В то же время слепок, полученный с поверхности не спеченной платы, даёт для среднего значения отклонения от средней линии (R_a) величину не 5...50, как на торцах плат, а 0,5...1 мкм, то есть на порядок меньшую.

Соотношение, аналогичное соотношению Вейбулла, приводится и в работах школы Журкова, например, в [4]:

$$\sigma = C_1 + \frac{C_2}{a}, \quad (3)$$

где C_1 , C_2 – эмпирические коэффициенты.

В работах Г. Н. Бертенева и др. [2] для случая изменения размеров образца (R) при его фиксированном объеме (V)

получено соотношение:

$$(L)^2 = \frac{n \cdot V}{2\alpha \cdot \beta}, \quad (4)$$

где L – длина опасной трещины.

$$\beta = \frac{R}{R_0}, \quad (5)$$

n, α, R_0 – постоянные, R – радиус образца цилиндрической формы.

По результатам анализа слепков и результатов исследований скалываемости планарных и торцевых контактных площадок следует, что уменьшение размера прямолинейных отрезков у межслоевых прослоек стекла металлокерамического спая сопровождается не менее чем двухкратным увеличением прочностных свойств образцов по мере увеличения шероховатости с 0,5...1 до 5...50 мкм.

Предложенная в работе методика шероховатости плоскости металлокерамического спая основана на центрифугировании образцов вокруг оси, параллельной плоскости спая [4]. Степень шероховатости, достигаемая при центрифугировании, может быть оценена исходя из величины динамической вязкости связующего подложки (акрил с добавлением дибутилфталата), плотности частиц (вольфрам, глинозём), их размера (1...3 мкм) и величины центробежной силы и времени центрифугирования.

Для оценки режима шероховатости границы пленка–подложка нижнюю границу слоя металлизации можно рассматривать как систему частиц, смещение которых определяется центробежной силой, с одной стороны, и силой вязкого трения – с другой [5]. Поскольку динамическая вязкость связующего подложки достаточно велика (5300 Па·с), а величина требуемого смещения не превышает $(3...5) \cdot 10^{-6}$ м, то есть не превышает 2...5 диаметров частиц металлизации, можно предположить, что сила вязкого трения, действующая на нижнюю, утапливаемую в подложке частицу металлизации, пропорциональна

радиусу частицы (r). В то же время утапливающая частицу центробежная сила пропорциональна массе столба частиц, опирающихся на исследуемую частицу. Уравнение движения частицы в этом случае принимает вид:

$$mh''_{\text{ш}} = m\omega^2 R - 6\pi\eta_c r h'_{\text{полн}}, \quad (6)$$

где $m = \pi r^2 h_{\text{полн}} \rho$.

Или, после оговоренных преобразований:

$$h''_{\text{ш}} + \frac{6\eta_c}{r h_{\text{полн}} \rho} h'_{\text{ш}} - \omega^2 R = 0, \quad (7)$$

где $h_{\text{ш}}$ – смещение частиц, перпендикулярное границе пленка–подложка; R – радиус центрифуги; η_c – динамическая вязкость связующего; ω – угловая скорость вращения центрифуги; m – масса столба частиц высотой $h_{\text{полн}}$ радиусом основания r ; ρ – плотность материала частиц.

Решение уравнения (7) после несложных преобразований приобретает вид:

$$h_{\text{ш}} = \frac{\omega^2 r R h_{\text{полн}} \rho}{6\eta_c} t_{\text{ш}} - \frac{\omega^2 r^2 h_{\text{полн}} \rho^2 R}{36\eta_c^2} \left(1 - \exp \left\{ -\frac{6\eta_c t_{\text{ш}}}{r h_{\text{полн}} \rho} \right\} \right), \quad (8)$$

где $t_{\text{ш}}$ – время центрифугирования.

Следует отметить, что более адекватным является использование в формуле (8) в качестве толщины пленки не истинного ($h_{\text{полн}}$), а эффективного ее значения (h_3), учитывающего пористость металлизационного слоя (Π) $h_3 = h_{\text{полн}} \Pi$.

Подстановка в выражение для смещения частиц ($h_{\text{ш}}$) значений, характерных для условий производства металлокерамических плат, показывает, что с погрешностью, не превышающей в рамках сделанных допущений 0,001 $h_{\text{ш}}$, можно принять:

$$h_{\text{ш}} = \frac{\omega^2 R r h_n \rho}{6\eta_c} t_{\text{ш}} \Pi. \quad (9)$$

Для значений $R=0,25$ м; $\rho=19 \cdot 10^3$ кг·м⁻³ (вольфрам); $\omega=91$ рад·с⁻¹ (15 об·с⁻¹); $r=0,5 \cdot 10^{-6}$ м; $h_{\text{полн}}=30 \cdot 10^{-6}$ м; $\eta_c=5300$

Па·с и требуемой глубины шероховатости $5 \cdot 10^{-6}$ м время шероховатости ($t_{ш}$) составляет 240 с, что вполне приемлемо с прикладной точки зрения. Результаты эксперимента по шероховатости приведены на рис. 1.

Экспериментальное исследование возможности шероховатости спая в соответствии с [4, 6, 7] осуществлялось путём центрифугирования на центрифуге марки WEROWKA -MPW-8. Радиус центрифугирования составил 0,25 м, число оборотов 900 в минуту. Степень шероховатости оценивалась путём получения эпоксидного слепка с поверхности пластифицированной (не спечённой) керамической подложки. Слепок изготавливался путем смешивания вольфрамового порошка с

эпоксидной смолой в качестве связующего. Пропорция между частицами вольфрама и эпоксидным связующим, а также вязкость полученной таким образом пасты отвечали соответствующим характеристикам металлизационной пасты. После центрифугирования и отверждения эпоксидной смолы пластичная (не спечённая) керамическая подложка растворялась в толуоле. Анализ профилограмм слепков получен на профилографе «PERTHOMETER M4P», представлен на рис. 1.

На рис. 2 приведена гистограмма распределения по размеру (диаметру) твердых частиц пластичной керамической подложки на стадии сослоения плат в многослойную конструкцию.

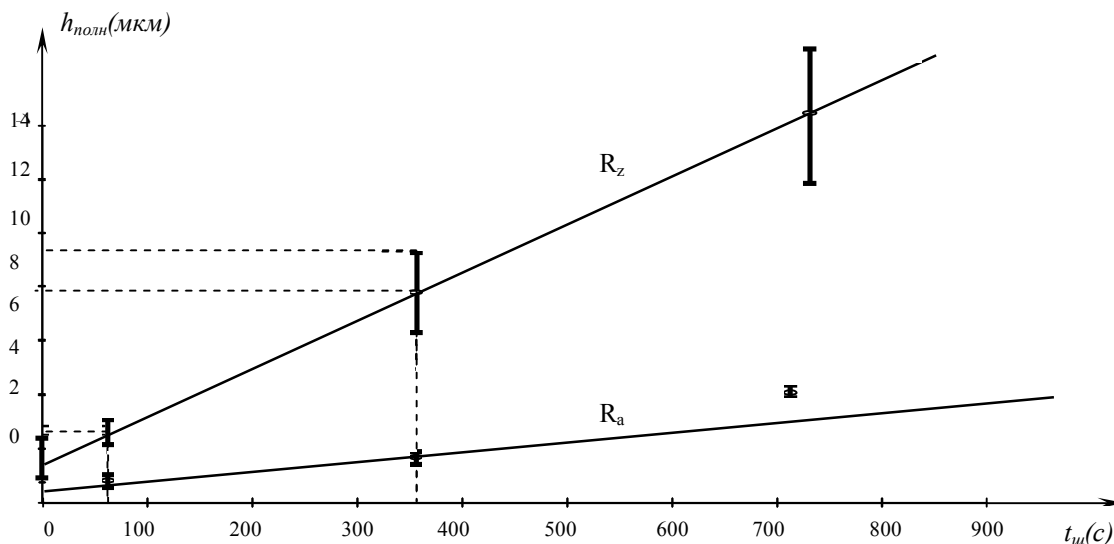


Рис. 1. Влияние времени центрифугирования на параметры шероховатости спая подложка – металлизационный слой

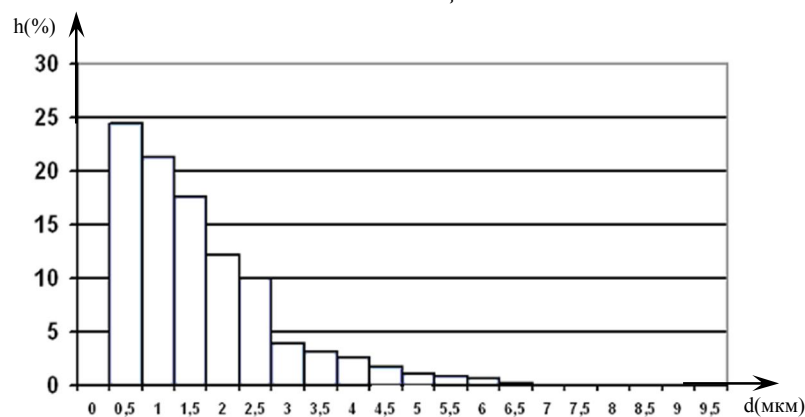


Рис. 2. Гистограмма распределения по диаметру d (мкм) твердых частиц пластичной керамической подложки плат

Вывод. В заключение следует отметить, что полученные результаты подтверждают эффективность предложенного метода стабилизирующего шерохования спая металл – керамика. При этом необходимо учесть, что для сослоения однослойных металлокерамических плат в многослойные в технологии применяются пасты, состав которых близок составу подложек. Твердые частицы такой пасты

– это преимущественно окись алюминия, плотность которой в пять раз ниже плотности вольфрама, а средний размер частиц в 1,5...2 раза больше частиц металлизационной пасты. В этих условиях скорость вращения центрифуги, обеспечивающая необходимую степень шерохования при тех же временных затратах, должна быть в два раза выше, чем при шероховании границы металлизация – подложка.

Список литературы

1. Пух, В.Л. Прочность и разрыв стекла / В.Л. Пух. – Л: Наука, 1973 – 156 с.
2. Бартнев, Г.Н. Заводская лаборатория / Г.Н. Бартнев. – Йошкар-Ола, 1960. – № 26. – 136 с.
3. Хеллан, К. Введение в механику разрушения / К. Хеллан; Пер.с англ. – М.: Мир, 1988. – 364 с.:ил.
4. Пат. 2164904 РФ, МПК С 04 В 41/88 Способ металлизации керамики/Е.В. Михеева, Н.М. Скулкин (РФ)-99118052; заявлено 17.08.99; опубл. 10.09.2001г.
5. Лайнер, А.И. Производство глинозема / А.И. Лайнер, Н.И. Еремин, Ю.А. Лайнер, И.З. Певзнер – М.: Металлургия, 1978. – 344 с.
6. Козлов, П. И. Проблема разработки системы качества металлокерамических плат и корпусов микросхем / П.И. Козлов, Н.М. Скулкин, Е.В. Михеева // Вестник Марийского государственного технического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2011. – №3 (13). – С. 102 -108.

References

1. Puh V. L. Prochnost i razryv stekla [Glass strength and break]. Leningrad, Nauka. 1973. 156 p.
2. Bartenev G. N. Zavodskaya laboratoriya [Plant Laboratory]. Yoshkar-Ola. 1960. No 26. 136 p.
3. Hellan K. Vvedenie v mekhaniku razrusheniya [Introduction to Fracture Mechanics]; trans. from English. Moscow, Mir. 1988. 364 p.: il.
4. Miheeva E. V., Skulkin N. M. Sposob metallizatsii keramiki [Ceramic Metallization Method]. Patent RF, no 2164904, 2001.
5. Lainer A. I., Eremin N. I., Lainer Yu. A., Pevzner I. Z. Proizvodstvo glinozema [Argil Production]. Moscow, Metallurgy. 1978. 344 p.
6. Kozlov P. I., Skulkin N. M., Miheeva E. V. Problema razrabotki sistemy kachestva metallokeramicheskikh plat i korpusov mikroskhem [The Problem of the Development of the Quality System of Metal-ceramic Boards and Microcircuit Packages]. Vestnik Mariiskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Ser. Radiotekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Mari State Technical University. Ser. Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2011. No 3 (13). P.102-108.

Статья поступила в редакцию 08.05.13.

СКУЛКИН Николай Михайлович – доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – физические причины дефектности изделий радиоэлектроники. Автор свыше 40 публикаций и 20 авторских свидетельств и патентов.

E-mail: nskulkin48@mail.ru

МИХЕЕВА Елена Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – исследование радиоматериалов. Автор 25 публикаций.

E-mail: miheevaev65@mail.ru

SKULKIN Nikolay Mikhailovich – Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Chair of Environmental Safety at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is physical reasons for the faultiness of radio electronics articles. The author of more than 40 publications and 20 certificates and patents.

E-mail: nskulkin48@mail.ru

MIHEEVA ELENA VIKTOROVNA – Associate Professor of the Chair of Radio Equipment Engineering and Production at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is radio material investigation. The author of 25 publications.

E-mail: miheevaev65@mail.ru

N. M. Skulkin, E. V. Miheeva

STABILIZATION OF METAL-CERAMIC SEALS AT THE STAGE OF THE METALLIZATION OF PLASTIC BLANKS OF SWITCHING BOARDS

Key words: metal-ceramic board; metallized layer; chipping; roughing; hardening.

When producing radio ceramics articles the problem of the metal-ceramic seal strength is one of the most important ones. The analysis of the physical causes of the increased seal chipping showed that the low roughness of the border film-substrate underlies the problem. The low roughness is determined by the plastic binding substance, filling the space between solid particles of the plastic ceramic blank and metal (film) particles.

The purpose of the work is the research and the development of seal structure optimization methods by means of the possible local effect on the blank of boards. The method of the roughing of a metal-ceramic seal plane, based on the centrifugation of samples about an axis, parallel to the seal plane was suggested. The degree of the roughness, reached during the centrifugation can be estimated on the basis of the value of dynamic viscosity of the binding substance of the substrate, particle number density, their sizes, magnitude of a centrifugal force and the centrifugation time.

The experimental investigation into the seal roughing possibility was conducted by means of the centrifugation by the centrifuge of the trademark WEROWKA-MPW-8. The radius of the centrifugation was 0,25 m, the rotary speed was 900 per minute. The degree of the roughness was estimated by getting the epoxy cast from the surface of the plasticized (not sintered) ceramic substrate.

The received results confirm the efficiency of the suggested method of the stabilizing roughness of the seal metal-ceramic.

УДК 620.168.36

А. В. Мороз

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ ПЛЕНОК НИТРИДА АЛЮМИНИЯ В ПРОЦЕССЕ ИХ ПОЛУЧЕНИЯ

Описаны методики аналитического контроля параметров кристаллической структуры (размера кристаллитов, степени кристалличности пленки, определяемой соотношением аморфной и кристаллической фаз) тонких пленок нитрида алюминия. Данные методики основываются на эмпирических соотношениях между: микротвердостью пленки и размером кристаллитов, из которых она состоит; вносимыми акустоэлектронными потерями тестовой линией задержки на поверхностных акустических волнах и степенью кристалличности пленки нитрида алюминия, на основе которой эта линия задержки изготовлена.

Ключевые слова: пленки нитрида алюминия; контроль кристаллического строения; ПАВ; магнетронное распыление; акустоэлектронные исследования.

Введение. На всех стадиях технологического процесса изготовления приборов функциональной электроники (например, приборов на поверхностных акустических волнах (ПАВ)) на основе нитрида алюминия (AlN), в которых используются вакуумные методы, требуется контроль структурных, функциональных и механических параметров всех слоев [1]. Для контроля каждой из групп этих параметров существуют свои методики, требующие применения специализированных приборов.

Функциональные свойства (акустические, диэлектрические и др.) тонких пленок AlN в приборах на их основе определяются их кристаллическим строением, которое характеризуется степенью кристалличности (соотношением кристаллических и аморфных фаз), преимущественной ориентацией (текстурой) и углом разориентации кристаллитов в пленке, областью когерентного рассеяния и др. [2, 3]. Для исследования кристаллического строения поликристаллических тонких пленок применяются дифракционные методы [4].

Но эти методы довольно сложны и трудоемки для их применения в условиях изготовления партии приборов на основе этих пленок.

При контроле поверхности тонких пленок незаменимы методы измерений, связанные с использованием сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ), особенно при современной тенденции к наноминиатюризации. Но стандартные методики не позволяют использовать СЗМ для оценки кристаллического строения пленок [5].

Из всего вышеперечисленного выявляется актуальность разработки простых методик контроля кристаллического строения пленок AlN, расширяющих функциональные возможности приборов контроля и создание систем комплексного контроля пленок AlN, а также характеристик приборов, в основе которых лежат эти пленки.

Цель исследования – разработка системы контроля степени кристалличности пленок нитрида алюминия в процессе их получения.

Весь материал, подлежащий исследованию, был получен при помощи магнетронного распыления на установке, описанной в [6, 7].

Методика контроля средних размеров кристаллитов тонкой пленки по ее микротвердости. Наноструктура пленок и конкретно размер кристаллитов d в размерной области до 100 нм является доминирующим при определении микротвердости тонких пленок [8–10]. На этой зависимости базируется методика контроля размера кристаллитов по ее микротвердости.

Было сформировано пять пленок нитрида алюминия толщиной 6 мкм на ситалловых подложках с различными размерами кристаллитов. Метод измерения микротвердости описан в [11]. За размер кристаллитов был принят размер области когерентного рассеяния, полученный методом рентгеновской дифракции. Все измерения проводились с 12-кратной повторностью, результаты усреднялись. Полученные усредненные данные эксперимента приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты эксперимента, связывающие средний размер кристаллитов пленки нитрида алюминия с ее микротвердостью

№ образца	HV, ГПа	ΔHV , ГПа	d , нм	Δd , нм
1	17,6	1,06	19	1,78
2	15,1	0,65	25	1,61
5	10,8	0,24	34	1,16
4	10,4	0,21	36	1,12
3	9,9	0,16	38	0,95

Эмпирическое соотношение между значениями среднего размера кристаллитов в пленке AlN и ее микротвердостью описывается линейной формулой (1) в области значений микротвердости от 10 до 17,5 ГПа. Графическая зависимость, определяемая соотношением (1), представлена на рис. 1:

$$d = 61 - 2,4 \cdot HV, \quad (1)$$

где HV – микротвердость пленки по Виккерсу, ГПа; d – ОКР, нм.

На основании эмпирического выражения (1) предложена методика аналитического контроля среднего размера кристаллитов тонких пленок нитрида алюминия, позволяющая по результатам регистрации ее микротвердости (микротвердость пленки находится в диапазоне от 10 до 17,5 ГПа) контролировать средний размер кристаллитов в плоскости, параллельной подложке с точностью не хуже 10 %.

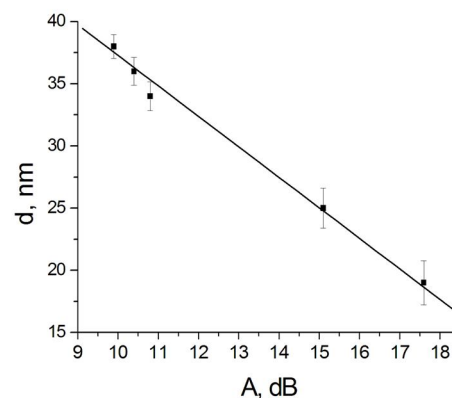


Рис. 1. График эмпирического соотношения между средним размером кристаллитов пленки нитрида алюминия и ее микротвердостью

Двухпроекционный метод зондовой микроскопии. Методика локального исследования поверхности по двум проекциям заключается в том, что дополнительно к стандартной фронтальной проекции вводится боковая проекция приповерхностного слоя, которая отражает кинетику сопряжения приповерхностных слоев. С помощью этой методики регистрируется информация (рис. 2) о текстуре (наличии преимущественного роста) в пленке AlN, об объемных характеристиках (размерах во всех направлениях и форме кристаллов) и ориентации (угле наклона оси кристаллита ψ) кристаллитов тонких пленок, о толщине пленки AlN (h). По регистрируемым параметрам определяется кристаллическое строение пленки. В выполненном эксперименте эти значения параметров, усредненных по 10 измерениям, составили для d – 30 ± 10 нм, ψ – $85^\circ \pm 1^\circ$, h – $8,2 \pm 0,05$ мкм. Также обнаружено двойникование кристаллитов.

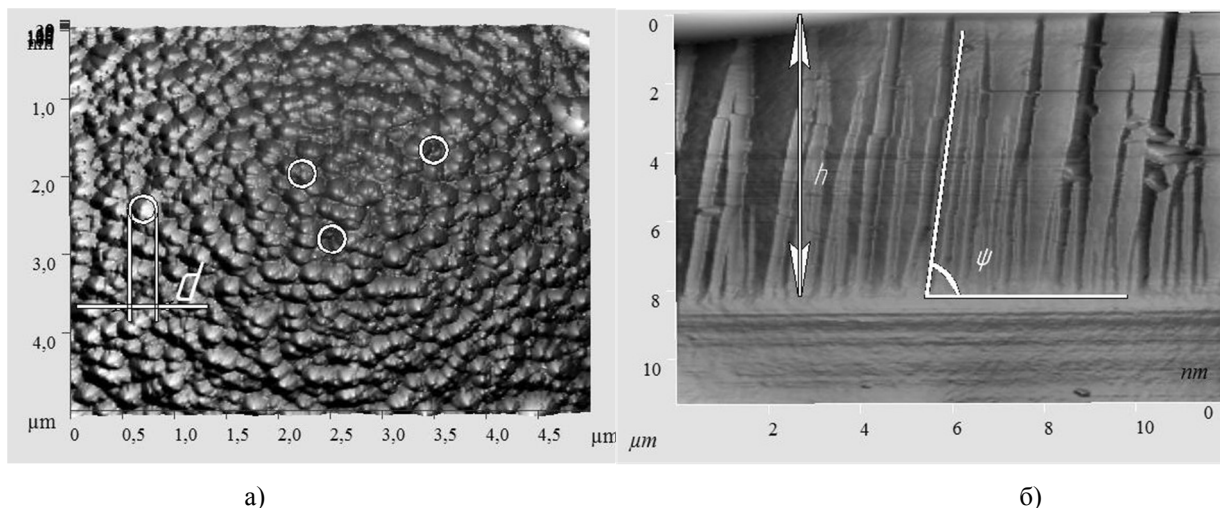


Рис. 2. АСМ-изображения пленки AlN на стеклянной подложке:
 а) поверхности пленки; б) скола пленки (d – размер кристаллитов в плоскости, параллельной подложке; h – толщина пленки; ψ – угол наклона кристаллитов)

Таким образом, для информативного исследования вместо изучения бесконечного количества фронтальных поверхностей послойных срезов нужно провести исследование только двух проекций – фронтальной и боковой, по которым можно адекватно судить о строении изучаемого слоя по всей толщине.

Методика локального исследования поверхности по двум проекциям имеет следующие преимущества: увеличивается информативность результатов исследований; появляется возможность объемных исследований приповерхностных слоев с высоким разрешением; сокращается количество измерений при объемных исследованиях приповерхностных слоев; повышается адекватность восприятия изображений поверхности.

Использование предложенной методики будет особенно полезно при локальном исследовании тонких пленок, поскольку дополнительная боковая проекция практически исчерпывающе отражает кинетику их роста на различных подложках.

Методика аналитического контроля степени кристалличности пленок нитрида алюминия по вносимым потерям линии задержки на основе этих пленок. Для проведения акустоэлектронных исследований были приготовлены

тестовые линии задержки (ЛЗ) на основе исследуемых пленок AlN. Определение вносимых ЛЗ акустоэлектронных потерь выполнялось по методике [1, 2].

Была исследована взаимосвязь между кристаллическим строением пленок нитрида алюминия и акустоэлектронными свойствами ЛЗ на основе этих пленок. Результаты усредненных десятикратных измерений сведены в табл. 2.

Таблица 2

Акустоэлектронные и кристаллические свойства линий задержек на основе нитрида алюминия

№ ЛЗ	A, дБ	ΔA , дБ	J, %	ΔJ , %
1	33	1,61	95	20,77
2	35	1,59	59	9,09
3	36	1,65	51	6,23
4	40	1,61	35	2,00
5	45	1,60	34	0,68
6	50	1,64	28	0,26
7	52	0,73	26	0,26

Анализ таблицы показывает, что степень кристалличности и вносимые потери взаимосвязаны. На рис. 3 представлен график этой зависимости. Зависимость описывается эмпирическим выражением (2), по которой можно определить степень кристалличности:

$$J = 27,62 + 2544675 e^{-A/3,11}, \quad (2)$$

где A – вносимые потери ЛЗ, дБ; J – степень кристалличности пленки нитрида алюминия, %.

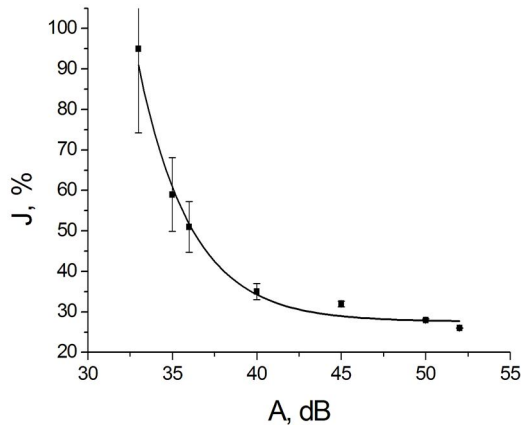


Рис. 3. График эмпирического соотношения между значениями степени кристалличности пленки нитрида алюминия, лежащей в основе тестовой ЛЗ, и вносимыми ЛЗ-потерями

Таким образом, измеряя вносимые потери тестовой ЛЗ и применяя обработку результатов измерений согласно выражению (2), можно осуществлять аналитический контроль степени кристалличности пленки AlN в диапазоне до 50 % с точностью не хуже $\pm 5\%$. Для пленок со степенью кристалличности больше 50 % выражение (2) не применимо, так как степень кристалличности пленки AlN в этом случае незначительно влияет на вносимые потери ЛЗ, поэтому при контроле этих пленок производится измерение вносимых потерь ЛЗ с целью установления соответствия значения вносимых потерь контролируемому диапазону, то есть достаточной степени кристалличности пленки AlN соответствуют потери в ЛЗ со значениями, меньшими 36 дБ.

Метод аналитического контроля степени кристалличности пленок нитрида алюминия. Для контроля степени кристалличности и оптимизации технологического режима осаждения пленок широкое применение находят методики экспериментальных исследований, предусматривающие построение математиче-

ской модели. Перед началом массового производства приборов производится идентификация технологического процесса. Целью идентификации является формирование математической модели технологического процесса получения слоистых структур на основе пленок AlN, полученных методом магнетронного распыления. Эта математическая модель связывает технологические параметры со степенью кристалличности получаемой пленки нитрида алюминия. Для формирования модели производятся измерения степеней кристалличности пленок нитрида алюминия с помощью методов рентгеноструктурного анализа при различных условиях осаждения. Порядок формирования математической модели включает 20 экспериментов по получению пленок нитрида алюминия при различных условиях напыления и выбор этих условий случайным образом из плана эксперимента, составленного по рототабельному центральному композиционному плану.

В качестве изменяемых факторов выбирались рабочее давление газов, соотношение рабочего и реактивного газов и время распыления. Другие контролируемые параметры фиксировались и поддерживались с достаточной точностью: мощность энергии, подводимой к магнетрону, равнялась $0,7 \pm 0,05$ кВт; расстояние мишень-подложка – 65 ± 1 мм; температура подложки – $450 \pm 10^\circ\text{C}$. Температура подложки очень сильно влияет на степень кристалличности пленки. По этой причине ее значение было зафиксировано и не вошло в модель, чтобы проявилось влияние других параметров на степень кристалличности пленки. Осаждение проводилось на стеклянные подложки. Степень кристалличности измерялась при помощи рентгеновского дифрактометра. Центр плана эксперимента: рабочее давление 2 Па, содержание азота 45 %; время напыления 60 мин. Интервал варьирования параметров соответственно $\pm 0,5$ Па, $\pm 5\%$, ± 20 мин.

Полученная математическая модель (3) процесса формирования пленок нитрида алюминия, формализующая значения параметров технологического процесса в степень кристалличности пленок нитрида алюминия, является адекватной на 95 % в исследуемом диапазоне.

$$Y = 4,182 - 7,177X_1 + 1,046X_2 + 8,417X_3 + 4,721X_1X_2 - 4,084X_1X_3 + 3,054X_2X_3 + 3,769X_1^2 + 5,484X_1^2 + 3,7X_3^2, \quad (3)$$

где Y – степень кристалличности, %; X_1 , X_2 , X_3 – приведенные значения соответственно давления рабочего газа, содержания азота в смеси газов, времени напыления.

Выражение (3) используется при реализации аналитического контроля степени кристалличности пленок нитрида алюминия для области допустимых параметров технологического процесса ее получения. Структурная схема предложенного метода аналитического контроля кристалличности пленки AlN представлена на рис. 4, здесь X_1, X_2, X_3 – приведенные технологические параметры (соответственно давление газа, парциальное давление газов и время напыления), J_0 – степень кристалличности полученной пленки нитрида

алюминия, являющаяся информативным входным сигналом, J_p – заданное значение степени кристалличности, J_p – расчетное значение степени кристалличности, $\Delta J_p = J_p - J_0$ – отклонение расчетного значения степени кристалличности от заданного, $\Delta J_p = J_0 - J_3$ – отклонение измеренного значения степени кристалличности от заданного, $\Delta J_p - \Delta J$ – разность отклонений, являющаяся выходным сигналом.

Входной информативный сигнал J_0 , отражающий значение степени кристалличности пленки AlN, приходит на блок сравнения 12. В этом блоке из значения J_0 вычитается значение заданной степени кристалличности, которое хранится в блоке 15. Первый раз отклонение $\Delta J = J_0 - J_p$ подается в блок сравнения 14, если оно не входит в допустимый интервал, задаваемый в технологическом процессе. В последующие разы, когда это отклонение входит в допустимый интервал, сигнал ΔJ попадает в блок 16, в котором текущее его значение сравнивается с предыдущим. Если текущее значение ΔJ меньше предыдущего, тогда сигнал ΔJ опять подается в блок 14. Если значение сигнала больше – цикл контроля степени кристалличности пленки прекращается и выдается сигнал о необходимости дополнительного контроля.

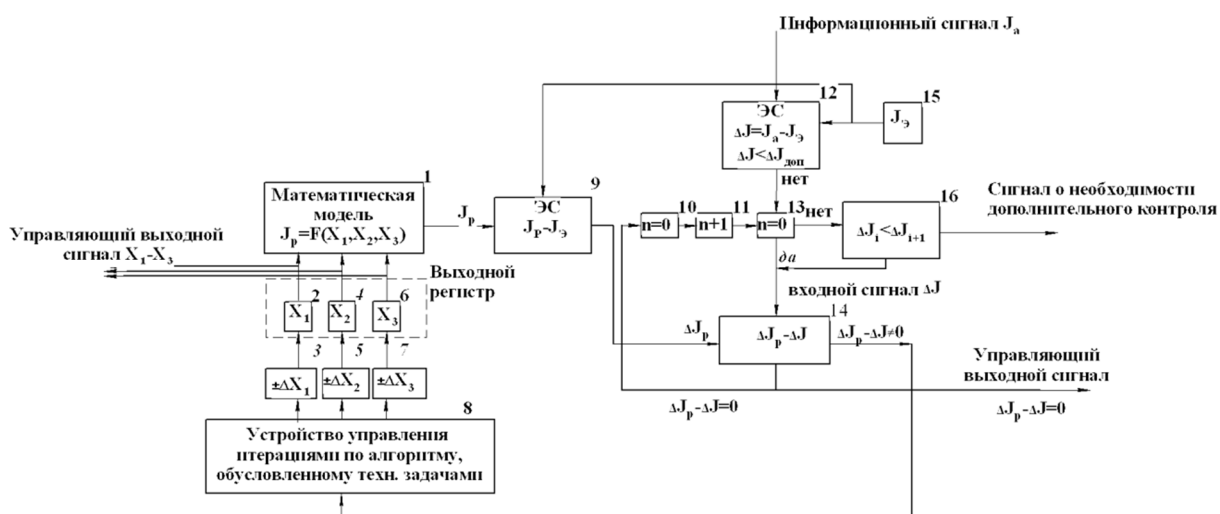


Рис. 4. Структурная схема процесса реализации метода аналитического контроля степени кристалличности пленок AlN

Заданные первоначальные значения параметров технологического процесса записываются в выходной регистр (2, 4, 6). Значения X_1 – X_3 поступают на блок 1, где формализуются в значения степени кристалличности J_p по математической модели (3). После чего J_p поступает на блок сравнения 6, где сравнивается с эталонным значением степени кристалличности, на выходе которого получается значение разности $\Delta J_p = J_0 - J_p$. Это значение ΔJ_p поступает на блок сравнения 14. На выходе блока 14 формируется значение разности отклонений расчетного и измеренного значений степени кристалличности от эталонной $\Delta J_p - \Delta J$. Если разность $\Delta J_p - \Delta J$ не равна нулю, то это служит сигналом управляющему устройству 8 изменить значения параметров X_1 – X_3 . Таким образом, в каждом цикле аналитического контроля изменяется одно из значений параметров X_1 – X_3 . За несколько циклов поочередно изменяются значения параметров, начиная с X_1 и заканчивая X_3 . Полученные значения величин записываются в выходной регистр, из которого подаются на вход блока 1.

Случай, когда $\Delta J_p - \Delta J$ равна нулю, служит сигналом о том, что установленные в выходном регистре значения технологических параметров подобраны верно и тонкие пленки, полученные при этих параметрах, окажутся с заданной степенью кристалличности, при этом происходит сброс счетчика 11.

Метод аналитического контроля степени кристалличности пленок AlN позволяет уменьшить отклонение степени кристалличности от заданного значения и найти технологические параметры, уменьшающие это отклонение.

Система контроля кристаллического строения пленок нитрида алюминия в технологическом процессе. Система контроля параметров пленок нитрида алюминия и управления технологическим процессом их получения должна повысить воспроизводимость степени кристал-

личности тонкопленочных структур на основе нитрида алюминия, используемых в ПАВ-приборах. Этот параметр является определяющим для тонких пленок нитрида алюминия. Именно поддержание значения степени кристалличности пленки нитрида алюминия в поле допуска приводит к повышению выхода годных приборов. Тогда как контроль степени кристалличности пленок нитрида алюминия на ранней стадии «ухода» неконтролируемых параметров технологического оборудования (скорости откачки газа, величины магнитной индукции магнетронной распылительной системы (МРС) и т.д.) от их оптимальных значений позволяет сформировать новые значения параметров технологического процесса, обеспечивающих коррекцию кристалличности пленки.

На рис. 5 представлена разработанная структурная схема системы контроля параметров пленки нитрида алюминия. Система контроля состоит из следующих функциональных блоков: блок технологического процесса получения ПАВ-приборов (I); блок функционального контроля (II); блок контроля степени кристалличности и управления технологическими параметрами (III); блок контроля работоспособности технологии (IV).

Блок технологического процесса (III) получения ПАВ-приборов включает в себя установку магнетронного распыления (11), на выходе которой помимо ПАВ-приборов получается тестовая ЛЗ (15). Значения параметров технологического процесса X_1 – X_3 , соответственно давление газа, парциальное давление газов и время напыления записаны в регистре данных (блоки 5–7).

Блок функционального контроля (II) включает в себя акустоэлектронный контроль тестовой ЛЗ (19), который выдает информацию о вносимых ЛЗ-потерях в децибелах. Эта информация попадает на блок преобразования акустических потерь в степень кристалличности J_0 , преобразование производится по выражению (1).

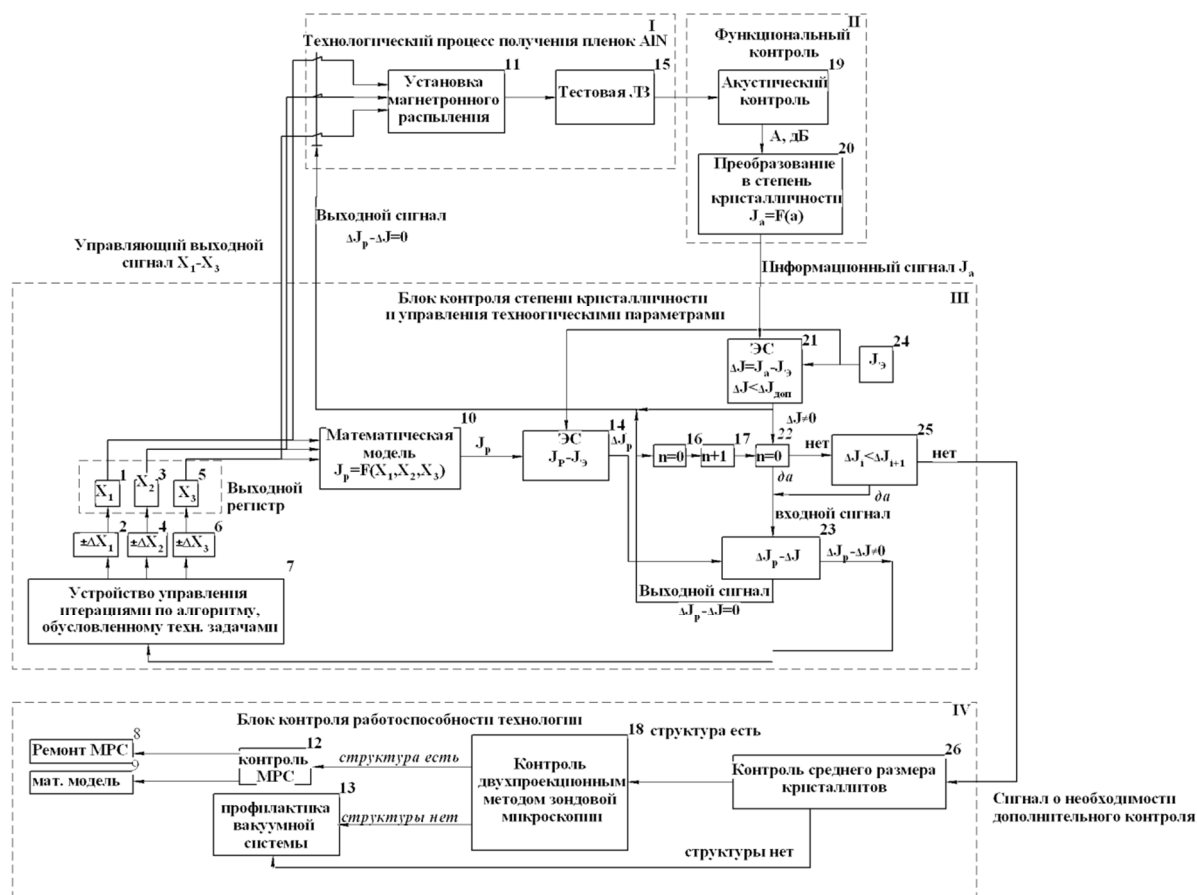


Рис.5. Система контроля кристаллического строения пленок нитрида алюминия в технологическом процессе

Блок контроля степени кристалличности и управления технологическим процессом (III) работает следующим образом. Входным информационным сигналом служит сигнал J_0 , полученный с блока функционального контроля. Работа части блока, отвечающей за контроль отклонения степени кристалличности J_0 от заданной J_z , подробно описана выше. Дополнительно к этому описанию сигнал ΔJ в случае, когда он не входит в интервал допуска, размыкает ключ, связывающий выходной регистр с входом в блок технологического (I). После того, как вырабатывается выходной сигнал $\Delta J_p - \Delta J$, равный нулю, записанные в блоках 1, 3, 5 параметры подаются на вход блока 11 и технологический процесс продолжается до тех пор, пока вновь отклонение значения степени кристалличности от заданного не выйдет за пределы допустимых значений. Еще

одним выходным сигналом этого блока является результат сравнения в блоке 25, когда при применении вырабатываемых корректирующих воздействий отклонение значения степени кристалличности тестовой ЛЗ от заданного значения не уменьшается. В таком случае вступает в работу блок контроля работоспособности технологии (IV).

На блок контроля работоспособности технологии (IV) поступает пленка нитрида алюминия, в блоке 26 контролируется средний размер кристаллитов по ее микротвердости. Если размер кристаллитов не соответствует допустимому значению, тогда производится профилактика вакуумной системы установки. В случае, если размер кристаллитов находится в поле допуска, производится дополнительный контроль двухпроекционным методом зондовой микроскопии наличия кристал-

лической структуры в слое нитрида алюминия. Если структура обнаруживается, то это значит, что параметры МРС изменились и блок контроля (III) не справляется с задачей из-за того, что математическая модель технологического процесса, формализующая технологические параметры процесса получения пленки AlN в ее степень кристалличности, не работает. После этого принимается решение о ремонте МРС и возврате ей прежних параметров, либо о построении новой математической модели во вновь образовавшихся технологических условиях.

Выводы. Разработанные методики могут найти свое применение при изготовлении серии пленок AlN, используемых в ПАВ-приборах, для нетрудоемкого

оперативного контроля кристаллических свойств этих пленок. Предложен метод контроля степени кристалличности пленок AlN, использующий алгоритм формализации технологических параметров в степень кристалличности и обеспечивающий условия компенсации ее отклонения. Предложенная система позволяет корректировать кристаллическую структуру пленок нитрида алюминия на ранних стадиях «ухода» параметров технологического процесса получения этих пленок. Таким образом, эта система увеличивает воспроизводимость технологического процесса получения пленок AlN.

Данные методики могут быть применены к тонким пленкам из других материалов, полученных магнетронным распылением.

Список литературы

1. Технология тонких пленок (справочник). В 2 т. Т.2 / Под ред. Л. Майссела, Р. Глэнга; Пер. с англ. Под ред. М.И. Елинсона, Г.Г. Смолко. – М.: Советское радио, 1977. – 768 с.
2. Белянин, А.Ф. Слоистые структуры подложка/AlN в акустоэлектронике / А.Ф. Белянин, Н.И. Сушенцов // Материалы 4 Российской конференции «Высокие технологии в промышленности России» / под ред. А.Ф. Белянина, Ю.В. Панфилова, М.И. Самойловича. – М.: Техномаш, 1998. – С. 77-88.
3. Odintsov, M.A. AlN films for SAW sensors / M.A. Odintsov, N.I. Sushentsov, T.L. Kudryavtsev // Sensors and actuators. – 1991. – № 28. – P. 203–206.
4. Уманский, Я.С. Кристаллография, рентгенография и электронная микроскопия / Я.С. Уманский, Ю.А. Скаков, Л.Н. Расторгуев и др. – М.: Металлургия, 1982. – 632 с.
5. Миронов, В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии / В.Л. Миронов. – Н.Новгород: РАН, 2004. – 114 с.
6. Сушенцов, Н.И. Установка магнетронного распыления для формирования функциональных тонких пленок / Н.И. Сушенцов, А.В. Мороз, А.А. Степанов // Материалы VII Международной научно-технической конференции «Вакуумная техника, материалы и технология» / под ред. А.Ф. Белянина, Ю.В. Панфилова, М.И. Самойловича. – М.: Техномаш, 2012. – С.203–206.

References

1. Tekhnologiya tonkikh plenok (spravochnik) [Handbook of thin film technology] Two volumes. Vol. 2 / Edited by L. Maissel, R. Glang. New York, 1970. Translation from English M. I. Elinson, G. G. Smolko. Moscow, Sovetskoe radio, 1977. 768 p.
2. Belyanin A. F., Sushentsov N.I. Sloistye struktury podlozhka/AlN v akustoeletronike [The Substrate / AlN Layer Structures in Acoustoelectronics]. Materialy 4 Rossiyskoy konferentsii «Vysokie tekhnologii v promyshlennosti Rossii» [The Proceedings of the 4th Russian Conference «High Technologies in Russian Industry»]. Edited by A. F. Belyanin, Yu. V. Panfilov, M. I. Samoilovich. Moscow, Tekhnomash, 1998. P. 77-88.
3. Odintsov M.A., Sushentsov N.I., Kudryavtsev T.L. AlN films for SAW sensors. Sensors and actuators. 1991. No 28. P. 203–206.
4. Umansky Ja. S., Skakov Ju. A., Rastorguev L.N., et al. Kristallografiya, rentgengrafiya i elektronnyay mikroskopiya [Crystallography, Roentgenography and Electron Microscopy]. Moscow, Metallurgiya, 1982. 632 p.
5. Mironov, V. L. Osnovy skanirujushchey zondovoy mikroskopii [Basics of Scanning Probe Microscopy]. Nizhny Novgorod, The Russian Academy of Sciences, 2004. 114 p.
6. Sushentsov N. I., Moroz A.V., Stepanov A.A. Ustanovka magnetronnogo raspyleniya dlya formirovaniya funktsional'nykh tonkikh plenok [Magnetron Sputtering Unit for Forming of Functional Thin Films]. Materialy VII Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Vakuumnaya tekhnika, materialy i tekhnologiya» [The Proceedings of VII International Scientific and Technical Conference

7. Сушенцов, Н.И. Установка ВЧ-магнетронного распыления для получения пленок титаната бария стронция. / Н.И. Сушенцов, А.В. Мороз, В.Е. Филимонов и др. // Материалы XVII Международной научно-технической конференции «Высокие технологии в промышленности России» и XXIV Международного симпозиума «Тонкие пленки в электронике» / под ред. А.Ф. Белянина, Ю.В. Панфилова, М.И. Самойловича. – М.: Техномаш, 2011. – С.194–199.

8. Hall, E.O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results [text] / E.O. Hall // Proceeding of the Physical Society: Section B. – 1951. – Vol.64. – No 9 –Pp. 747–753.

9. Береснев, В.М. Нанокристаллические нанокompозитные покрытия, структура свойства / В.М. Береснев, А.Д. Погребняк, Н.А. Азаренков и др. // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5. – № 1-2. – С. 4-27.

10. Nieh, T.G. Hall-Petch relation in nanocrystalline solids / T.G. Nieh, J. Wadsworth // Scripta Metall. Mater. – 1991. – № 25(4) – P. 955–958.

11. Мороз, А.В. Фотонное эхо и зондовая микроскопия как методы исследования тонких пленок для микроэлектронных датчиков / А.В. Мороз, Н.С. Вашурин, И.И. Попов и др. // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2012. – №2. – С. 64-72.

«Vacuum Equipment, Materials and Technology»]. Edited by A. F. Belyanin, Yu. V. Panfilov, M. I. Samoilovich. Moscow, Tekhnomash, 2012. P. 203-206.

7. Sushentsov N. I., Moroz A. V., Filimonov V. E., et al. Ustanovka VCh-magnetronnogo raspyleniya dlya polucheniya plenok titanata bariya strontsiya [HF-Magnetron Sputtering Unit to Produce Barium-Strontium Titanate Films]. Materialy XVII Mezhdunarodnoy nauchno-tehnicheskoy konferentsii «Vysokie tekhnologii v promyshlennosti Rossii» i XXIV Mezhdunarodnogo simpoziuma «Tonkie plenki v elektronike» [The Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference «High Technologies in the Industry of Russia» and the XXIV International Symposium «Thin Films in Electronics»]. Edited by A. F. Belyanin, Yu. V. Panfilov, M. I. Samoilovich. Moscow, Tekhnomash, 2011. P. 194-199.

8. Hall E.O. The deformation and ageing of mild steel: III Discussion of results. Proceeding of the Physical Society: Section B. 1951. Vol.64. No 9. Pp. 747–753.

9. Beresnev V. M., Pogrebnyak A.D., Azarenkov N.A., et al. Nanokristallicheskie i nanokompозитnye pokrytiya, sruktura, svoistva [Nanocrystal and Nanocomposite Coatings, Structure, Properties]. Fizicheskaya inzheneriya poverkhnosti [Physical Surface Engineering]. 2007. Vol. 5. No 1-2. P. 4-27.

10. Nieh T.G., Wadsworth J. Hall-Petch relation in nanocrystalline solids. Scripta Metall. Mater. 1991. No 25(4) P. 955–958.

11. Moroz A.V., Vashurin N. S., Popov I. I., et al. Fotonnoe ekho i zondovaya mikroskopiya kak metody issledovaniya tonkikh plenok dlya mikroelektronnykh datchikov [Photon Echo and Probe Microscopy as the Methods of Research on Thin Films for Microelectronic Sensors]. Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: radio-tekhnicheskie i infokommunikatsionnye sistemy [Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Radio Engineering and Infocommunication Systems]. 2012. No 2. P. 64–72.

Статья поступила в редакцию 24.06.13.

МОРОЗ Андрей Викторович – аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – контроль параметров тонких пленок, а также их формирование магнетронным распылением и исследование взаимосвязи свойств этих пленок с технологическими режимами их получения. Автор 20 публикаций.

E-mail: morozandrey2405@mail.ru

MOROZ Andrey Viktorovich – a postgraduate student of the Chair of Radio Equipment Engineering and Production, Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is the control of the parameters of thin films, their formation by magnetron sputtering and the research on the interconnection of film properties with the technological regimes of their production. The author of 20 publications.

E-mail: morozandrey2405@mail.ru

A. V. Moroz

CONTROL SYSTEM OF THE CRYSTAL STRUCTURE OF ALUMINUM NITRIDE FILMS IN THE PROCESS OF THEIR PRODUCTION

Key words: *aluminum nitride films; the control of the crystal structure; SAW; magnetron sputtering; acousto-electronic research.*

The methods of the analytic control of crystal structure parameters (crystallite size, film crystallinity degree, determined by the relation of amorphous and crystal phases) of aluminum nitride thin films are described. The given methods are based on the empirical relations between: film microhardness and the size of crystallites it consists of; acousto-electronic losses of the test delay line on surface acoustic waves and the degree of aluminum nitride film crystallinity, on which basis this delay line was produced. The method of the control of aluminum nitride film crystallinity degree, based on the mathematical model, formalizing the values of technological parameters of this film production process in the form of its crystallinity degree is presented. On the basis of these metrological approaches the system of the control of aluminum nitride film crystallinity degree is developed that allows correcting the technological process so that the aluminum nitride film crystallinity degree is sustained in the given range in the process of instrument production on surface acoustic waves.

The method of the control of AIN film crystallinity degree, using the algorithm of technological parameter formalization in the crystallinity degree and providing the conditions of its deviation compensation is suggested. The suggested system allows correcting the crystal structure of aluminum nitride films at early stages of the «departure» of the parameters of the technological process of film production. Thus, this system increases the reproducibility of the technological process of AIN film production.

The developed methods can be applied in the process of the production of the series of AIN films used in SAW-devices for the efficient, effortless control of the crystal properties of these films.

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

УДК 620.3

И. И. Попов, А. В. Мороз

НОВЫЕ ГОРИЗОНТЫ ФОТОНИКИ И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ

Сообщается о содержании и основных результатах проводившегося на базе Поволжского государственного технологического университета в июле 2013 года X Международного симпозиума по фотонному эху и когерентной спектроскопии. Отмечаются особенности проведения 50-летнего юбилея открытия явления фотонного эха, приводится решение симпозиума.

Ключевые слова: фотонное эхо; фотоника; наноэлектроника; оптика.

Современные достижения в области наноэлектроники основаны на технологиях получения наноразмерных пленок и на исследованиях электронных и экситонных резонансов. Новые физические эффекты, наблюдаемые на электронных и экситонных квантовых уровнях, используются для создания новых устройств приема, хранения, обработки и передачи информации. Область научных исследований, решающая эти задачи с использованием фотонов оптического излучения, получила название фотоники. Область знаний, направленных на создание электронных приборов и устройств на базе наноразмерных объектов, называется наноэлектроникой. Для оценки свойств материалов, используемых при создании новых микро- и наноэлектронных приборов и устройств, большую роль играет развитие возможностей современной оптической спектроскопии. Наиболее перспективными направлениями физики, позволяющими решать задачи оптической спектроскопии, создания оптической квантовой памяти и устройств оптической обработки информации является явление фотонного эха и когерентная спектроскопия. Именно этим проблемам был посвящен X Международный симпозиум по фотонному эху и когерентной спектроскопии (ФЭКС-2013), посвященный 50-летию юбилею открытия явления фотонного эха, который проводился с 30 июня по 6 июля 2013 года на базе Поволжского государственного технологического университета.

Явление фотонного эха теоретически было предсказано в 1963 году профессорами из Казанского физико-технического института (КФТИ) КФ

АН СССР У.Х. Копвиллемом и В.Р. Нагибаровым. Год спустя оно было экспериментально обнаружено группой исследователей из Колумбийского университета (США) во главе с С.Р. Хартманом, поэтому проводимый симпозиум был юбилейным. От имени оргкомитета ФЭКС-2013 его сопредседатель, ректор ПГТУ профессор Романов Евгений Михайлович зачитал Приказ о награждении памятными кубками около десяти организаций, в которых были поставлены основополагающие эксперименты по фотонному эху, и среди них – Казанский ФТИ КазНЦ РАН, Колумбийский университет (Нью-Йорк, США), Физический институт РАН (Москва, Россия), Институт физики полупроводников СО РАН (Новосибирск, Россия), Институт спектроскопии РАН (Москва, Россия), МарГУ (Йошкар-Ола, Россия), ПГТУ (Йошкар-Ола, Россия). Кроме того, сопредседатель оргкомитета проф. Попов Иван Иванович зачитал Решение организационного и программного комитетов ФЭКС-2013 о награждении памятными медалями «50-летие фотонного эха» тридцати выдающихся ученых, внесших определяющий вклад в становление научного направления «фотонное эхо и когерентная спектроскопия» и, в первую очередь, – профессора Свена Хартмана (США, Нью-Йорк, Колумбийский университет), профессоров Уно Копвиллема и Вилена Нагибарова (Россия, Казань, КФТИ КазНЦ РАН) и др. Среди них три сотрудника ПГТУ: профессор Попов И. И., доцент Сушенцов Н. И., аспирант Вашурин Н. С. Ученые, сделавшие доклады на ФЭКС-2013, были награждены памятными почетными дипломами.



Сопредседатель оргкомитета симпозиума, ректор ПГТУ профессор Е.М. Романов вручает памятный кубок директору КФТИ КазНЦ РАН академику К.М. Салихову в знак признания заслуг института, связанных с открытием 50 лет назад явления фотонного эха

Симпозиум был посвящен оптическим переходным явлениям (типа фотонного эха, сверхизлучения и др.) и когерентной спектроскопии на их основе. Особое внимание уделялось вопросам формирования когерентности и фазовой памяти в нелинейной и квантовой оптике. Поскольку симпозиум ФЭКС-2013 юбилейный, то 30 июня состоялось несколько докладов и выступлений, посвященных истории предсказания явления фотонного эха (ФЭ) в Казани и описанию основополагающих экспериментов в мире по его экспериментальному обнаружению. С такими докладами выступили директор КФТИ КазНЦ РАН, академик РАН профессор К. М. Салихов, председатель программного комитета симпозиума, заведующий лабораторией нелинейной оптики этого института, профессор В.В. Самарцев и ученик У.Х. Копвилема, ведущий научный сотрудник РНЦ «Курчатовский институт» (Москва), профессор С.В. Сазонов.

Первыми пленарными докладчиками на юбилейном симпозиуме ФЭКС-2013 в день его открытия стали: директор ИСАН (Москва, Троицк) чл.-корр. РАН Е.А. Виноградов с докладом «Когерентное спонтанное излучение электромагнитных полей твердыми телами» и академик РАЕН, Почетный профессор МГУ А.П. Сухоруков с докладом «Нелинейная оптика импульсных лазерных пучков».

В следующие дни было заслушано 23 пленарных, 33 устных (20-минутных) и девять стендовых докладов. В процессе работы симпозиума велась видеозапись выступлений ученых. В работе симпозиума приняли участие ученые из пяти зарубежных стран – ЮАР, Италии, Болгарии, Украины и Белоруссии. Более трети участников симпозиума

состояло из молодых ученых, в том числе аспирантов, магистрантов и студентов, для которых заслушанные доклады способствовали повышению их научного уровня и квалификации и послужили дополнительным стимулом к продолжению активной научной деятельности, а трибуна симпозиума явилась ареной, где они оттачивали свое ораторское мастерство. Значительная часть докладов, представленных на симпозиуме, отражала результаты научных разработок, проведенных при финансовой поддержке РФФИ.

Серия интересных докладов прочитана казанскими учеными, академиком РАН К.М. Салиховым, академиком РАЕН, профессором В.В. Самарцевым, академиком АНТ, профессором М.Х. Салаховым, профессором Д.И. Камаловой, профессором Р.Х. Гайнутдиновым, докторами наук Р.М. Шахмуратовым и А.А. Калачевым, кандидатами наук А.В. Шкаликовым, А.А. Калинин, А.В. Леонтьевым, А.Г. Шмелевым и др. Они посвящены проблемам спинорики, новым физическим эффектам двухквантового возбуждения резонансной среды, проблемам получения однофотонных источников оптического излучения и исследования однофотонных состояний, томографии квантовых процессов, поляризационной фемтосекундной многоимпульсной спектроскопии молекулярных колебаний и вращений в жидкости, проблемам создания оптической квантовой памяти. Особый интерес вызвало сообщение профессора С.А. Моисеева об экспериментах, выполненных зарубежными исследователями на основе созданной им теории, показавшим результаты создания оптической квантовой памяти на фотонном эхе с рекордным в мире КПД, равным 95 %.

Глубокий по фундаментальному уровню и практической значимости спектр сообщений сделан учеными Института спектроскопии РАН (Москва, Троицк), член.-корр. РАН, профессором Е.А. Виноградовым, профессорами А.В. Наумовым, И.С. Осадько, С.В. Чекалиным, Ю.Г. Вайнером, докторантом К.Р. Каримуллиным. Они показали свои приоритетные работы по когерентной спектроскопии твердых тел, спектроскопии наноразмерных объектов, бесфоновым спектральным линиям примесных излучающих центров в твердых телах: микроскопической природе и приложениях в оптической наноскопии, по мерцающей фотолуминесценции квантовых точек полупроводников, по методам оптической нанодиагностики, основанным на детектировании оптических сигналов в дальнем поле, по фемтосекундной спектроскопии коррелированных фононов в кристаллическом висмуте, по фотонному эху в полимерных пленках, легированных квантовыми точками CdSe/ZnS. Большой эффект произвело сообщение, что в ИСАНе получен спектрометр одиночных молекул, способный определить одну мо-

лекулу из 1016 молекул среды, являющийся на сегодня мировым рекордом. Особое внимание всех участников ФЭКС-2013 вызвали стенды К.Р. Каримуллина «Из истории симпозиумов по световому эху» и «Эхо дней минувших...», содержавшие биографии выдающихся ученых, работавших по тематике ФЭ, и воспоминания друзей.

Прекрасные сообщения сделали питерцы в области волоконной оптики и по системам квантовой рассылки криптографического ключа, москвичи в области физики фотонных кристаллов, по нелинейным явлениям и солитонам в отрицательно/положительно преломляющей среде, физике генерации терагерцового излучения и его применению в наркоконтроле, об устойчивости так называемых «световых пульс» в двухуровневых средах, обладающих постоянным дипольным моментом, по модам Шмидта и перепутыванием бифотонных состояний. Профессор В.С. Абрамова из Донецка (Украина) рассказала участникам ФЭКС-2013 о фрактальной индукции, лавине, самоиндуцированной прозрачности и эхе в модельной наносистеме. Коллеги из ЮАР посвятили свои доклады физике приготовления «перепутанных» состояний в оптических резонаторах, болгары – биосенсорам на основе тонких пленок наноразмерной толщины.

Е.В. Морева (МИФИ, Москва) и ее итальянские коллеги в докладе «Проявление времени в синглетном состоянии Белла» представили резуль-

таты экспериментальной реализации предложения Вуттерса о том, что «проблема времени» в квантовой гравитации может быть элегантно решена на примере стационарных «перепутанных» квантовых состояний. Они утверждают, что несмотря на то, что общее состояние системы является статическим, время может извлекаться в виде корреляций между подсистемами, одна из которых действует как часы для остальной части системы.

Профессор Леухин А.Н. (МарГУ, Йошкар-Ола) с соавторами из Австралии и США посвятили свой доклад модели Бернаскони для построения низкоэнергетических спиновых систем, имеющей большое прикладное значение в квантовых вычислениях, как и модель Изинга.

Ученые из ПГТУ: профессор И.И. Попов, доцент Н.И. Сушенцов, аспиранты Н.С. Вашурин, С.А. Степанов, А.В. Мороз сообщили о цикле исследований, включающих как новые технологические возможности метода вакуумного напыления по получению тонких пленок микро- и наноразмерной толщины, так и результаты первого наблюдения фотонного эха в полупроводниковых пленках наноразмерной толщины и обнаруженные при этом новые физические эффекты, включая эффект частотного сдвига спектра сигнала стимулированного фемтосекундного фотонного эха в специально изготовленных пленочных гетероструктурах на основе оксида цинка.



Участники симпозиума после церемонии его открытия

Завершился симпозиум двумя докладами по современным тенденциям развития науки о когерентности, профессора И.И. Попова (ПГТУ, Йошкар-Ола) по физической экологии и докладом профессора Р.Ф. Полищука (ФИАН, Москва) «Гравитация: от Ньютона до теории струн».

На заключительном заседании ФЭКС-2013 принято следующее решение:

1) считать организацию Международного симпозиума ФЭКС-2013 отличной, а заявленные цели полностью достигнутыми;

2) выразить благодарность организационному и программному комитетам за высокий научный и организационный уровень проведения симпозиума;

3) выразить особую благодарность Поволжскому государственному технологическому университету за финансовую поддержку и отличную организацию симпозиума;

4) выразить благодарность за финансовую поддержку симпозиума Российскому фонду фундаментальных исследований, Оптическому обществу США (OSA), Отделению физических наук (ОФН) РАН;

5) просить программный и организационный комитеты симпозиума провести XI Международный симпозиум по фотонному эху и когерентной спектроскопии в 2017 году в г. Светлогорске Калининградской области.

I. I. Popov, A. V. Moroz

NEW HORIZONS OF PHOTONICS AND NANOELECTRONICS

Key words: *photon echo; photonics; nanoelectronics; optics.*

The agenda and the main results of the X International Symposium on photon echo and coherent spectroscopy, conducted at Volga State University of Technology in July 2013 are reported. The principles of the organization of the 50th anniversary of photon echo phenomenon discovery are registered; the resolution of the symposium is presented.

ПОПОВ Иван Иванович – доктор физико-математических наук, профессор, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – оптические исследования взаимодействия света с веществом. Автор более 400 публикаций.

E-mail: popov@volgatech.net

МОРОЗ Андрей Викторович – аспирант, Поволжский государственный технологический университет (Российская Федерация, Йошкар-Ола). Область научных интересов – контроль параметров тонких пленок, а также формирование тонких пленок магнетронным распылением и исследование взаимосвязи их свойств с технологическим режимом. Автор 20 публикаций.

E-mail: morozandrey2405@mail.ru

POPOV Ivan Ivanovich – Doctor of Physics and Mathematics, Professor at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is optical studies of the interaction between light and substance. The author of more than 400 publications.

E-mail: popov@volgatech.net

MOROZ Andrey Viktorovich – a post graduate student at Volga State University of Technology (Russian Federation, Yoshkar-Ola). The sphere of scientific interests is control of thin film parameters, thin film formation by magnetron sputtering and the research on the interconnection of their properties with operating practices. The author of 20 publications.

E-mail: morozandrey2405@mail.ru

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Поволжского государственного технологического университета» принимает к публикации статьи, соответствующие профилю издания, объемом не более 15 страниц, включая рисунки.

Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты завершенных исследований автора, ранее не публиковавшихся.

К печати принимаются материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Рукописи проходят обязательное рецензирование. В «Вестнике ...» печатаются только статьи, получившие положительные рецензии.

Отклоненные в результате рецензирования материалы возвращаются в одном экземпляре (с приложением копии рецензии).

Требования к оригиналам предоставляемых работ*Структура научной статьи*

1. Аннотация (3–4 предложения).
2. Ключевые слова или словосочетания (не более 10) отделяются друг от друга точкой с запятой.
3. Введение (оценка состояния вопроса, основанная на обзоре литературы с мотивацией актуальности; выявленное противоречие, позволяющее сформулировать проблемную ситуацию).
4. Цель работы, направленная на преодоление проблемной ситуации (1–2 предложения).
5. Решаемые задачи, направленные на достижение цели.
6. Математическое, аналитическое или иное моделирование.
7. Техника эксперимента и методика обработки или изложение иных полученных результатов.
8. Интерпретация результатов или их анализ.
9. Выводы, отражающие новизну полученных результатов, показывающих, что цель, поставленная в работе, достигнута.

Требования к оформлению статьи

Статья должна быть предоставлена в электронном виде и компьютерной распечатке (2 экз.) на бумаге формата А4. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 пт, межстрочный интервал одинарный. Поля: внутри – 2 см, верхнее, нижнее, снаружи – 3 см (зеркальные поля), абзацный отступ первой строки на 0,75 см.

На первой странице статьи слева печатается УДК (размер шрифта 12 пт, прямой, светлый) без отступа. Ниже, справа – инициалы, фамилия автора (размер шрифта 14 пт, курсив, полужирный). Ниже, по центру – название статьи (размер шрифта 14 пт, прямой, полужирный, прописной).

Далее размещается аннотация (выравнивание по ширине, размер шрифта 12 пт, курсив, отступ слева и справа 1 см). Аналогично оформляются ключевые слова. Аннотация и ключевые слова статьи предоставляются на **русском и английском языках**.

Также необходимо предоставить **авторское резюме** статьи на русском и английском языках (не менее 250–300 слов).

Формулы и отдельные символы набираются с использованием редакторов формул Microsoft Equation или Math Type (не вставлять формулы из пакетов MathCad и MathLab, а также не следует использовать стандартную вставку математических формул или построение собственных формул с помощью библиотеки математических символов).

Иллюстрации. Схемы, графики, диаграммы и т.п. принимаются только в векторных форматах (Word, Excel, Visio, CorelDraw, Adobe Illustrator и др.). Графический материал принимается только в черном-белом изображении, должен быть четким и не требовать перерисовки. Графики должны выделяться линиями разного стиля (**не делать их цветными**) или отмечаться цифрами. Фотографии и скриншоты должны выполняться в растровых форматах (tiff, bmp, png и др.) достаточного расширения (300 dpi) и четкости.

Таблицы и рисунки должны быть вставлены в текст после абзацев, содержащих ссылку на них.

Размеры иллюстраций не должны превышать размеров текстового поля (не более 15 см).

Список литературы оформляется согласно порядку ссылок в тексте (где они указываются в квадратных скобках) и обязательно в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 в двух вариантах:

- 1) на русском;
- 2) на языке оригинала латинскими буквами (References). Если русскоязычная статья была переведена на английский язык и опубликована в английской версии, то необходимо указывать ссылку из переводного источника. Библиографические описания российских публикаций составляются в следующей последовательности: авторы (транслитерация), перевод названия статьи (монографии) в транслитерированном варианте, перевод названия статьи (монографии) на английский язык в квадратных скобках, название источника (транслитерация, курсив), выходные данные с обозначениями на английском языке.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Статья должна быть подписана автором(ами). После подписи автора и даты указываются его фамилия, имя, отчество (полностью), ученая степень, должность, место работы, область научных интересов, количество опубликованных работ, телефон, e-mail, домашний адрес.

К статье прилагаются следующие **документы**:

- авторское заявление с указанием рубрики журнала;
- рекомендация кафедры;
- экспертное заключение о возможности опубликования;

Материалы, не соответствующие вышеуказанным требованиям, не рассматриваются.

Адрес для переписки: 424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина 3, ПГТУ,

редакция журнала «Вестник ПГТУ», e-mail: vestnik@volgatech.net

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Подробнее – на сайте ПГТУ: <http://www.volgatech.net>

Подписка на журнал осуществляется по «Объединенному каталогу. Пресса России. Газеты и Журналы» (подписной индекс **42916**, тематический указатель: Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов).