

# ВЕСТНИК 3(4) 2008

МАРИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО  
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-прикладной журнал

Издаётся с ноября 2007 года

Выходит три раза в год

**СЕРИЯ «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы»**

---

**Учредитель:**

ГОУ ВПО «Марийский государственный  
технический университет»

Журнал зарегистрирован Федеральной  
службой по надзору в сфере масс-  
совых коммуникаций, связи и охраны  
культурного наследия (свидетельство о  
регистрации ПИ № ФС77-30177  
от 02.11.07)

Полное или частичное воспроизведе-  
ние материалов, содержащихся в  
настоящем издании, допускается толь-  
ко с письменного разрешения редак-  
ции.

**Адрес редакции:**

424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Тел. (8362) 68-60-12, 68-78-46

Факс (8362) 41-08-72

e-mail: [vestnik@marstu.net](mailto:vestnik@marstu.net)

---

Редактор *Т. А. Рыбалка*

Дизайн обложки *Л. Г. Маланкина*

Компьютерная верстка

*А. Ю. Желонкин*

Перевод на английский язык

*О. В. Филипчук*

Подписано в печать 04.12.08.

Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>8</sub>. Бумага офсетная.

Усл. п. л. 11,39. Уч.-изд. л. 7,16.

Заказ № 63/08. Тираж 500 экз.

Марийский государственный  
технический университет  
424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинал-макета  
в ООО «Реклайн»  
424007 Йошкар-Ола,  
ул. Машиностроителей, 117

**Главный редактор Е. М. Романов**

*Главная редакционная коллегия:*

**Е. М. Романов**, д-р с.-х. наук, профессор  
(главный редактор)

**В. А. 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. Н. Леухин**, д-р физ.-мат. наук, профессор  
(отв. секретарь)

*Редакционная коллегия серии:*

**Н. В. Рябова**, д-р физ.-мат. наук, профессор  
(зам. гл. редактора)

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

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

**А. М. Насыров**, д-р физ.-мат. наук, профессор (Казань)

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

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

**И. В. Рябов**, д-р техн. наук, профессор

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

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

**А. Н. Соболев**, д-р техн. наук, профессор

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

© Марийский государственный технический университет  
Вестник Марийского государственного  
технического университета, 2008

## СОДЕРЖАНИЕ

### ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

*В. А. Иванов, Д. В. Иванов, А. Р. Лащевский, М. И. Рябова.* Влияние дисперсности ионосферы на разрешающую способность ЛЧМ ионозондов

*И. Е. Царев.* Уменьшение уровня корреляционных шумов в канальном ЛЧМ ионозонде при заданной разрешающей способности

*Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. А. Елсуков, А. Р. Лащевский, А. В. Мальцев, М. И. Рябова, И. Е. Царев.* Глобальные вариации максимально применимых частот ВЧ радиолиний в период солнечного затмения 29 марта 2006 г.

### ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

*А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев.* Дискретные фазокодированные последовательности с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции размерности квадратных чисел

*Н. В. Парсаев, А. Н. Леухин.* Дискретные фазокодированные последовательности с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции размерности, кратной четырем

*А. А. Рожнецов, В. Н. Дубровин, А. А. Баев, А. С. Намумов.* Формирование 3D изображений при проведении трансуретральной резекции предстательной железы

*А. А. Рожнецов, Р. Г. Хафизов, И. Л. Егюшина, Д. Г. Хафизов.* Оценка трудоемкости определения параметров вращений трехмерных объектов

*Д. Ю. Кубашев, А. Н. Леухин.* Повышение криптостойкости преобразования информации методом гаммирования

### ЭЛЕКТРОНИКА

*В. Н. Леухин, А. А. Нагаев, А. В. Андрейкин.* Разработка модели комплекса позиционирования для электронной подгонки групп резисторов

*О. Н. Афоннов.* Устойчивость металлокерамических корпусов к климатическим факторам

*В. Н. Игумнов, В. Е. Филимонов, А. П. Большаков, А. В. Мороз.* Методика охлаждения высокотемпературного сверхпроводящего магнитного экрана и особенности его конструкции

### НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

*Н. В. Рябова.* Конференция РРВ-2008

*А. А. Рожнецов.* Международная конференция «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах»

*Указатель материалов, опубликованных в журнале «Вестник МарГТУ» в 2008 году*

*Информация для авторов*

## CONTENTS

### TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

*V. A. Ivanov, D. V. Ivanov, A. R. Lashchevskiy, M. I. Ryabova.* Ionosphere dispersivity impact on LFM ionosonde resolving power

*I. Ye. Tzaryov.* Correlation noise level decreasing in channel LFM ionosonde at a given resolving power

*D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Yel-soukov, A. R. Lashchevskiy, A. V. Maltsev, M. I. Ryabova, I. Ye. Tzaryov.* Global variations of maximum applicable frequencies HF radio lines during the solar eclipse of 29 march 2006

### COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

*A. N. Leoukhin, N. V. Parsayev.* Discrete phase-coded successions with zero level of side lobes of cyclical autocorrelational function of quadratic numbers dimension

*N. V. Parsayev, A. N. Leoukhin.* Discrete phase-coded successions with zero level of side lobes of cyclical autocorrelational function of the dimension multiple of four

*A. A. Rozhentsov, V. N. Doubrovin, A. A. Bayev, A. S. Namumov.* 3D image generation at prostata gland transurethral resection

*A. A. Rozhentsov, R. G. Khafizov, I. L. Yegoshina, D. G. Khafizov.* Labor intensity assessment when defining the rotation parameters of 3D objects

*D. Yu. Koubashev, A. N. Leoukhin.* Improvement of information transformation cryptographic robustness with the gamma method

### ELECTRONICS

*V. N. Leoukhin, A. A. Nagayev, A. V. Andreykin.* Model development of positioning complex for electric spark fitting of resistor groups

*O. N. Afonov.* Climat factors stability of metal-ceramic packages

*V. N. Igoumnov, V. Ye. Filimonov, A. P. Bol'shakov, A. V. Moroz.* Technique for high-temperature superconducting magnet screen cooling and peculiarities of its design

### THE NOVELTIES IN THE FIELD OF ENGI- NEERING AND TECHNOLOGIES. REVIEWS. CONFERENCES. IMPORTANT DATES

*N. V. Ryabova.* RRV-2008 Conference

*A. A. Rozhentsov.* International conference «High-performance parallel calculations on cluster systems»

*List of materials published in MarSTU Reporter in 2008*

*Information for the authors*

## ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.371.25; 550.388.2

*В. А. Иванов, Д. В. Иванов,  
А. Р. Лащевский, М. И. Рябова*

### ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСНОСТИ ИОНОСФЕРЫ НА РАЗРЕШАЮЩУЮ СПОСОБНОСТЬ ЛЧМ ИОНОЗОНДОВ\*

*Представлен анализ влияния дисперсности среды распространения на разрешающую способность ионозондов со сложными зондирующими сигналами. Показано, что в случае фазовой дисперсности разрешающая способность ограничивается некоторым пределом – потенциальной разрешающей способностью. Получены аналитические выражения, связывающие потенциальную разрешающую способность и характеристики среды распространения зондирующего сигнала. В связи с зависимостью дисперсности среды от частоты рассмотрен вопрос об оптимальной полосе частот зондирующего сигнала и разрешении ионозонда при определении критической частоты ионосферного слоя.*

*Ключевые слова:* ионосфера, дисперсность среды, распространение радиоволн, ЛЧМ ионозонд, разрешающая способность.

**Введение.** Ионозонды для вертикально-наклонного зондирования являются эффективными инструментами исследования ионосферы и космической погоды на уровнях ниже глобального максимума электронной концентрации [1–3]. Обычно для зондирования используются сигналы, у которых полоса частот значительно меньше средней частоты спектра ( $\Delta f \ll \bar{f}$ ), а их спектры относят к средней частоте  $\bar{f}$ . При вертикальном падении на ионосферу, на уровне где концентрация электронов составляет величину  $N_e$ , отражаются сигналы, для которых выполняется резонансное условие:  $\bar{f}_v = f_N$ , где  $f_N = \sqrt{e^2 N_e / \pi m_e}$  – плазменная частота,  $e, m_e$  – заряд и масса электрона. Поэтому в данном

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты 06-02-16089, 08-02-12081).

случае зондирующий сигнал несет информацию о вертикальном распределении электронной концентрации. При наклонном зондировании на односкачковых трассах пространства принимаемый сигнал, со средней частотой спектра  $\bar{f}_h$ , несет информацию о состоянии ионосферы в средней точке трассы, называемой контролируемой точкой зондирования (КТЗ). В данном случае отражение происходит в КТЗ на уровне, где  $\bar{f}_h = k \cdot \bar{f}_b \sec \varphi$ ,  $\varphi$  – угол падения луча на ионосферу,  $k$  – коэффициент, учитывающий кривизну Земли и ионосферы. В обоих случаях средние частоты зондирующих сигналов последовательно изменяются в диапазоне априорной неопределенности условий их отражения от ионосферы. При вертикальном зондировании он охватывает диапазон  $1,6 \text{ МГц} \leq \bar{f}_b \leq f_{N \max}$ , где  $f_{N \max}$  – плазменная частота для глобального максимума ионосферы, а при наклонном – диапазон  $\text{НПЧ} \leq \bar{f}_h \leq \text{МПЧ}$ , где НПЧ – наименьшая применимая частота, а МПЧ – максимально применимая частота для зондируемой трассы. В этом случае  $\text{МПЧ} = \bar{f}_{\text{МПЧ}} = k \cdot f_{N \max} \sec \varphi$ . При зондировании важным является вопрос о разрешающей способности метода по задержке сигнала и частоте, т. к. разрешающая способность по задержке определяет его возможность в исследованиях механизмов распространения, а разрешение по частоте – точность определения  $f_{N \max}$ , НПЧ и МПЧ. Для простых сигналов рассмотрению этих вопросов посвящен ряд работ [4,5]. Однако в последнее время для зондирования ионосферы стали широко применять сложные сигналы [6,8,14] и особенно сигналы с линейной частотной модуляцией. Для них данная проблема в достаточной степени ещё не изучена.

**Цель работы** состоит в анализе вопросов о разрешающей способности ионозондов, использующих сложные сигналы с линейной частотной модуляцией, и влиянии на нее дисперсности среды распространения зондирующих сигналов.

**Методика вертикально-наклонного зондирования ионосферы ЛЧМ сигналом со сверхширокой полосой частот.** Рассмотрим распространение в ионосфере сверхширокополосного ЛЧМ сигнала и его поэлементное сжатие (обработку) в приемнике. Известно [9], что сигнал с линейной частотной модуляцией при базе более 100 имеет спектр с однородной АЧХ, отличной от нуля в полосе частот, равной его девиации. Множество гармоник на разных частотах, составляющих сигнал, усложняет решение задачи распространения его в ионосфере. Действительно, гармоника сигнала может прийти в точку приема, распространяясь различными путями, которые зависят от ее частоты  $f$ . При вертикальном зондировании в точку приема она может прийти, отразившись от ионосферных слоев, а также претерпев двойное лучепреломление, т. е. обыкновенным и необыкновенным лучами. При наклонном падении на ионосферу она может прийти, распространяясь различными траекториями: верхним и нижним лучами, магнито-ионными лучами и лучами различной кратности, которые, как и в случае вертикального зондирования, отождествляются с механизмами распространения. На различных траекториях гармоника испытывает разное ослабление и задержку фазы, которые существенно зависят от ее частоты.

Сформулируем гипотезы, позволяющие найти решение задачи распространения в ионосфере сверхширокополосного ЛЧМ сигнала с учетом его сжатия в приемнике. Для этого представим его в виде:

$$u_T(t) = U_0 \cos(2\pi f_H t + \pi \dot{f} t^2) = U_0 \cos \psi_T(t), \quad (1)$$

где  $f_H$  – начальная частота сигнала,  $\dot{f}$  – скорость изменения частоты.

Текущая частота этого сигнала  $f = f_H + \dot{f}t$  меняется по линейному закону, в диапазоне значений от  $f_H$  до  $f_K$  со скоростью, которая может принимать фиксированное значение в пределах от 100 кГц/с до 1 МГц/с в зависимости от режима зондирования и решаемой задачи. Обычно  $f_H \sim 2-3$  МГц и  $f_K \sim 15-30$  МГц и поэтому излучаемый сигнал имеет длительность несколько минут и занимает полосу частот 12–28 МГц, т. е. является сверхширокополосным. Обработать такой сигнал целиком не имеет смысла, т. к. он будет содержать некоторую интегральную характеристику распространения, не позволяющую осуществлять анализ механизмов на разных частотах. Поэтому сформулируем ряд гипотез, позволяющих реализовать процедуру измерения характеристик механизмов распространения при разных частотах зондирования (дифференциальных характеристик).

Первая гипотеза заключается в том, что для получения дифференциальных характеристик механизмов распространения необходимо обрабатывать не весь сигнал целиком, а осуществить его поэлементную обработку. При этом обрабатываемые элементы должны быть достаточно узкополосными, однако они должны иметь существенно большую базу.

Построим соответствующую гипотетическую модель. Предположим, что зондирующий ЛЧМ сигнал, распространяясь в ионосфере по разным траекториям и складываясь в приемной антенне, приобретает вид:

$$u_R(t) = \sum_{j=1}^m |H_j(f)| \cdot U_0 \cos(\psi_{R_j}(t)), \quad (2)$$

где  $\psi_{R_j}(t) = (2\pi (f_H \cdot (t - \tau_{\phi_j}) + 0,5 \dot{f} \cdot (t - \tau_{\phi_j})^2))$ ,

$\tau_{\phi_j}$  – фазовая задержка, а  $|H_j(f)|$  – коэффициент ослабления сигнала при его распространении по  $j$  лучу.

Будем считать, что фазовая задержка  $\tau_{\phi_j}$  ЛЧМ сигнала является функцией излучаемой частоты  $f$ :  $\tau_{\phi_j} = \tau_{\phi_j}(f)$ .

Предположим, что в приемнике сигнал подвергается обработке корреляционно-фильтровым методом. Для этого он перемножается с сигналом гетеродина  $u_T(t)$ , когерентным излучаемому ЛЧМ сигналу, далее происходит выделение низкочастотного разностного сигнала и нахождение от него спектра.

Сигнал произведения имеет вид:

$$V(t) = u_R(t) \cdot u_T(t). \quad (3)$$

Низкочастотная составляющая  $A(t)$  выделяется из  $V(t)$  с помощью ФНЧ. Она соответствует разности частот между излучаемым и принимаемым сигналами и поэтому называется сигналом разностной частоты.

Нетрудно показать [7], что сигнал разностной частоты  $A(t)$  имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} A(t) &= \frac{U_0^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^m |H_j(f)| \cos(\psi_{Rj} - \psi_T) = \frac{U_0^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^m |H_j(f)| \cos \varphi_j(t) = \\ &= \frac{U_0^2}{2} \cdot \sum_{j=1}^m |H_j(t)| \cos(2\pi(f_H \tau_{\varphi_j}(t) - 0,5 \dot{f} \tau_{\varphi_j}^2(t) + \dot{f} t_{\varphi_j}(t))) , \end{aligned} \quad (4)$$

где  $\varphi_j(t) = 2\pi(f_H \tau_{\varphi_j}(f) - 0,5 \dot{f} \tau_{\varphi_j}^2(f) + \dot{f} t_{\varphi_j}(f)t)$ .

Выберем некоторое время  $\bar{t}_n$  из интервала излучения и рассмотрим элемент сигнала разностной частоты, заданный на отрезке  $\left[\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}, \bar{t}_n + \frac{T_{\Delta}}{2}\right]$ . Отрезку  $\left[\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}, \bar{t}_n + \frac{T_{\Delta}}{2}\right]$  во временной области с помощью соотношения  $f = f_H + \dot{f}t$  можно поставить в соответствие отрезок  $\left[\bar{f}_n - \frac{\Delta f}{2}, \bar{f}_n + \frac{\Delta f}{2}\right]$  в частотной области, где  $\bar{f}_n = f_H + \dot{f} \cdot \bar{t}_n$ , а  $\Delta f = \dot{f} T_{\Delta}$  – девиация соответствующего выборочного элемента зондирующего ЛЧМ сигнала.

Спектр элемента имеет вид:

$$\begin{aligned} S(F) &= \int_{-\infty}^{+\infty} A(t) \cdot \exp(-i2\pi Ft) \cdot dt = \int_{\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}}^{\bar{t}_n + \frac{T_{\Delta}}{2}} A(t) \cdot \exp(-i2\pi Ft) \cdot dt = \\ &= \frac{U_0^2}{2} \int_{\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}}^{\bar{t}_n + \frac{T_{\Delta}}{2}} \sum_{j=1}^m |H_j(t)| \cos \varphi_j(t) \cdot \exp(-i2\pi Ft) \cdot dt \end{aligned} \quad (5)$$

Воспользуемся интегральным представлением функции через ее производную  $F_j(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_j}{dt}$  и запишем фазовую функцию в виде:

$$\varphi_j(t) = \varphi_j(t_H) + 2\pi \int_{t_H}^t F_j(t) dt . \quad (6)$$

В этом случае спектр (5) сигнала можно переписать в виде:

$$S(F) = \frac{U_0^2}{2} \int_{\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}}^{\bar{t}_n + \frac{T_{\Delta}}{2}} \sum_{j=1}^m |H_j(t)| \cos \left[ \varphi_j(\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}) + 2\pi \int_{\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}}^t F_j(t) dt \right] \cdot \exp(-i2\pi Ft) \cdot dt . \quad (7)$$

Вторая гипотеза заключается в том, что при условии  $\Delta f \ll \bar{f}$  выборочный элемент ЛЧМ сигнала можно считать узкополосным, а механизмы распространения в его полосе частот – неизменными.

Известно, что в узкополосном приближении фазу подынтегральной функции (5) можно разложить в ряд Тейлора по степеням  $(t - \bar{t}_n)$ :

$$\varphi_j(t) \approx \varphi_j(\bar{t}_n) + \frac{d\varphi_j}{dt} \cdot (t - \bar{t}_n) + 0,5 \frac{d^2\varphi}{dt^2} \cdot (t - \bar{t}_n)^2. \quad (8)$$

Учитывая, что  $\frac{d\varphi_j}{dt} = 2\pi \cdot F_j$  является частотой разностного сигнала, преобразуем ее:

$$F_j = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi_j}{dt} = \frac{d(\tau_{\varphi_j}(f_n + \dot{f}t))}{dt} - 0,5 \frac{d(\dot{f}^2 \tau_{\varphi_j}^2)}{dt}. \quad (9)$$

Выражение  $(f_n + \dot{f}t)$  показывает, как изменяется текущая частота  $f$  ЛЧМ сигнала от времени  $t$ , а выражение  $0,5 \frac{d(\dot{f}^2 \tau_{\varphi_j}^2)}{dt}$  можно в дальнейшем не учитывать, поскольку на интервале  $\left[\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}, \bar{t}_n + \frac{T_{\Delta}}{2}\right]$  выполняется условие  $f \gg \dot{f} \tau_{\varphi}$ . Действительно текущая частота  $f$  изменяется в диапазоне 3–30 МГц,  $\dot{f} - 50 \dots 500$  кГц/с, а  $\tau_{\varphi_j} - 0 \dots 5 \cdot 10^{-3}$  с.

На основании сделанных приближений выражение (9) можно переписать в следующем виде:

$$F_j = \frac{d}{dt}(\tau_{\varphi_j}(f) \cdot f) = \dot{f} \left( f \frac{d\tau_{\varphi_j}}{df} + \tau_{\varphi_j}(f) \right) = \dot{f} \tau_j(\bar{f}_n), \quad (10)$$

где  $\tau_j = f \frac{d\tau_{\varphi_j}}{df} + \tau_{\varphi_j}$  – групповая задержка сигнала в ионосфере по  $j$  лучу.

Выражение (10) показывает, что частота разностного сигнала зависит от скорости изменения частоты ЛЧМ сигнала и его групповой задержки  $\tau_j$  в ионосферном радиоканале.

Видно, что фазу выборочного сигнала разностной частоты можно представить в виде суммы двух слагаемых:

$$\varphi_j(t) \approx \varphi_{jЛ}(t) + \varphi_{jН}(t). \quad (11)$$

В первом приближении, когда учитывается только первое слагаемое, фаза разностной частоты линейно зависит от времени и сжатый в частотной области выборочный сигнал разностной частоты на отрезке  $\left[\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}, \bar{t}_n + \frac{T_{\Delta}}{2}\right]$  представляет собой тоны частот, пропорциональные групповому запаздыванию сигнала на парциальных траекториях.

Гипотезы о том, что на отрезке  $\left[\bar{t}_n - \frac{T_{\Delta}}{2}, \bar{t}_n + \frac{T_{\Delta}}{2}\right]$  амплитудная функция  $|H_j(t)| \approx |H_j(\bar{t}_n)|$  почти постоянна, а для фазовой функции справедливо разложение в форме (8), позволяют получить для спектра сигнала разностной частоты выражения в аналитическом виде.

Выбирая в интеграле (5) положительные частоты и произведя вычисления, для интеграла получим:

$$0,5T_{\text{Э}} \cdot \exp\left[i2\pi(F - F_j)\left(\frac{\bar{f}_n - f_H}{f}\right)\right] \cdot \frac{\sin \pi T_{\text{Э}}(F - F_j)}{\pi T_{\text{Э}}(F - F_j)}.$$

Быстрое преобразование Фурье, используемое для вычисления спектра сигнала разностной частоты, дает нам возможность выделить в нем квадратурные составляющие, а по ним вычислить амплитудный и фазовый спектры.

Нетрудно показать, что в первом приближении амплитудный спектр сигнала разностной частоты для отдельного механизма распространения в области положительных частот имеет вид:

$$|S_j(F)| \approx \frac{U_0^2 T_{\text{Э}}}{4} H_j(\bar{f}_n) \cdot \left| \text{sinc}[\pi T_{\text{Э}}(F - F_j(\bar{f}_n))] \right|. \quad (12)$$

В данном случае функция  $|S_j(F)|$  характеризует парциальную  $j$ -ую траекторию распространения и позволяет по задержке его максимального значения получить один отсчет ионограммы на частоте  $f = \bar{f}_n$ , а по самому максимальному значению оценить величину  $H_j(\bar{f}_n)$ .

**Инструментальная разрешающая способность ионозонда.** Очевидно, что изменение длительности выборки будет приводить к кратному изменению полосы частот выборочного зондирующего ЛЧМ сигнала. Изменяя длительность выборки, не меняя положение ее середины, получаем методику измерения времени группового запаздывания на заданной частоте, соответствующей середине элемента, при различных полосах выборочных зондирующих ЛЧМ сигналов. Данная методика позволяет в экспериментах изучать механизмы распространения сигналов на разных частотах  $\bar{f}_n$  при различной разрешающей способности, а измерения параметров спектральных пиков при разных полосах выборочных элементов позволяют исследовать условия распространения и влияние на них дисперсности среды. В данной задаче важное значение приобретает вопрос об инструментальной и потенциальной разрешающей способности ионозонда. Обсудим его, потому что он в литературе подробно не рассматривался. Оценим инструментальную разрешающую способность. Для этого предположим, что дисперсность среды распространения незначительная и воспользуемся для решения поставленной задачи критерием Гаусса [8], согласно которому два сигнала разрешаются, если их суммарная функция имеет еще вид двугорбой кривой. В нашем случае функции на выходе системы сжатия описываются формулой (12). Пусть формула содержит только два слагаемых с равными амплитудами в максимумах, но сдвинутыми по разностной частоте. Очевидно, что инструментальная разрешающая способность ЛЧМ ионозонда по разностной частоте в данном случае будет определяться шириной основного лепестка функции (12) [9]. Обеспечивая некоторый запас в помехоустойчивости данной оценки, предположим, что в месте соединения суммарная кривая проходит на уровне 0,75 от

максимумов слагаемых. Тогда получим, что частотные тоны будут разрешаться, если соответствующие парциальные слагаемые сдвинуты между собой на частоту не менее:

$$\delta F \approx 1,5/T_3. \quad (13)$$

Заметим, что ширина основного лепестка спектра разностного сигнала составляет  $2/T_3$ . Это означает, что инструментальная разрешающая способность ЛЧМ ионозонда по разностной частоте составляет 75% от ширины основного лепестка функции (12).

Оценку инструментальной разрешающей способности по времени группового запаздывания можно получить, дифференцируя формулу (10), устанавливающую ее связь с разностной частотой:

$$\delta F_j = \dot{f} \cdot \delta \tau_j.$$

Откуда:

$$\delta \tau \approx 1,5/\dot{f}T_3 = 1,5/\Delta f. \quad (14)$$

Формула (14) отражает известный из радиолокации факт [9] того, что инструментальная разрешающая способность радиолокатора по задержке сигнала обратно пропорциональна его полосе частот. В нашем случае коэффициент пропорции равен 1,5 и при полосе сигнала, равной  $\Delta f = 100$  кГц инструментальная разрешающая способность составит 15 мкс.

В ионозондах обычно  $T_3 \sim 0,4-1$ с, поэтому ширина основного пика выборочного сигнала разностной частоты составляет  $2/T_3 = (5-2)$  Гц. В случае наклонного зондирования разность задержек при распространении по разным лучам не превышает 150 мкс, что в разностных частотах при  $\dot{f} = 100$  кГц/с составляет 15 Гц. Следовательно, парциальные тоны выборочного сигнала разностной частоты будут разрешаться в частотной области.

**Потенциальная разрешающая способность ионозонда.** Всякое повышение разрешающей способности по задержке сигнала требует увеличения его полосы частот. Однако известно [10], что с превышением полосой сигнала полосы когерентного распространения в нем возникают сильные дисперсионные искажения, приводящие к потере разрешающей способности. Таким образом, при некоторой оптимальной полосе частот будет достигаться максимально возможное разрешение (потенциально достижимое). Очевидно также, что на потенциальную разрешающую способность будет влиять дискретный характер обработки сигнала разностной частоты. Эти обстоятельства в литературе также подробно не анализировались и требуют своего исследования.

Было показано, что увеличение длительности выборок сопровождается увеличением полос выборочных зондирующих ЛЧМ сигналов. Учет фазовой дисперсности среды на их распространение обычно [10] сводится к учету второго приближения для фазовой функции. В этом случае к линейной части фазы добавляется нелинейное слагаемое (11),

связанное с её второй производной по времени, которая может быть записана через выражение для разностной частоты или через параметры функции  $\tau_j(f)$  в форме:

$$\frac{d^2\varphi_j}{dt^2} = 2\pi\dot{f} \frac{dF_j}{dt} = 2\pi\dot{f}^2 \cdot s_j, \quad (15)$$

где  $s_j = \frac{d\tau_j}{df}$  – наклон функции  $\tau_j(f)$  на частоте  $f = \bar{f}_n$ .

Таким образом, разложение фазы (8) во втором приближении приобретает вид:

$$\varphi_j(t) \approx \varphi_j(\bar{t}_n) + 2\pi\dot{f}\tau_j \cdot (t - \bar{t}_n) + \pi\dot{f}^2 s_j \cdot (t - \bar{t}_n)^2. \quad (16)$$

Оно означает, что парциальные разностные сигналы приобретают линейную частотную модуляцию со скоростью изменения частоты:

$$\dot{F}_j = \dot{f}^2 s_j. \quad (17)$$

В результате на масштабе времени  $T_\ominus$  парциальные сигналы разностной частоты, относящиеся к разным механизмам распространения, имеют девиацию:

$$\Delta F_j = \dot{f}^2 \cdot s_j(\bar{f}_n) \cdot T_\ominus = \dot{f} \cdot s_j(\bar{f}_n) \cdot \Delta f, \quad (18)$$

где  $\Delta f_\ominus = \dot{f} \cdot T_\ominus$  – полоса частот элемента зондирующего ЛЧМ сигнала, соответствующая элементу разностной частоты.

Учитывая выражение:

$$S(F) = \sum_{j=1}^m S_j(F),$$

можно показать, что во втором приближении амплитудный спектр сигнала разностной частоты для  $j$ -го механизма распространения имеет вид:

$$|S_j(F)| = \frac{U_0^2 \sqrt{T_\ominus}}{2} \frac{H_j(\bar{f}_n)}{\sqrt{2\Delta F_j}} \left[ \{C(z_2) - C(z_1)\}^2 + \{S(z_2) - S(z_1)\}^2 \right]^{0.5}, \quad (19)$$

где  $C(z)$ ,  $S(z)$  – интегралы Френеля,  $z_1 = \sqrt{\frac{2T_\ominus}{\Delta F_j}} (F - F_j(\bar{f}_n)) - \sqrt{2\Delta F_j T_\ominus}$  и

$$z_2 = \sqrt{\frac{2T_\ominus}{\Delta F_j}} (F - F_j(\bar{f}_n)).$$

Видно, что в этом приближении дисперсность среды приводит к линейной частотной модуляции выборочного сигнала разностной частоты, которая является причиной дисперсионных искажений формы его амплитудного спектра. Например, при  $s_j(\bar{f}_n) \sim 100$  мкс/МГц,  $\dot{f} \sim 100$  кГц/с скорость изменения разностной частоты составляет  $\dot{F} \sim 1$  Гц/с. За время, равное 1 с, девиация выборочного элемента сигнала разностной

частоты будет равна  $\Delta F_j = 1$  Гц, а за время, равное 10 с –  $\Delta F_j = 10$  Гц. Всякое увеличение наклона функции  $\tau_j(f)$  приведет к пропорциональному росту девиации частоты элемента разностного сигнала. Заметим, что в обоих случаях такие элементы сигнала разностной частоты являются узкополосными, поскольку для них  $F_j(\bar{f}_n) \sim 0,7-1,2$  кГц и относительная полоса частот  $\sim 10^{-3}-10^{-2}$ . Однако, если в первом случае база элемента  $\sim 1$  и спектр имеет форму пиков, описываемых функцией (12), то во втором она составляет  $\sim 100$  и спектр приобретает прямоугольную форму, описываемую функцией (19).

Получим условия возникновения значительных дисперсионных искажений сжатых в частотной области ЛЧМ сигналов. Для этого исследуем нелинейную часть фазовой функции, которая в нашем случае имеет параболическую зависимость от частоты и оценим ее изменения на полосе частот выборочного ЛЧМ сигнала. Полосу частот, на границах которой набег нелинейной составляющей фазы составляет 1 рад, будем, как это принято [11], называть полосой когерентного распространения зондирующего сигнала, а наклон функции  $\tau_j(f)$ , для которого при заданной полосе частот сигнала нелинейная составляющая фазовой функции составляет 1 рад, будем считать критическим [11]. Формулы для полосы когерентности, критического наклона и коэффициента фазовой дисперсности среды распространения имеют соответственно вид [11]:

$$\Delta f_{kj} = 2 / \sqrt{\pi |s_j|}, \quad S_{\text{крj}} = \frac{4}{\pi} \frac{1}{(\Delta f)^2}, \quad p_j^2 = \frac{s}{S_{\text{крj}}} = \left( \frac{\Delta f}{\Delta f_{kj}} \right)^2. \quad (20)$$

Если база выборочного сигнала разностной частоты  $b_j = \Delta F_j \cdot T_\ominus \gg 1$  (что эквивалентно неравенствам  $s_j \gg (1/(\Delta f)^2)$  или  $p_j^2 \gg 1$ ), то АЧХ его спектра является почти однородной на девиации частоты  $\Delta F_j = \dot{f}^2 \cdot s_j(\bar{f}_n) \cdot T_\ominus$  этого сигнала. При этом сам спектр имеет вид:

$$|S_j(F)| \approx \begin{cases} U_0^2 \frac{H_j(\bar{f}_n) \sqrt{T_\ominus}}{4 \sqrt{\Delta F_j}}, & \text{при } |F - F_j(\bar{f}_n)| < \Delta F_j \\ 0, & \text{при } |F - F_j(\bar{f}_n)| > \Delta F_j \end{cases}. \quad (21)$$

Видно, что амплитуда спектра не зависит от полосы элемента зондирующего сигнала, а ширина, вместо того чтобы убывать, растет пропорционально полосе выборочного зондирующего ЛЧМ сигнала. Это означает, что разрешающая способность по задержке сигнала, вместо того чтобы расти, падает. Этот результат позволяет заключить, что полоса выборочного ЛЧМ сигнала не должна превышать полосы когерентного распространения или наклон функции  $\tau_j(f)$  не должен превышать критического наклона.

Таким образом, проведенные исследования показывают, что на некоторой частоте  $\bar{f}_n$  потенциальная разрешающая способность ЛЧМ ионозонда по задержке при распространении сигналов по различным траекториям (механизмам) достигается в случае, когда полоса выборочного сигнала совпадает с полосой когерентного распространения на данной частоте.

**Разрешающая способность при определении критической частоты слоя для вертикального зондирования ионосферы. Оптимальная полоса частот зондирующего сигнала.** Обычно для скачковых механизмов распространения характерен рост наклона дисперсионной характеристики с приближением частоты к максимально применимой, а в случае вертикального зондирования – к критической частоте слоя [11]. Таким образом, с увеличением частоты элемента сигнала происходит уменьшение потенциальной разрешающей способности по задержке. С другой стороны, очевидно, что разрешение по критической частоте слоя будет расти с уменьшением полосы частот выборочного элемента, однако будет уменьшаться энергия элемента и как следствие, отношение сигнал/шум –  $SNR$ . В связи с этим проблема выбора оптимальной полосы сигнала связана с необходимостью учета как дисперсионных искажений элемента, так и его энергетических характеристик.

При неизменной полосе сигнала коэффициент фазовой дисперсности меняется в зависимости от рабочей частоты элемента сигнала из-за изменения наклона ионограммы. При этом наклоны ионограммы увеличиваются, а полоса когерентности уменьшается с приближением рабочей частоты к критической частоте слоя, в окрестности которой для модели слоя можно пользоваться параболическим приближением. Поэтому рассмотрим вопрос о потерях импульсной мощности сжатого сигнала, когда средняя частота спектра сигнала приближается к критической частоте слоя. В данном случае для оценок коэффициента потерь можно использовать параболическую модель ионосферного слоя, когда плазменная частота имеет вид [10]:

$$f_N^2 = f_c^2 \left[ \frac{2(h-h_0)}{y_m} - \frac{(h-h_0)^2}{y_m^2} \right]. \quad (22)$$

Для нее зависимость действующей высоты от частоты (ионограмма ВЗ) имеет вид:

$$h_o = h_0 + 0,5y_m \frac{f}{f_c} \ln \frac{f_c + f}{f_c - f}. \quad (23)$$

Умножая формулу (23) на коэффициент  $2/c$ , а затем, дифференцируя результирующую функцию по частоте, получим выражение для наклона ионограммы [12]:

$$s(f) = \frac{y_m}{cf_c} \left[ \ln \frac{f_c + f}{f_c - f} + \frac{2f_c f}{f_c^2 - f^2} \right]. \quad (24)$$

В окрестности критической частоты слоя, когда  $f_c - f = \delta f \ll f_c$ , наклон имеет вид:

$$s(f) = \frac{y_m}{c \cdot \delta f}. \quad (25)$$

Если  $f = \bar{f}$ , то  $\delta f$  является отстройкой средней частоты спектра зондирующего сигнала от критической частоты слоя.

Оценим далее потери в импульсной мощности сжатого сигнала из-за дисперсности среды распространения. Воспользуемся для этого формулами (12) и (19), вычислив от-

ношение квадратов максимальных значений. Обозначив десятичные логарифмы этого отношения через  $\eta_j$ , получим:

$$\eta_j = -10 \lg b_j = -20 \lg s_j \Delta f^2 = -20 \lg \frac{y_m \Delta f^2}{c \cdot \delta f}, \quad (26)$$

где  $b_j = \Delta F_j T_0$  – база элемента сигнала разностной частоты.

Формула (26) показывает, что потери в импульсной мощности сжатого сигнала растут с увеличением базы сигнала разностной частоты, которая появляется у него из-за дисперсности среды распространения. При вертикальном распространении сложного сигнала, когда средняя частота его спектра находится вблизи критической частоты слоя, потери растут с увеличением полутолщины слоя, полосы частот элемента сигнала и с уменьшением отстройки частоты. Очевидно, что при некотором запасе в отношении  $SNR$  при уменьшении отстройки сжатый сигнал будет теряться в шумах. Таким образом, данную отстройку следует принять за разрешающую способность ионозонда при определении критической частоты слоя.

Обычно при обработке сигнала в частотной области для повышения работоспособности спектральных оценок применяется усреднение нескольких последовательных спектров. Для этого спектры получают для перекрывающихся элементов сигнала [13]. Чаще всего элементы перекрывают наполовину, а для усреднения берут четыре спектра. В этом случае, если полоса одного элемента излучаемого сигнала была равна  $\Delta f$ , то общая полоса четырех последовательных элементов составит  $2,5 \Delta f$ .

Используем эти рассуждения для оценки оптимальной полосы элемента сложного сигнала при вертикальном зондировании ионосферы. Примем общую полосу частот четырех последовательных перекрывающихся элементов за искомое значение. Тогда, если запас в отношении сигнал/шум составляет  $SNR_0$ , то потери сигнала с уменьшением отстройки не могут превышать этого значения. Отсюда имеем:

$$20 \lg \frac{y_m \Delta f^2}{c \cdot \delta f} = SNR_0. \quad (27)$$

Из формулы (27) нетрудно получить оценку для оптимальной полосы  $\Delta f_o$  элемента ЛЧМ сигнала при вертикальном зондировании ионосферы в случае, когда  $\delta f = 2,5 \Delta f$  и  $\eta_j = SNR_0$ :

$$\Delta f_o = \frac{2,5 c 10^{\frac{SNR_0}{20}}}{y_m}. \quad (28)$$

Пусть  $SNR_0 = 10$  дБ, для  $E$  слоя  $y_m = 20$  км, а для  $F$  слоя –  $y_m = 100$  км. Это значит, что оптимальная полоса ЛЧМ сигнала определяется характеристиками  $F$  слоя и для данных параметров будет равна  $\Delta f_o \approx 25$  кГц. При этом разрешающая способность при

определении критической частоты слоя составит  $\sim 60$  кГц, а разрешающая способность по групповому запаздыванию  $\sim 60$  мкс.

**Выводы.** Аналитическими методами получено решение задачи о влиянии дисперсности среды распространения на разрешающую способность ионозондов со сложными зондирующими сигналами. Показано, что фазовая дисперсность ограничивает разрешающую способность ионозонда по времени группового запаздывания сигнала пределом – потенциальной разрешающей способностью. Получены формулы для оценки потенциальной разрешающей способности через характеристики среды распространения.

Показано, что фазовая дисперсность среды приводит также к потерям в импульсной мощности сжатого сигнала и влияет на разрешающую способность критической частоты ионосферного слоя при вертикальном зондировании. Получены формулы для определения потенциальной разрешающей способности этого параметра ионосферы и оптимальной полосы частот зондирующего сигнала при вертикальном зондировании ионосферы.

### Список литературы

1. Альперт, Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера / Я. Л. Альперт. – М.: Наука, 1972. – 564 с.
2. Дэвис, К. Радиоволны в ионосфере / К. Дэвис. – М.: Мир, 1973. – 502 с.
3. Брюнелли, Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
4. Терехов, Л. С. Повышение точности радиозондирования ионосферы / Л. С. Терехов, В. А. Шапцев. – Новосибирск: СО РАН. – 1997. – 131 с.
5. Пиггот, В. Р. Руководство URSI по интерпретации и обработке ионограмм / В. Р. Пиггот, К. Равер. – М.: Наука, 1977.
6. Иванов В. А. ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях. (Обзор) / В. А. Иванов, В. И. Куркин, В. Е. Носов и др. // Радиофизика. – 2003. – Т. XLVI. – № 11. – С. 919–952.
7. Poole, W. V. A. Advanced sounding (1). The FM-CW alternative / W. V. A. Poole // Radio Sci. – V. 20. – № 6. – 1985. – P. 1609 – 1616.
8. Горелик, Г. С. Колебания и волны / Г. С. Горелик. – М.: Физматлит, 1959. – 572 с.
9. Кук, Ч. Радиолокационные сигналы / Ч. Кук, М. Бернфельд. – М.: Сов. радио. 1971. – 567 с.
10. Гинзбург, В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967.
11. Иванов, Д. В. Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений: (Монография) / Д. В. Иванов. – Йошкар-Ола: Марийский гостехуниверситет, 2006. – 266 с.
12. Иванов, В. А. Особенности распространения коротковолновых ЛЧМ сигналов в регулярной ионосфере / В. А. Иванов. – Йошкар-Ола: Марийский политехнический институт. Деп в ВИНТИ, № 3064 – 85, 1985. – 41 с.
13. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов / Р. Отнес, Л. Эноксон. – М.: Мир, 1982. – 428 с.
14. Иванов, В. А. Зондирование ионосферных каналов высокочастотной связи с поверхности Земли / В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова и др. // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2008. – №1. – С. 3–20.

Статья поступила в редакцию 22.10.08.

*V. A. Ivanov, D. V. Ivanov,  
A. R. Lashchevskiy, M. I. Ryabova*

**IONOSPHERE DISPERSIVITY IMPACT  
ON LFM IONOSONDE RESOLVING POWER**

*The analysis of propagation environment dispersivity impact on the resolving power of ionosondes with complex probing signals is presented. It is shown that in case of phase dispersivity resolving power is bounded by a certain limit, i.e. potential resolving power. Analytical expressions relating potential resolving power and characteristics of sounding signal propagation environment are obtained. In connection with the dependence of environment dispersivity on frequency the issue of optimum sounding signal frequency band and ionosonde resolving power when defining the ionosphere layer extreme frequency is considered.*

**Key words:** *ionosphere environment dispersivity, radio propagation, LFM ionosonde, resolving power.*

---

*ИВАНОВ Владимир Алексеевич* – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности МарГТУ. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы. Автор 247 публикаций.

*ИВАНОВ Дмитрий Владимирович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики МарГТУ. Область научных интересов – моделирование технических систем, широкополосные сигналы, распространение радиоволн. Автор 88 публикаций.

*ЛАЩЕВСКИЙ Алексей Романович* – старший преподаватель кафедры высшей математики МарГТУ. Область научных интересов – широкополосные сигналы, распространение радиоволн. Автор 18 публикаций.

*РЯБОВА Мария Игоревна* – студентка МарГТУ. Область научных интересов – моделирование технических систем, распространение радиоволн. Автор 12 публикаций.

УДК 621.371.25;550.388.2

И. Е. Царев

## УМЕНЬШЕНИЕ УРОВНЯ КОРРЕЛЯЦИОННЫХ ШУМОВ В КАНАЛЬНОМ ЛЧМ ИОНОЗОНДЕ ПРИ ЗАДАННОЙ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ\*

*Разработаны методики уменьшения уровня корреляционных шумов при сжатии многоэлементного ЛЧМ сигнала в частотной и временной областях. Полученные результаты позволяют достичь максимального значения уровня центрального лепестка по отношению к боковым при заданной разрешающей способности.*

**Ключевые слова:** каналный ионозонд, ЛЧМ сигнал, разрешающая способность, корреляционные шумы.

**Введение.** В настоящее время информационно-телекоммуникационные системы декаметрового диапазона развиваются в направлении создания адаптивных систем, в которых осуществляется автоматическая подстройка характеристик в соответствии с текущими значениями параметров радиоканалов [1–4]. Необходимость адаптации обусловлена вариациями ионосферы и шумов. В связи с этим актуальной является задача создания устройств мониторинга ионосферных радиоканалов [5]. В работе для этих целей предлагается каналный ЛЧМ ионозонд, позволяющий по результатам зондирования устанавливать оптимальные каналы для систем декаметровой радиосвязи по критериям максимальной помехоустойчивости при минимальной излучаемой мощности связного сигнала и максимальной скорости передачи информации. Устройство позволяет определять следующие обобщенные характеристики каналов: отношение сигнал/шум, доплеровское смещение, доплеровское уширение, дисперсию задержек, а также полосу прозрачности ионосферной линии связи [6,7]. Далее эти данные пересчитываются в информационные характеристики системы связи. В данном устройстве используются два типа сжатия зондирующих сигналов – в частотной и временной областях. Известно, что при сжатии сложных сигналов возникает проблема влияния боковых лепестков на характеристики системы, которая решается с применением сглаживающих окон.

**Целью работы** является разработка методик выбора типа сглаживающего окна для задач максимального ослабления боковых лепестков в сжатом сигнале при заданной разрешающей способности.

В ионозонде [1–7] для определения отношения сигнал/шум, дисперсии задержек, полосы прозрачности радиолинии применяются ЛЧМ импульсы со скоростью перестройки 100 кГц/с, с полосой 3,1 кГц. Их средняя частота меняется в диапазоне 3–30 МГц

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 08-02-12081) и Фонда содействия развитию малых форм предприятий (УМНИК, госконтракт №521Р/7648).

последовательно с шагом 100 кГц. Данные импульсы сжимаются во временной области. Для доплеровских измерений применяются многоэлементные ЛЧМ сигналы, которые сжимаются в частотной области.

Поставленная задача решалась путем численного моделирования. Для сглаживания применялись следующие окна: минимальное 3-членное Блэкмана – Херриса, минимальное 4-членное Блэкмана – Херриса, Хемминга, Блэкмана, точное Блэкмана. Данные окна оказывали влияние на оценку отношения сигнал/шум, разрешение модовой структуры, оценку дисперсии задержки. Окна для исследования выбирались по принципу максимального ослабления боковых лепестков по сравнению с центральным (Блэкмана – Херриса и др.) и окно с небольшой эквивалентной полосой (Хемминг – 1,36 бин) [9].

При сжатии сигнала в частотной области обработку сигнала весовыми окнами можно проводить двумя способами [6,8]. В первом случае проводится ослабление спектральных составляющих внутри ячейки разрешения по времени. Для этого весь сигнал разностной частоты перемножают с функцией окна. Во втором случае весовой обработке подвергается не весь сигнал целиком, а каждый элемент ЛЧМ сигнала в отдельности.

Т а б л и ц а 1

#### Ослабление боковых лепестков при весовой обработке сигнала

Вид сглаживающего окна	Ослабление боковых лепестков при обработке всего сигнала, дБ	Ослабление боковых лепестков при обработке каждого элемента, дБ	Разрешение по времени группового запаздывания при весовой обработке каждого элемента, мс
Хемминга	-7,69	-6,75	0,64 (ниже в 2 раза)
Точное Блэкмана	-7,72	-13,73	1,28 (ниже в 4 раза)
Блэкмана	-8,04	-12,36	1,28 (ниже в 4 раза)
Минимальное 3-членное Блэкмана Херриса – 67 дБ	-8,04	-12,04	1,28 (ниже в 4 раза)
Минимальное 4-членное Блэкмана – Херриса – 92 дБ	-8,04	-16,18	1,92 (ниже в 6 раз)

В табл. 1 представлены результаты применения сглаживающих окон при сжатии сигнала в частотной области. Видно, что максимальное ослабление боковых лепестков наблюдается при применении минимального 4-членного окна Блэкмана – Херриса. При этом при сглаживании отдельных импульсов наблюдается потеря разрешающей способности. Таким образом, предложено обработку проводить по следующей комплексной методике.

На первом этапе проводится весовая обработка всего импульса сигнала минимальным 4-членным окном Блэкмана – Херриса, что снижает уровень боковых лепестков на 8,04 дБ. На втором этапе обработки каждого элемента производится выбор сглаживающего окна, удовлетворяющего условию необходимой разрешающей способности.

Например, для средних широт при нормальных условиях [10] по рекомендации ИТУ разрешающая способность должна быть ниже 1 мс, в этом случае возможно применение

ние сглаживающего окна Хемминга, для возмущенных условий возможно применение окон, дающих большее ослабление боковых лепестков.

Т а б л и ц а 2

**Ослабление уровня боковых лепестков при применении комплексной методики**

Окно, накладываемое на каждый элемент, при сглаживании всего импульса минимальным 4-членным окном Блэкмана – Хэрриса – 92 дБ	Ослабление боковых лепестков, дБ	Разница уровня центрального пика с пиком в 1 соседней ячейки разрешения по времени, дБ	Разница уровня центрального пика с пиком во 2 соседней ячейки разрешения по времени, дБ	Разница уровня центрального пика с пиком в 3 соседней ячейки разрешения по времени, дБ
Хемминга	-16,21	-7,14	-	-
Точное Блэкмана	-23,04	-4,48	-20,60	-
Блэкмана	-23,97	-4,22	-20,12	-
Минимальное 3-членное Блэкмана – Хэрриса – 67 дБ	-23,43	-4,33	-20,27	-
Минимальное 4-членное Блэкмана – Хэрриса – 92 дБ	-31,52	-3,07	-13,82	-35,7

При сжатии во временной области сглаживающие окна накладываются на спектр сигнала. При этом существует неоднозначность в выборе положения и ширины окна при наложении его на спектр сигнала. Рис. 1 иллюстрирует зависимость значения отношения сигнал/шум – разница между максимумом главного лепестка и бокового (рис. 1,а) и ширины главного лепестка по уровню 3 дБ (рис. 1,б) от положения сглаживающего окна Хемминга фиксированной ширины при перемещении его вдоль спектра сжатого во временной области сигнала.

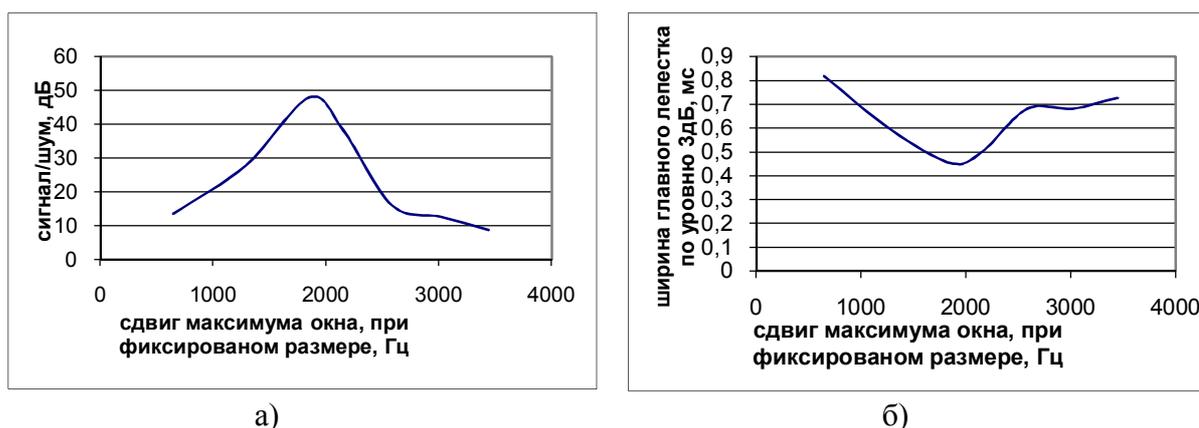


Рис. 1. Выбор положения окна при сжатии сигнала во временной области

Из графиков видно, что максимальное ослабление уровня боковых лепестков наблюдается при расположении середины сглаживающего окна на частоте 1850 Гц. Также видно, что наибольшая разрешающая способность наблюдается на этой же частоте. Таким образом, дальнейшие исследования велись при данном расположении максимумов сглаживающих окон.

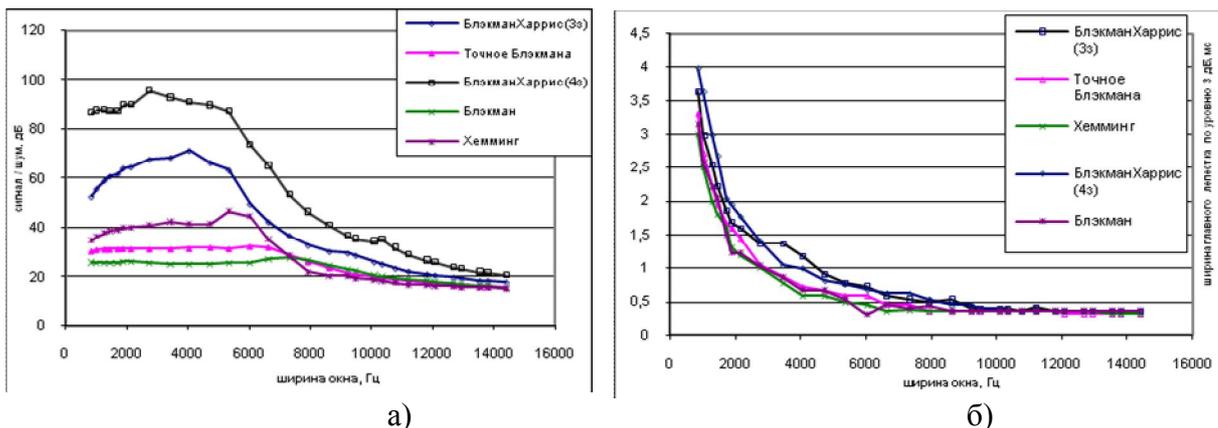


Рис.2. Выбор ширины окна при сжатии сигнала во временной области

Далее исследовалось влияние ширины сглаживающего окна на отношение сигнал/шум (рис. 2, а) и ширину главного лепестка (рис.2, б) для различных окон. Данные зависимости получены при изменении полосы частот сглаживающего окна при сжатии ЛЧМ импульса во временной области.

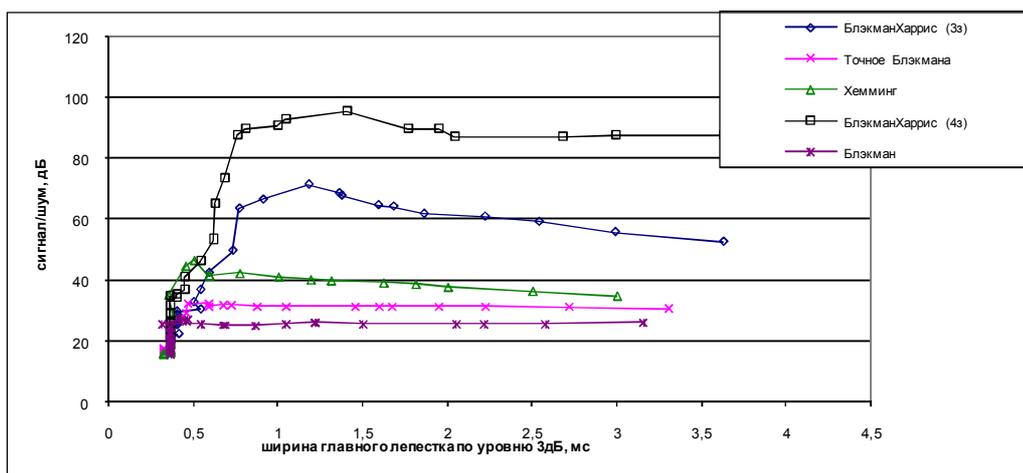


Рис.3. Зависимость ширины окна от величины ослабления боковых лепестков

Далее были построены (рис. 3) зависимости ширины основного лепестка по уровню 3 дБ от отношения уровня основного лепестка к первому дополнительному. Как видно из полученных графиков, до величины ослабления 30 дБ может быть выбрано любое из представленных окон. С увеличением ослабления до 47 дБ необходимо выбирать окно Хемминга, при дальнейшем увеличении необходимого ослабления следует выбирать 4-членное окно Блэкмана – Херриса.

**Выводы.** При сжатии сигнала канального ЛЧМ ионозонда в частотной области результаты, полученные в ходе работы, позволяют достичь наилучшего ослабления боковых лепестков при заданном разрешении по времени группового запаздывания. При сжатии сигнала во временной области полученная методика позволяет выбрать оптимальные значения ширины сглаживающего окна по критерию максимальной разрешающей способности ионозонда по задержке сигнала при максимальном отношении уровня основного лепестка к боковым.

*Список литературы*

1. *Johnson, E. E.* Analysis of third-generation HF ALE technologies. MILCOM 2000. 21st Century Military Communications Conference Proceedings, V.2, Issue , 2000 Page(s):1139 – 1143. vol.2.
2. *Lane, G.* Improved guidelines for automatic link establishment operations. Preprint paper 3B-4, Ionospheric Effects Symposium, Alexandria VA USA, May 3-5, 2005.
3. Prediction methods for adaptive HF system planning and Operation, International Telecommunication, ITU-R, Union (Geneva) Radiocommunication Recommendation ITU-R F.1611.,2003.
4. *Иванов, В. А.* Зондирование ионосферных каналов высокочастотной связи с поверхности Земли / В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова и др. // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2008. – №1. – С. 3–20.
5. *Рябова, Н. В.* Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: Научное издание / Н. В. Рябова. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. – 292 с.
6. *Иванов, В. А.* Экспериментальное исследование влияния уровня солнечной активности на временные характеристики ионосферных радиоканалов // Сборник трудов X международной байкальской молодёжной научной школы по фундаментальной физике / В. А. Иванов, И. Е. Царев, М. И. Рябова. – Иркутск, 2007. – С. 127–130.
7. *Царев, И. Е.* Экспериментальная оценка характеристик декаметровых радиоканалов с использованием разработанного устройства для зондирования ДКМ радиоканалов непрерывным ЛЧМ сигналом / И. Е. Царев, М. И. Рябова // Сборник трудов четырнадцатой международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика», 28-29 февраля 2008, г. Москва. – М, 2008. – Т.1. – С. 62–63.
8. *Иванов, В. А.* Канальный зонд для диагностики ионосферных линий декаметровой радиосвязи / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, И. Е. Царев, М. И. Рябова // Сборник трудов XIV международной НТК Радиолокация, радионавигация, связь. – Воронеж, 2008. – Т.2. – С.1176–1185.
9. *Рябова, Н. В.* Автоматическая оценка характеристик КВ радиоканалов для задач исследования тонкой структуры ионосферной плазмы и ее движения / Н. В. Рябова, И. Е. Царев // Сборник трудов XXV всероссийского симпозиума «Радиолокационное исследование природных сред». – СПб., 2007.
10. *Херрис, Дж.* Использование окон при гармоническом анализе методом дискретного преобразования Фурье. ТИИЭР, 1978. – Т.66. – N1. – С. 60–96.
11. Recommendation ITU-R F.1487. Testing of HF Modems with Bandwidths of up to about 12 kHz using ionospheric Channel Simulators (Question ITU-R 213/9).

Статья поступила в редакцию 03.11.08.

*I. Ye. Tzaryov*

**CORRELATION NOISE LEVEL DECREASING IN CHANNEL LFM IONOSONDE  
AT A GIVEN RESOLVING POWER**

*The techniques of correlation noise level decreasing at multi-element LFM signal compression in frequency and time scopes are developed. The results obtained allow to reach maximum value of central lobe level against side lobes at the resolution power given.*

**Key words:** channel ionosonde, LFM signal, resolution power, correlation noise.

---

*ЦАРЕВ Иван Евгеньевич* – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – моделирование, диагностика ионосферы, информационно-телекоммуникационные системы. Автор 14 публикаций.

УДК 621.371.25;550.388.2

*Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. А. Елсуков,  
А. Р. Лащевский, А. В. Мальцев, М. И. Рябова, И. Е. Царев*

## ГЛОБАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ МАКСИМАЛЬНО ПРИМЕНИМЫХ ЧАСТОТ ВЧ РАДИОЛИНИЙ В ПЕРИОД СОЛНЕЧНОГО ЗАТМЕНИЯ 29 МАРТА 2006 г.\*

*Представлены результаты экспериментальных исследований изменений максимально применимых частот (МПЧ) в период солнечного затмения методом наклонного зондирования ионосферы на восточноевропейской и западносибирской сети радиотрасс. Получены характеристики вариаций электронной концентрации в F слое ионосферы на основе метода редукации ионограмм.*

*Ключевые слова:* ЛЧМ ионозонд, максимально применимая частота, электронная концентрация, ионосфера, солнечное затмение.

**Введение.** Движение лунной тени через земную атмосферу приводит как к вариациям регулярного содержания электронов в ионосфере, так и возбуждению волновых возмущений [1–4]. Поэтому солнечные затмения представляют уникальные возможности для исследования динамических процессов в ионосфере. С этой целью часто используются методы вертикального и наклонного зондирования ионосферы. В первом случае основной характеристикой является критическая частота ионосферы, а во втором – максимально наблюдаемая частота (МНЧ). Последняя, являясь верхней границей диапазонов прозрачности ионосферных радиолоний, характеризует влияние глобальных изменений электронной концентрации на распространение декаметровых радиоволн.

**Цель работы:** представить результаты исследований солнечного затмения на обширной территории восточноевропейского и западносибирского регионов методом наклонного зондирования ионосферы.

**Техника эксперимента и условия его проведения.** Эксперименты по наклонному зондированию ионосферы проводились в период затмения 29 марта 2006 г. и в контрольные дни 28 и 30 марта 2006 г. Геометрия движения лунной тени и фаз затмения приведена на рис. 1 [5]. Для дистанционного зондирования ионосферы над Восточной Европой и Западной Сибирью использовались ионозонды с линейно-частотно-модулированными сигналами. Передатчики ионозондов располагались в Великобритании (Инскип), на о. Кипр и в России (Иркутск), а приемный пункт – в России (Йошкар-Ола).

---

\* Работа выполнена при поддержке РФФИ (№ 06-02-16089, 08-02-12081).

На рис. 1 представлена также геометрия радиотрасс. Видно, что по широте они расположены в диапазоне от 35° до 56,6° северной широты, а по долготе – от 3° западной до 104,3° восточной долготы. Максимальные фазы затмения для средних точек радиотрасс принимали следующие значения: Кипр – Йошкар-Ола – 0,89 (наблюдалась в 11h15m UT); Инскип – Йошкар-Ола – 0,49 (наблюдалась в 11h03m UT); Иркутск – Йошкар-Ола – 0,91 (наблюдалась в 11h39m UT).

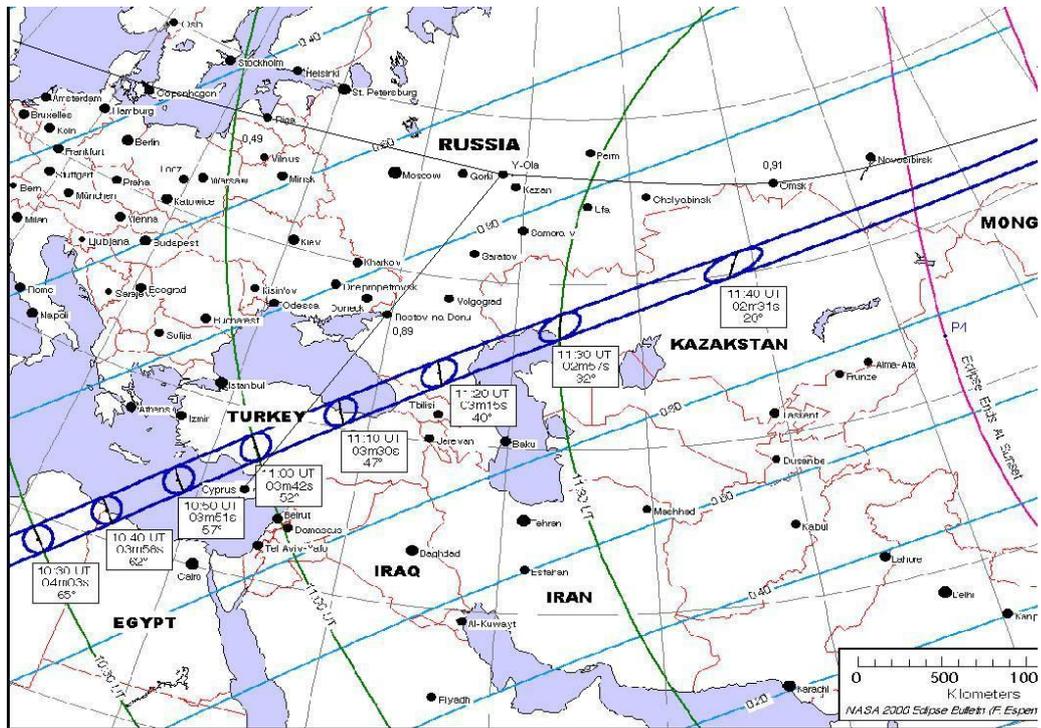


Рис.1. Геометрия движения тени, фаз затмения и география сети радиолиний

Частота зондирующего сигнала менялась от 4 до 30 МГц со скоростью 100 кГц/с. Для синхронной работы пространственно-разнесенных частей ионозондов использовались приемники системы GPS.

Приемный пункт являлся разработкой МарГТУ [4,6]. Его внешний вид представлен на рис. 2.

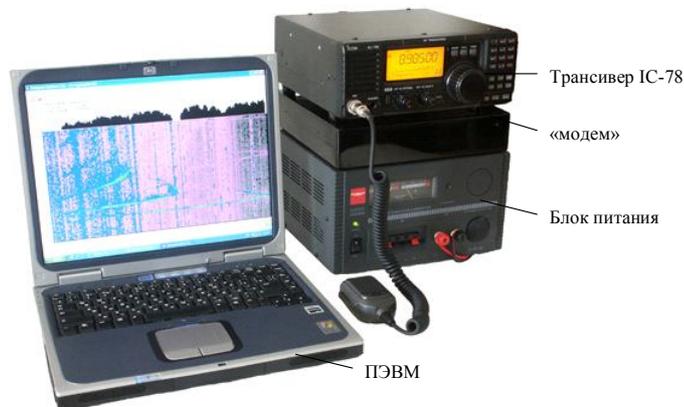


Рис. 2. Мобильный радиофизический измерительный комплекс

Процесс обработки, получения и накопления данных в приемном пункте ЛЧМ ионозонда описан в работе [6].

На рис.3 и 4 приведены ионограммы, полученные на рассматриваемых радиотрассах, для момента максимума затмения и для того же времени в контрольный день.

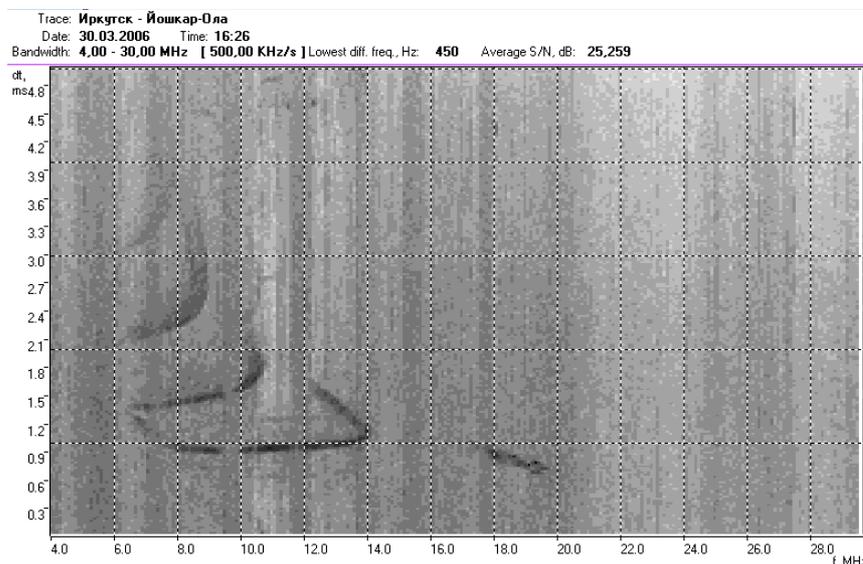


Рис. 3. Ионограмма наклонного зондирования для контрольного дня на трассе Иркутск – Йошкар-Ола

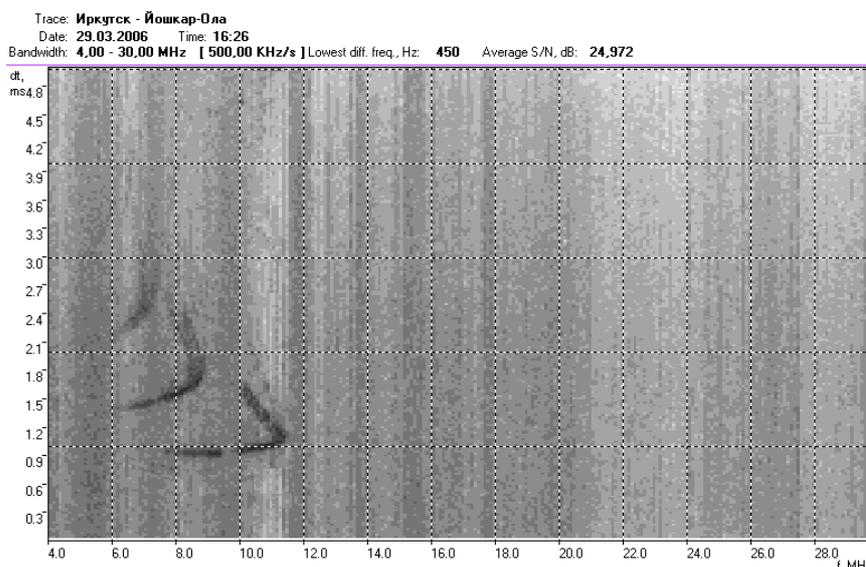


Рис. 4. Ионограмма наклонного зондирования для максимума затмения на трассе Иркутск – Йошкар-Ола

Поскольку на состояние ионосферы кроме затмения оказывает влияние уровень геомагнитной активности, то на рис. 5 представлен суточный ход  $K_p$  индекса в контрольный день и период затмения. Из графиков видно, что в период наблюдений значения индексов слабо изменялись от 1 до 3, что соответствует «спокойному» состоянию, следовательно, вариации ионосферных параметров определялись воздействием солнечного затмения.

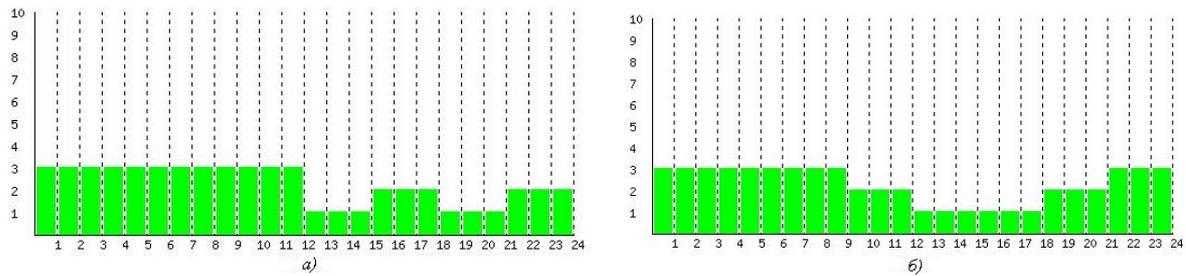


Рис. 5. Суточный ход  $K_p$  индекса: а – контрольный день; б – день затмения.

**Экспериментальные результаты.** На основе полученных экспериментальных ионограмм в автоматическом режиме производилось определение вторичных данных путем выбора алгоритма их обработки, который служил основой для расчета характеристик распространения декаметровых радиоволн и параметров ионосферы. В частности, были получены суточные вариации максимально наблюдаемых частот (МНЧ) мода  $1F$  в период затмения (точки) и контрольные дни (треугольники) для различных радиотрасс.

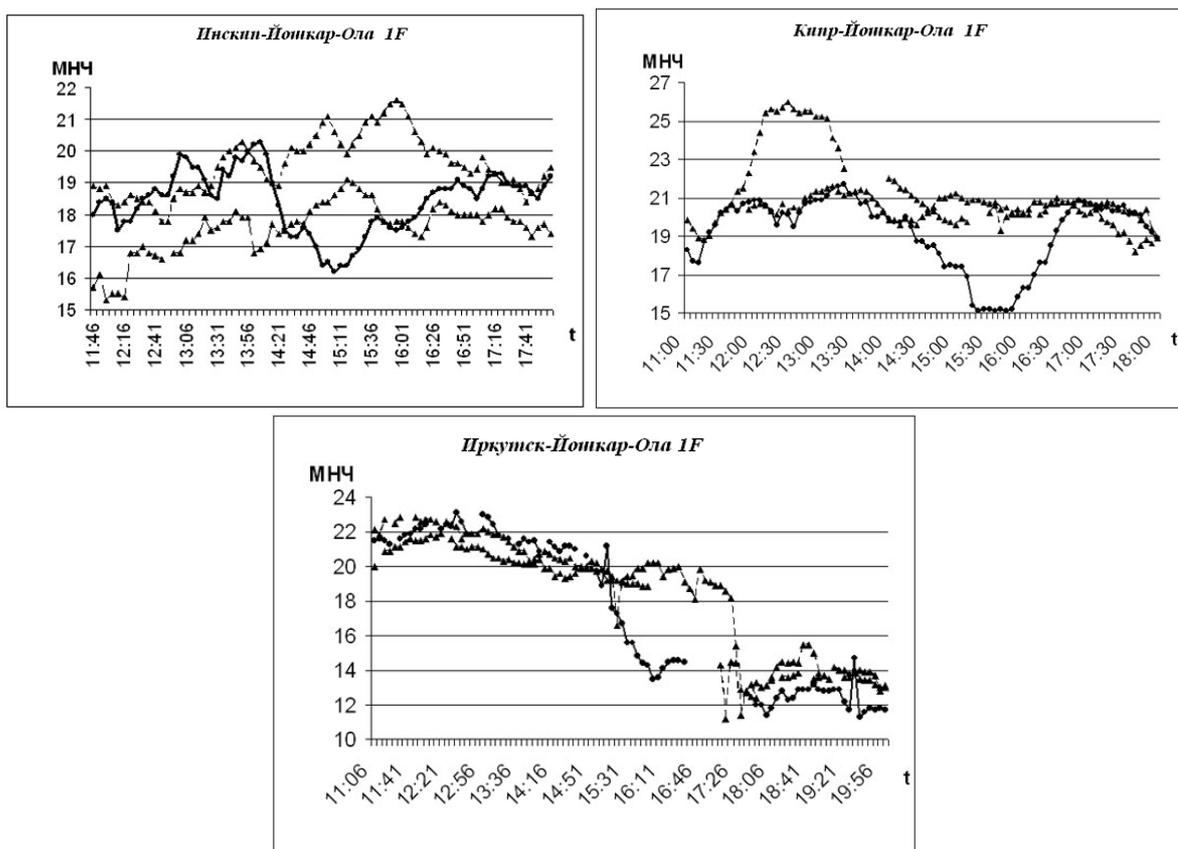


Рис. 6. Суточные вариации МНЧ мода  $1F$  исследуемых радиотрасс

Абсолютные и относительные значения вариаций МНЧ мода  $1F$  для исследуемых радиотрасс приведены в таблице. Видно, что в период затмения на всех исследуемых радиотрассах МНЧ уменьшалось в зависимости от фазы затмения.

### Абсолютные и относительные вариации МНЧ мода 1F

Радиотрасса	Начало затмения	Максимум затмения	Окончание затмения	Фаза затмения
Инскип–Йошкар-Ола	-1,3 (-6,9%)	2,1 (12,3%)	1,4 (7,2%)	0,49
Кипр–Йошкар-Ола	0,8 (3,75%)	3,9 (20,5%)	1,5 (7,5%)	0,89
Иркутск–Йошкар-Ола	-0,4 (-2,15%)	3,5 (19,5%)	2,3 (13,7%)	0,91

Последняя была сведена к математической задаче решения системы уравнений:

$$\begin{cases} \Delta f(N_{\max}, h_{\max}) = 0 \\ \Delta \tau(N_{\max}, h_{\max}) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

где  $\Delta f$  – функция, значением которой является разница между частотами экспериментальных и теоретических ионограмм, при фиксированных задержках;  $\Delta \tau$  – функция, значением которой является разница между задержками экспериментальных и теоретических ионограмм, на фиксированных частотах;  $N_{\max}$  – искомая переменная, значение которой равно электронной концентрации в максимуме слоя,  $h_{\max}$  – искомая переменная, значение которой равно высоте максимума электронной концентрации слоя.

Система (1) решалась методом Ньютона, в результате чего находились значения переменных  $N_{\max}$ ,  $h_{\max}$  для слоя  $F$ . Далее полученные значения подставлялись в формулы для профиля электронной концентрации, который задавался параболической моделью для слоя  $F$ .

$$N(h) = N_{0F} \left( 1 - \frac{(h - h_{0F})^2}{y_{mF}^2} \right), \quad (2)$$

где  $y_{mF}$  – полутолщина слоя  $F$ . Для параболической модели значения полутолщины слоев выбирались на основе данных справочной модели ионосферы (СМИ-88).

Полученные профили электронной концентрации приведены на рис.7.

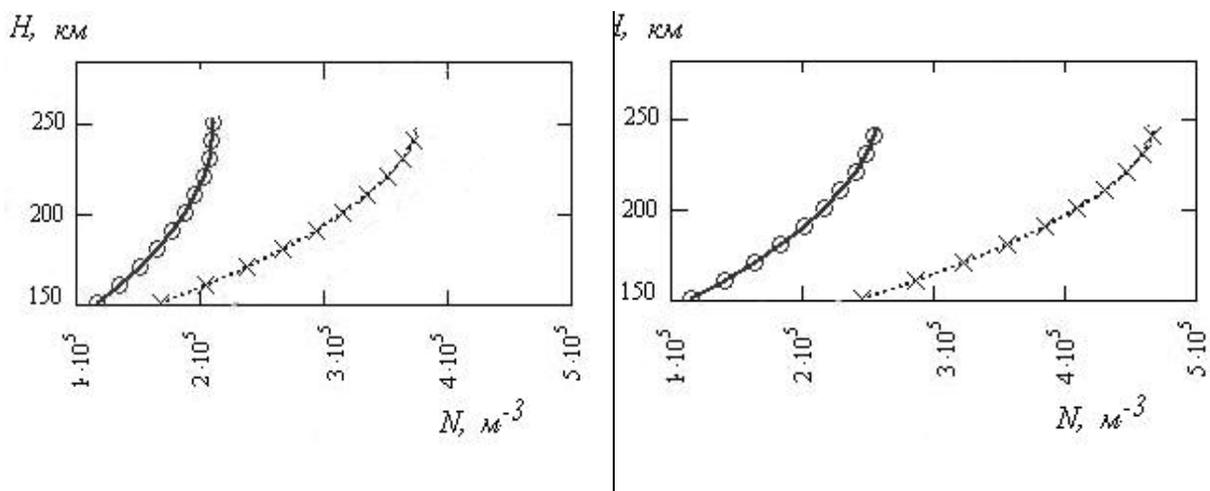


Рис. 7.  $N(h)$  – профили слоя  $F$  на трассе Иркутск–Йошкар-Ола, Кипр–Йошкар-Ола

Видно, что величина электронной концентрации в максимуме F слоя уменьшилась на 55 и 52% соответственно на трассе Иркутск – Йошкар-Ола и на трассе Кипр – Йошкар-Ола.

#### **Выводы.**

1. Установлено, что в период полного солнечного затмения наблюдалось уменьшение МНЧ мода 1F по сравнению с контрольным днем на трассе Кипр – Йошкар-Ола на 20,5%, на трассе Инскип – Йошкар-Ола – 12,3%, Иркутск – Йошкар-Ола – 19,5% (1F).

2. Развита алгоритм редукции ионограмм НЗИ в N(h) – профиль для средней точки трассы. Показано, что в период затмения электронная концентрация в F-области уменьшается на 52–55%.

Авторы выражают благодарность д-ру физ.-мат. наук В. И. Куркину за организацию работы передающего пункта в Иркутске.

#### *Список литературы*

1. *Lerfald, G. M.* Traveling ionospheric disturbances observed near time of the solar eclipse of 7 March 1970 and TID analysis / G. M. Lerfald, R. B. Jurgens, F. J. Vesecky, T. W. Washburn // J. Atmos. Terr. Phys. – 1972. – V. 34. – P. 733–742.
2. *Брынько, Н. Г.* Эффект солнечного затмения 22 июня 1990 г. на среднеширотных трассах протяженностью 4 Мм / Н. Г. Брынько, В. А. Иванов, Н. В. Рябова и др. // Геомагнетизм и аэронавигация. – 1992. – Т.32. – № 1. – С. 164-166.
3. *Рябова, Н. В.* Исследование аномальных мод распространения КВ на сети трасс наклонного ЛЧМ зондирования ионосферы / Н. В. Рябова, В. А. Иванов, А. А. Понятов и др. // Проблемы дифракции и распространения электромагнитных волн: Междувед. сб. / Моск. физ.-техн. ин-т. – М., 1996. – С. 95-103.
4. *Иванов, В. А.* ЛЧМ ионозонд и его применение в ионосферных исследованиях. (Обзор) / В. А. Иванов, В. И. Куркин, В. Е. Носов и др. // Радиофизика. – 2003. – Т. XLVI. – №11. – С.919-952.
5. [www.astrogalaxy.ru](http://www.astrogalaxy.ru)
6. Информационно-аналитическая система для исследования ионосферы и каналов декаметрового радиосвязи: научное издание / А. Б. Егшин, В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2006. – 323 с.
7. *Иванов, В. А.* Восстановление профиля электронной концентрации по ионограммам наклонного зондирования ионосферы / В. А. Иванов, Е. В. Катков // Вестник КГТУ. – 2006. – №2. – С.24–26.

Статья поступила в редакцию 12.11.08.

*D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova,  
A. A. Yelsoukov, A. R. Lashchevskiy,  
A. V. Maltsev, M. I. Ryabova, I. Ye. Tzaryov*

#### **GLOBAL VARIATIONS OF MAXIMUM APPLICABLE FREQUENCIES HF RADIO LINES DURING THE SOLAR ECLIPSE OF 29 MARCH 2006**

*The results of experimental research into the change of maximum applicable frequencies (MAF) during solar eclipse with the technique of ionosphere slanted sounding on East-European and West-Siberian radio nets are presented. Characteristics of electrons concentration variations in the F layer of the ionosphere have been obtained with the method of ionogram reduction.*

**Key words:** LFM ionosonde, maximum applicable frequency, electrons concentration, ionosphere, solar eclipse.

*ИВАНОВ Дмитрий Владимирович* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики МарГТУ. Область научных интересов – моделирование технических систем, широкополосные сигналы, распространение радиоволн. Автор 88 публикаций.

*ИВАНОВ Владимир Алексеевич* – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности МарГТУ. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, моделирование, широкополосные сигналы. Автор 247 публикаций.

*РЯБОВА Наталья Владимировна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи МарГТУ. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, прогнозирование, моделирование, адаптивная система, информационно-телекоммуникационная система. Автор 132 публикаций, в том числе авторской монографии, монографий в соавторстве, учебного пособия с грифом Министерства образования РФ.

*ЕЛСУКОВ Алексей Александрович* – инженер кафедры радиотехники и связи МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование ионосферы. Автор 12 публикаций.

*ЛАЩЕВСКИЙ Алексей Романович* – старший преподаватель кафедры высшей математики МарГТУ. Область научных интересов – широкополосные сигналы, распространение радиоволн. Автор 18 публикаций.

*МАЛЬЦЕВ Александр Валерьевич* – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – моделирование, адаптивная система, информационно-телекоммуникационная система. Автор 12 публикаций.

*РЯБОВА Мария Игоревна* – студентка МарГТУ. Область научных интересов – моделирование технических систем, распространение радиоволн. Автор 12 публикаций.

*ЦАРЕВ Иван Евгеньевич* – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – моделирование, диагностика ионосферы, информационно-телекоммуникационная система. Автор 14 публикаций.

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА**

УДК 621.391.266

*А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев***ДИСКРЕТНЫЕ ФАЗОКОДИРОВАННЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С НУЛЕВЫМ УРОВНЕМ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ЦИКЛИЧЕСКОЙ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ РАЗМЕРНОСТИ КВАДРАТНЫХ ЧИСЕЛ\***

*Предлагается метод синтеза дискретных фазокодированных последовательностей (ФКП) с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции (АКФ) размерностей  $N = z^2$ ,  $z \in Z$  – любое положительное целое число. Показано, что существует бесконечное множество таких кодовых последовательностей. Приводится доказательство того, что коды Фрэнка, коды класса  $p$ , коды Чу являются частными случаями новых синтезированных последовательностей.*

*Ключевые слова:* шумоподобные сигналы, дискретные фазокодированные последовательности, циклическая автокорреляционная функция, бесконечное множество, фазокодированных последовательностей.

**Введение.** Принцип сжатия излученного сигнала предполагает, что длительный во времени сигнал продолжительностью  $T = N \cdot t$ , соответствующий полосе  $F$ , на приемной стороне может быть сжат в короткий импульс с продолжительностью  $t = 1/F$ . При этом внутренняя структура зондирующего сигнала состоит из  $N$  различных кодовых элементов с определенным законом изменения в соответствующие моменты времени [1]. Среди кодовых последовательностей, определяющих внутреннюю структуру радиосигналов, широкое распространение получили дискретные ФКП [2,3,5–7], состоящие из  $N$  отсчетов.

Дискретную ФКП  $\Gamma = \{\gamma_n\}_{0,N-1}$  можно представить в виде:

$$\Gamma = \{\gamma_n\}_{0,N-1} = \{\exp(i\varphi_n)\}_{0,N-1}, \quad (1)$$

\*Работа выполнена при финансовой поддержке по темам НИР в рамках гранта Президента РФ МД-63.2007.9 и гранта РФФИ 07-07-00285.

где  $i$  – мнимая единица,  $\varphi_n \in [0, 2\pi]$  – фаза  $n$ -го элемента, причем для исключения «повернутых» ФКП фаза нулевого элемента всегда равна нулю  $\varphi_0 = 0$

Принцип сжатия основан на свойствах корреляционной функции дискретной ФКП. Циклическую АКФ кодовой последовательности можно определить как:

$$\eta_\tau = \sum_{n=0}^{N-1} \gamma_{n+\tau \pmod{N}} \gamma_n^*, \quad \tau = 0, 1, \dots, N-1. \quad (2)$$

Идеальное сжатие зондирующего сигнала на приемной стороне предполагает выполнение следующих условий. Нулевой отсчет циклической АКФ должен быть равен размерности кодовой последовательности  $\eta_0 = N$ , а все остальные (боковые лепестки) должны принимать нулевое значение:  $\eta_1 = \eta_2 = \dots = \eta_{N-1} = 0$ .

На сегодняшний день известны следующие дискретные фазокодированные последовательности с нулевыми боковыми лепестками циклической АКФ:

1. Бинарные последовательности с непротивоположными символами [3], полученные на основе теории разностных множеств, сбалансированных на один уровень [4]. В этом случае вектор фаз  $\Psi = \{\varphi_n\}_{0, N-1}$  в выражении (1) будет иметь следующий вид:

$$\Psi = \left[ \varphi_{d_1=0} = 0 \quad \alpha \quad \dots \quad \varphi_{d_2} = 0 \quad \alpha \quad \alpha \quad \dots \quad \alpha \quad \varphi_{d_k} = 0 \quad \alpha \quad \alpha \right], \quad (3)$$

где элементы  $d_1, d_2, \dots, d_k \in D(N, k, \lambda)$  являются элементами разностного множества  $D$  с параметрами  $N, k, \lambda$ . Параметр  $N$  задает порядок группы классов вычетов  $G$ . Параметр  $k$  для разностных множеств, приводящих к циклической АКФ с нулевым уровнем боковых лепестков, для нечетных  $N$  должен удовлетворять условию  $k = \frac{N \pm 1}{2}$ , а для четных  $N$  существуют только два таких разностных множества  $D(N=2, k=1, \lambda=1)$  и  $D(N=4, k=3, \lambda=2)$ . Параметр  $\lambda$  разностного множества определяет число упорядоченных пар  $(d_i, d_j)$ , таких, что  $d_i * d_j^{-1} = d$ ,  $d \in G$ ,  $d \neq e$ ,  $*$  – операция в группе  $G$ ,  $d^{-1}$  – обратный элемент,  $e$  – единичный элемент.

Таким образом, если на позициях вектора (3) с порядковыми номерами  $d_i$ , где  $d_i \in D$  разместить значения фаз равных 0, а на остальных  $N - k$  позициях значения фаз равных некоторому значению  $\alpha = \pi \pm \arccos\left(\frac{N-1}{N+1}\right)$ , то получим  $N$  позиционную кодовую последовательность, циклическая АКФ которой имеет нулевой уровень боковых лепестков.

В работе [5] приводятся следующие бинарные последовательности, для которых можно сформировать по указанному правилу ФКП с нулевыми боковыми лепестками циклической АКФ:

а) коды Лежандра размерностью  $N = 4z + 3 = p$ , где  $p$  – простое число;

б) коды Якоби размерностью  $N = p_1 \cdot p_2$ , где  $p_1, p_2$  – простые числа близнецы, т. е.  $p_2 = p_1 + 2$ ;

- в) коды Холла размерностью  $N = 4z^2 + 27 = p$ , где  $p$  – простое число;  
 в) М-последовательности размерностью  $N = 2^z - 1$ ;  
 г) коды Зингера для  $N = 2; 4$ .

2.  $N$ -фазные коды Чу [3] (или ассоциированные с ЛЧМ сигналом коды, или коды Гаусса), синтезированные на основе прямой дискретной аппроксимации закона линейной частотной модуляции. Код Чу существует для любой длины  $N$ , и его закон изменения фаз имеет следующий вид:

$$\varphi_n = \begin{cases} \frac{\pi n^2}{N}, & N \pmod{2} = 0; \\ \frac{2\pi n^2}{N}, & N \pmod{2} = 1. \end{cases}, \quad (4)$$

где  $n = 0, 1, \dots, N - 1$ .

3. Среди кодов, имеющих размерность  $N = z^2$ , где  $z \in Z$  – любое положительное целое число, известны фазокодированные последовательности Френка [8], которые также синтезируются на основе ступенчатой аппроксимации линейной частотной модуляции, только значительно более грубой. Значения фаз кода Френка определяются в соответствии с выражением:

$$\varphi_n = \frac{2\pi}{z} \cdot n \cdot \left] \frac{n}{z} \right[ \cdot \lambda, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – число взаимно-простое с  $z$ ,  $\left] x \right[$  – целая часть числа  $x$ .

4. Коды класса р [6] имеют, как и коды Френка, размерность  $N = z^2$ , где  $z \in Z$  – любое положительное целое число. Значения фаз кода класса р определяются в соответствии с выражением:

$$\varphi_n = -\frac{\pi}{z} \cdot (z - 2m - 1) \cdot (mz + k), \quad (6)$$

где  $m = 0, 1, \dots, z - 1$ ,  $k = 0, 1, \dots, z - 1$ ,  $z$  – целое положительное число,  $n = 0, 1, \dots, N - 1$  – номера отсчетов исчисляются в соответствии с правилом  $n = k + m \cdot z$ .

5. Коды, полученные на основе кодов 1–4 с помощью линейных преобразований [9]. В работе [9] показано, что если имеется исходная ФКП, значения фаз которой представлены в виде произвольного вектора

$$\Psi = [\varphi_0 = 0 \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \dots \quad \varphi_{N-1}], \quad (7)$$

то с помощью линейных преобразований («изоморфизмов», «автоморфизмов» и «сопряжений») можно получить ФКП с корреляционными характеристиками, аналогичными исходной.

Для произвольной размерности  $N$  может существовать  $K$  решений, полученных в результате линейных преобразований некоторого исходного решения:

$$\Psi^T = [\Psi^{(0)} \quad \Psi^{(1)} \quad \dots \quad \Psi^{(K-1)}]. \quad (8)$$

На основе исходного вектора фаз (7) можно сформировать  $K_{изом.} = \varphi(N)$  изоморфных векторов с законами изменения фаз вида:

$$\varphi_n^{(изом.)} = \varphi(n \cdot \lambda_k) \bmod(N), \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad k = 0, 1, \dots, \varphi(N)-1, \quad (9)$$

где  $\lambda_k$  – число взаимно-простое с  $N$ ,  $\varphi(N)$  – функция Эйлера от числа  $N$ .

Для каждого исходного вектора (7) в общем случае можно получить  $K_{авт.} = N$  автоморфных векторов с законами изменения фаз вида:

$$\varphi_n^{(авт.)} = \varphi_k - \varphi(n+k) \bmod(N), \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (10)$$

Кроме того, для каждого исходного вектора (7) существует сопряженный вектор с фазами:

$$\varphi_n^{(сопр.)} = -\varphi_n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (11)$$

Таким образом, максимальное число возможных кодовых последовательностей (изоморфных, автоморфных и сопряженных решений), полученных на основе некоторой исходной кодовой последовательности, определится как:

$$K = 2 \cdot \varphi(N) \cdot N. \quad (12)$$

Отметим, что преобразования вида (9)–(11) могут приводить для некоторых ФКП к повторным кодовым последовательностям, поэтому для каждой исходной кодовой последовательности, задаваемой выражениями (3)–(6), формулируются собственные правила применения преобразований вида (9)–(11) [9,11].

### 1. Постановка задач исследований

В каждом случае для заданной длины кода  $N$  среди известных ФКП определено общее количество возможных кодовых последовательностей с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ. Отметим, что с ростом  $N$  резко возрастает количество ФКП, имеющих идеальную АКФ с нулевыми боковыми лепестками. Тем не менее, при выбранном ограничении  $\varphi_0 = 0$  (с целью исключения «повернутых» ФКП) общее количество известных кодовых последовательностей заданной длины  $N$  конечно.

В данной работе, опираясь на метод, разработанный в [9–13], синтезируем новые ФКП размерности квадратных чисел  $N = z^2$ , где  $z \in Z$  – любое положительное целое число. Синтезированные ФКП заданной длины  $N = z^2$  будут образовывать бесконеч-

ное множество кодовых последовательностей с нулевыми боковыми лепестками. При этом будет показано, что коды Чу, Френка, коды класса р и коды, полученные с помощью линейных преобразований (9–11) исходных кодов (4–6), являются частными случаями синтезированных в данной работе ФКП.

**2. Новые ФКП, образующие бесконечное множество кодов с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ длины квадратных чисел**

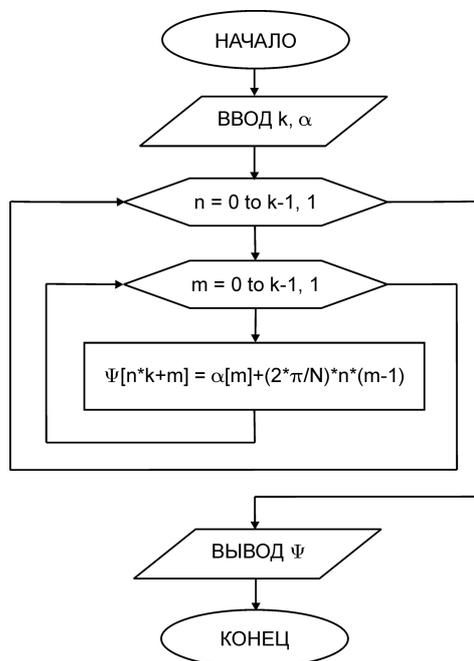
Для размерности кодовой последовательности, являющейся квадратным числом, при нулевом уровне боковых лепестков циклической АКФ существует бесконечное множество решений, задаваемых выражением:

$$\varphi_n = \alpha_{n \pmod{k}} + \frac{2\pi}{z} \cdot \left\lfloor \frac{n}{z} \right\rfloor \cdot (n-1) \pmod{z}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \tag{13}$$

где  $\lfloor x \rfloor$  – целая часть числа  $x$ ;  $\mathbf{A} = [0 \ \alpha_1 \ \alpha_2 \ \dots \ \alpha_{z-1}]$  – вектор фаз, принимающих произвольные значения из диапазона  $\alpha_0 = 0, \alpha_m \in [0; 2\pi], m = 1, \dots, z-1$ .

На основании выражения (13) с помощью линейных преобразований (9)–(11) можно получить все бесконечные решения.

Блок-схема алгоритма синтеза ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ, образующих бесконечное решение вида (13), представлена на рисунке.



Блок-схема алгоритма синтеза ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ размерности  $N = z^2$ , образующих бесконечное множество кодовых последовательностей

Далее рассмотрим примеры синтеза бесконечного множества ФКП с нулевыми боковыми лепестками циклической АКФ без учета линейных преобразований вида (9)–(11).

Для размерности  $N = 4$  бесконечное множество ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ будет определяться на основании выражения:

$$\varphi_0 = 0, \varphi_1 = \alpha_1, \varphi_2 = \pi, \varphi_3 = \alpha_1, \alpha_1 \in [0; 2\pi]. \quad (14)$$

Для размерности  $N = 9$  бесконечное множество ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ будет определяться на основании выражения:

$$\begin{aligned} \varphi_0 = 0, \varphi_1 = \alpha_1, \varphi_2 = \alpha_2, \varphi_3 = \frac{4\pi}{3}, \varphi_4 = \alpha_1, \varphi_5 = \alpha_2 + \frac{2\pi}{3}, \varphi_6 = \frac{2\pi}{3}, \\ \varphi_7 = \alpha_1, \varphi_8 = \alpha_2 + \frac{4\pi}{3}, \alpha_1 \in [0; 2\pi], \alpha_2 \in [0; 2\pi]. \end{aligned} \quad (15)$$

Для размерности  $N = 16$  бесконечное множество ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ будет определяться на основании выражения:

$$\begin{aligned} \varphi_0 = 0, \varphi_1 = \alpha_1, \varphi_2 = \phi_2, \varphi_3 = \phi_3, \varphi_4 = \frac{3\pi}{2}, \varphi_5 = \alpha_1, \varphi_6 = \alpha_2 + \frac{\pi}{2}, \\ \varphi_7 = \alpha_3 + \pi, \varphi_8 = \pi, \varphi_9 = \alpha_1, \varphi_{10} = 2 + \pi, \varphi_{11} = \phi_3, \varphi_{12} = \frac{\pi}{2}, \varphi_{13} = \alpha_1, \\ \varphi_{14} = \alpha_2 + \frac{3\pi}{2}, \varphi_{15} = \alpha_3 + \pi \quad \alpha_1 \in [0; 2\pi], \alpha_2 \in [0; 2\pi], \alpha_3 \in [0; 2\pi]. \end{aligned} \quad (16)$$

Для размерности  $N = 25$  бесконечное множество ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ будет определяться на основании выражения:

$$\begin{aligned} \varphi_0 = 0, \varphi_1 = \alpha_1, \varphi_2 = \alpha_2, \varphi_3 = \alpha_3, \varphi_4 = \alpha_4, \varphi_5 = \frac{8\pi}{5}, \varphi_6 = \alpha_1, \varphi_7 = \alpha_2 + \frac{2\pi}{5}, \\ \varphi_8 = \alpha_3 + \frac{4\pi}{5}, \varphi_9 = \alpha_4 + \frac{6\pi}{5}, \varphi_{10} = \frac{6\pi}{5}, \varphi_{11} = \alpha_1, \varphi_{12} = \alpha_2 + \frac{4\pi}{5}, \\ \varphi_{13} = \alpha_3 + \frac{8\pi}{5}, \varphi_{14} = \alpha_4 + \frac{2\pi}{5}, \varphi_{15} = \frac{4\pi}{5}, \varphi_{16} = \alpha_1, \varphi_{17} = \alpha_2 + \frac{6\pi}{5}, \varphi_{18} = \alpha_3 + \frac{2\pi}{5}, \\ \varphi_{19} = \alpha_4 + \frac{8\pi}{5}, \varphi_{20} = \frac{2\pi}{5}, \varphi_{21} = \alpha_1, \varphi_{22} = \alpha_2 + \frac{8\pi}{5}, \varphi_{23} = \alpha_3 + \frac{6\pi}{5}, \varphi_{24} = \alpha_4 + \frac{4\pi}{5}, \\ \alpha_1 \in [0; 2\pi], \alpha_2 \in [0; 2\pi], \alpha_3 \in [0; 2\pi], \alpha_4 \in [0; 2\pi]. \end{aligned} \quad (17)$$

**Заключение.** В работе приводится аналитическое решение задачи синтеза бесконечного множества фазокодированных последовательностей размерностей, являющихся квадратными числами, с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции. В качестве примера рассмотрены ФКП размерностей

$N = 4,9,16,25$ . Приводится блок-схема алгоритма синтеза ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков АКФ.

В работе рассмотрены известные ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков: бинарные последовательности с непротивоположными символами, коды Чу, коды Френка и коды класса  $p$ , а также коды, полученные на основе этих ФКП с помощью линейных преобразований специального вида. Доказано, что коды Чу, коды Френка и коды класса  $p$  являются частными случаями предложенного в работе бесконечного множества ФКП размерности  $N = z^2$ , где  $z \in Z$  – любое положительное целое число.

Следует отметить, что хотя для размерностей кода  $N = z^2$  и существует бесконечное множество решений, задаваемых выражением вида (13), а также бесконечное множество решений, полученных с помощью преобразований (9)–(11), однако, даже в этом случае множество возможных решений не является полным. Существуют другие возможные ФКП размерности  $N = z^2$  с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ.

#### Список литературы

1. *Woodward, P. M.* Probability and Information Theory with Application to Radar / P. M. Woodward. – Pergamon Press, N. Y., 1953.
2. *Кук, Ч.* Радиолокационные сигналы. Теория и применение / М. Бернфельд, Ч. Кук. – М.: Сов. радио, 1971.
3. *Ипатов, В. П.* Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / В. П. Ипатов. – М.: Техносфера, 2007.
4. *Холл, М.* Комбинаторика / М. Холл. – М.: Мир, 1970.
5. *Свердлик, М. Б.* Оптимальные дискретные сигналы / М. Б. Свердлик. – М.: Сов. радио, 1975.
6. *Варакин, Л. Е.* Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985.
7. *Гантмахер, В. Е.* Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка / В. Е. Гантмахер. – СПб.: Наука и техника, 2005.
8. *Frank, R.* Phase shift codes with good periodic correlation properties / R. Frank, S. Zadoff // IRE Trans. On Inf. Th., 1962. – V. IT-8. – №6. – P.381.
9. *Leukhin, A. N.* Algebraic solution of the synthesis problem for coded sequences / A. N. Leukhin // Quantum Electronics. – 2005. – V.35. – № 8. – P. 688 – 692.
10. Полное решение задачи синтеза фазокодированных сигналов с равномерным энергетическим спектром // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2005. – Т.7. – №1. – С. 163–168.
11. *Леухин, А. Н.* Полное решение задачи синтеза дискретных фазокодированных сигналов с одноуровневой циклической автокорреляционной функцией // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т.13. – №2–3. – С. 48–55.
12. *Леухин, А. Н.* Теория синтеза фазокодированных последовательностей с одноуровневой АКФ // Вестник Марийского государственного технического университета. Серия «Радиотехнические и информационные системы». – 2008. – №1 – С. 61–76.
13. *Леухин, А. Н.* Синтез шумоподобных фазокодированных последовательностей / А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия «Физико-математические науки». – 2008. – Том. 150. – кн. 2. – С. 38–50.

Статья поступила в редакцию 12.11.08.

*A. N. Leoukhin, N. V. Parsayev*

**DISCRETE PHASE-CODED SUCCESSIONS WITH ZERO LEVEL OF SIDE LOBES  
OF CYCLICAL AUTOCORRELATIONAL FUNCTION  
OF QUADRATIC NUMBERS DIMENSION**

*The method for synthesis of discrete phase-coded successions (DPS) with zero level of side lobes of cyclical autocorrelational function (ACF) of  $N = z^2$  dimensions,  $z \in Z$  being any congruum, is given. The amount of such code successions is shown to be infinite. Frank codes,  $p$ -class codes, Chu codes are proved to be particular cases of new synthesized successions.*

**Key words:** *noise-like signals, discrete phase-coded successions, cyclical autocorrelational function, infinite aggregate, phase-coded successions.*

---

*ЛЕУХИН Анатолий Николаевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры информатики МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор более 150 научных публикаций, в том числе соавтор двух монографий, изданных в главном научном издательстве физико-математической литературы «Физматлит».*

*ПАРСАЕВ Николай Владимирович – аспирант кафедры информатики МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор 10 публикаций.*

УДК 621.391.266

*Н. В. Парсаев, А. Н. Леухин*

## ДИСКРЕТНЫЕ ФАЗОКОДИРОВАННЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ С НУЛЕВЫМ УРОВНЕМ БОКОВЫХ ЛЕПЕСТКОВ ЦИКЛИЧЕСКОЙ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ РАЗМЕРНОСТИ, КРАТНОЙ ЧЕТЫРЕМ\*

*Предлагается метод синтеза дискретных фазокодированных последовательностей с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции (АКФ) размерностей  $N = 4 \cdot z$ ,  $z \in Z$  – любое целое число. Показано, что существует бесконечное множество таких кодовых последовательностей.*

**Ключевые слова:** шумоподобные сигналы, дискретные фазокодированные последовательности, циклическая автокорреляционная функция, бесконечное множество фазокодированных последовательностей.

**Введение.** Исследованием и решением проблемы синтеза сложных сигналов с хорошими корреляционными характеристиками или, в более общем случае, свойствами функции неопределенности, начиная с 50-х годов прошлого столетия, занимаются многочисленные научные коллективы у нас в стране и за рубежом [1–8]. Теория сложных сигналов, фундамент которой был заложен более полувека назад в трудах Р. М. Woodward [1], В. А. Котельникова [2] и К. Шеннона [3], является на сегодняшний день основой для создания многоканальных систем связи с кодовым разделением каналов [6,8], для построения современных радиолокационных станций [7], для использования в медицинской аппаратуре высокого разрешения [8], для использования в системах ориентации и навигации [6,8], в системах искусственного интеллекта [7,8] и распознавания образов [6], в системах защиты информации [8] и т. д. Применение шумоподобных сложных сигналов на практике позволяет решать самые противоречивые по своей формулировке и одновременно ключевые радиотехнические задачи [6–8].

Особый интерес среди синтезируемых кодовых последовательностей представляют дискретные фазокодированные последовательности (ФКП) [4–8]. Теория синтеза таких кодов, хотя и достаточно развита, но далека до своего завершения. На сегодняшний день в теории синтеза сложных сигналов получены следующие результаты:

- 1) развиты методы синтеза фазокодированных последовательностей, среди которых особое место занимают алгебраические методы [5];
- 2) при больших градациях фазы синтезирован ряд последовательностей, обладающих

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке по темам НИР в рамках гранта Президента РФ МД-63.2007.9 и гранта РФФИ 07-07-00285.

одноуровневой автокорреляционной функцией с нулевым значением боковых лепестков: коды Френка, коды класса  $p$ , коды, ассоциированные с линейно-частотно-модулированным сигналом [4];

3) при фазовой манипуляции (значения фаз равны  $0, \pi$ ) разработаны методы синтеза бинарных кодов с одноуровневой автокорреляционной функцией: коды Лежандра, Якоби, Холла, М-последовательности, коды Зингера. Уровень боковых лепестков таких кодов не равен нулю, хотя и является достаточно малым по отношению к главному отсчету [5].

Однако множество найденных решений является далеко не полным по сравнению с множеством всех возможных кодовых последовательностей заданных размерностей для фиксированного уровня боковых лепестков. Современное состояние теории синтеза дискретных фазокодированных последовательностей заданной размерности не позволяет ответить на следующие вопросы: всегда ли существуют коды для фиксированного значения уровня боковых лепестков; если они существуют, то как определить их возможное число; если известно число возможных решений, то как, не конкретизируя метод кодирования, синтезировать сразу все возможные кодовые последовательности. В первую очередь такое состояние исследуемого вопроса объясняется отсутствием решения фундаментальных проблем дискретной математики, связанных с теорией конечных полей [9–15].

В работах [16–20] развивается обобщенный метод синтеза фазокодированных последовательностей, позволяющий получить все известные на сегодняшний день ФКП с одноуровневой АКФ, а также синтезировать большое количество новых ФКП с заданным уровнем боковых лепестков периодической АКФ.

В данной работе будут рассмотрены новые ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ размерности  $N = 4 \cdot z$ ,  $z \in Z$ .

### **1. Метод синтеза фазокодированных последовательностей с заданным уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции**

Как показано в работе [16], задача синтеза фазокодированных последовательностей с одноуровневой циклической автокорреляционной функцией сводится к решению системы тригонометрических уравнений:

для четных  $N$ :  $K = N/2 - 1$ ,  $n = 1, 2, \dots, K$ :

$$\begin{cases} \cos(\varphi_n) + \cos(\varphi_{N-n}) + \sum_{m=1}^{N-n-1} \cos(\varphi_m - \varphi_{m+n}) + \sum_{m=1}^{n-1} \cos(\varphi_m - \varphi_{m+N-n}) = a, \\ \cos(\varphi_K) + \sum_{m=1}^{N-K-1} \cos(\varphi_m - \varphi_{m+K}) = a/2, \\ \sin(\varphi_n) - \sin(\varphi_{N-n}) - \sum_{m=1}^{N-n-1} \sin(\varphi_m - \varphi_{m+n}) + \sum_{m=1}^{n-1} \sin(\varphi_m - \varphi_{m+N-n}) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

для нечетных  $N$ :  $K = \frac{N-1}{2}$ ,  $n = 1, 2, \dots, K$ :

$$\begin{cases} \cos(\varphi_n) + \cos(\varphi_{N-n}) + \sum_{m=1}^{N-n-1} \cos(\varphi_m - \varphi_{m+n}) + \sum_{m=1}^{n-1} \cos(\varphi_m - \varphi_{m+N-n}) = a, \\ \sin(\varphi_n) - \sin(\varphi_{N-n}) - \sum_{m=1}^{N-n-1} \sin(\varphi_m - \varphi_{m+n}) + \sum_{m=1}^{n-1} \sin(\varphi_m - \varphi_{m+N-n}) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

где  $a$  – значение уровня боковых лепестков циклической АКФ.

Произвольное решение системы уравнений (1), (2) при фиксированном значении уровня боковых лепестков  $a$  циклической АКФ будет иметь вид:

$$\Psi = [\varphi_0 = 0 \quad \varphi_1 \quad \varphi_2 \quad \dots \quad \varphi_{N-1}], \quad (3)$$

где неизвестными являются углы поворотов элементов кодовой последовательности  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{N-1}$ .

Для каждого решения вида (3) с помощью линейных преобразований (изоморфизмов, автоморфизмов и сопряжений) можно получить решения, которые также будут являться корнями системы уравнений (1)–(2).

Для произвольной размерности  $N$  может существовать  $K$  решений, полученных в результате линейных преобразований некоторого исходного решения:

$$\Psi^T = [\Psi^{(0)} \quad \Psi^{(1)} \quad \dots \quad \Psi^{(K-1)}]. \quad (4)$$

На основе исходного решения системы уравнений (1)–(2) можно сформировать  $K_{изом.} = \varphi(N)$  изоморфных решения вида:

$$\varphi_n^{(изом.)} = \varphi_{(n \cdot \lambda_k) \bmod(N)}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad k = 0, 1, \dots, \varphi(N)-1, \quad (5)$$

где  $\lambda_n$  – число взаимно-простое с  $N$ ,  $\varphi(N)$  – функция Эйлера от числа  $N$ .

Для каждого решения в общем случае можно получить  $K_{авт.} = N$  автоморфных решения вида:

$$\varphi_n^{(авт.)} = \varphi_k - \varphi_{(n+k) \bmod(N)}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad k = 0, 1, \dots, N-1. \quad (6)$$

Кроме того, для каждого решения существует сопряженное решение вида:

$$\varphi_n^{(сопр.)} = -\varphi_n, \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (7)$$

Таким образом, максимальное число возможных кодовых последовательностей (изоморфных, автоморфных и сопряженных решений), полученных на основе некоторой кодовой последовательности, определится как:

$$K = 2 \cdot \varphi(N) \cdot N. \quad (8)$$

## 2. Новые ФКП, образующие бесконечное множество кодов с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ длины, кратной четырем

Анализ корней системы уравнений (1)–(2) показал, что для размерности кодовой последовательности, кратной четырем, при нулевом уровне боковых лепестков ( $a = 0$ ) циклической автокорреляционной функции существует бесконечное множество решений вида (3), задаваемых выражением:

$$\varphi_n = \alpha \cdot n(\bmod 2) + \frac{4\pi}{N} \cdot \sum_{s=0}^{n-1} \left\lfloor \frac{s+1}{2} \right\rfloor, \quad n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (9)$$

где  $\lfloor x \rfloor$  – целая часть числа  $x$ ;  $\alpha$  – произвольное значение фазы,  $\alpha \in [0; 2\pi]$ ,  $N = 4 \cdot z$ ,  $z \in Z$  – любое целое.

На основании выражения (9) с помощью линейных преобразований (5)–(7) можно получить все бесконечные решения, каждое из которых определяется произвольным значением угла  $\alpha$ .

Приведем примеры синтеза ФКП размерности  $N = 4 \cdot z$ ,  $z \in Z$ , образующих бесконечное множество, с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ.

Для размерности  $N = 4$  бесконечное множество ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ  $a = 0$  будет задаваться решением:

$$\varphi_0 = 0, \quad \varphi_1 = \alpha, \quad \varphi_2 = \pi, \quad \varphi_3 = \alpha, \quad \alpha \in [0; 2\pi]. \quad (10)$$

Все возможные кодовые последовательности, полученные из решения (10) на основании линейных преобразований (5)–(7), будут иметь вид:

$$\Psi^{(0)} = [0 \quad \alpha \quad \pi \quad \alpha], \quad \Psi^{(1)} = [0 \quad \alpha + \pi \quad 0 \quad \alpha].$$

Для размерности  $N = 8$  бесконечное множество ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ  $a = 0$  будет задаваться решением:

$$\varphi_0 = 0, \quad \varphi_1 = \alpha, \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2}, \quad \varphi_3 = \alpha + \pi, \quad \varphi_4 = 0, \quad \varphi_5 = \alpha + \pi, \quad (11)$$

$$\varphi_6 = \frac{\pi}{2}, \quad \varphi_7 = \alpha, \quad \alpha \in [0; 2\pi].$$

Все возможные кодовые последовательности, полученные из решения (9) на основании линейных преобразований (5)–(7), будут иметь вид:

$$\Psi^{(0)} = \left[ 0 \quad \alpha \quad \frac{\pi}{2} \quad \alpha + \pi \quad 0 \quad \alpha + \pi \quad \frac{\pi}{2} \quad \alpha \right],$$

$$\Psi^{(1)} = \left[ 0 \quad \alpha \quad \frac{3\pi}{2} \quad \alpha + \pi \quad 0 \quad \alpha + \pi \quad \frac{3\pi}{2} \quad \alpha \right],$$

$$\Psi^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \pi & \alpha + \frac{\pi}{2} & \pi & \alpha & 0 & \alpha + \frac{\pi}{2} \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \frac{3\pi}{2} & \alpha & 0 & \alpha + \pi & \frac{3\pi}{2} & \alpha + \pi \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(4)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \frac{\pi}{2} & \alpha & 0 & \alpha + \pi & \frac{\pi}{2} & \alpha + \pi \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(5)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & 0 & \alpha + \frac{\pi}{2} & \pi & \alpha & \pi & \alpha + \frac{\pi}{2} \end{bmatrix}.$$

Для размерности  $N = 12$  бесконечное множество ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ  $a = 0$  будет задаваться решением:

$$\varphi_0 = 0, \varphi_1 = \alpha, \varphi_2 = \frac{\pi}{3}, \varphi_3 = \alpha + \frac{2\pi}{3}, \varphi_4 = \frac{4\pi}{3}, \varphi_5 = \alpha, \varphi_6 = \pi, \quad (12)$$

$$\varphi_7 = \alpha, \varphi_8 = \frac{4\pi}{3}, \varphi_9 = \alpha + \frac{2\pi}{3}, \varphi_{10} = \frac{\pi}{3}, \varphi_{11} = \alpha, \alpha \in [0; 2\pi].$$

Все возможные кодовые последовательности, полученные из решения (12) на основании линейных преобразований (5)–(7), будут иметь вид:

$$\Psi^{(0)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \frac{\pi}{3} & \alpha + \frac{2\pi}{3} & \frac{4\pi}{3} & \alpha & \pi & \alpha & \frac{4\pi}{3} & \alpha + \frac{2\pi}{3} & \frac{\pi}{3} & \alpha \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(1)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \frac{5\pi}{3} & \alpha + \frac{4\pi}{3} & \frac{2\pi}{3} & \alpha & \pi & \alpha & \frac{2\pi}{3} & \alpha + \frac{4\pi}{3} & \frac{5\pi}{3} & \alpha \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(2)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \frac{2\pi}{3} & \alpha + \pi & 0 & \alpha + \frac{2\pi}{3} & 0 & \alpha + \pi & \frac{2\pi}{3} & \alpha & 0 & \alpha + \frac{\pi}{3} \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(3)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \frac{4\pi}{3} & \alpha + \pi & 0 & \alpha + \frac{4\pi}{3} & 0 & \alpha + \pi & \frac{4\pi}{3} & \alpha & 0 & \alpha + \frac{5\pi}{3} \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(4)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \pi & \alpha + \frac{4\pi}{3} & \frac{2\pi}{3} & \alpha + \frac{4\pi}{3} & \pi & \alpha & 0 & \alpha + \frac{4\pi}{3} & \frac{5\pi}{3} & \alpha + \frac{4\pi}{3} \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(5)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \pi & \alpha + \frac{2\pi}{3} & \frac{4\pi}{3} & \alpha + \frac{2\pi}{3} & \pi & \alpha & 0 & \alpha + \frac{2\pi}{3} & \frac{\pi}{3} & \alpha + \frac{2\pi}{3} \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(6)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \frac{4\pi}{3} & \alpha + \frac{5\pi}{3} & \frac{4\pi}{3} & \alpha & 0 & \alpha + \pi & \frac{4\pi}{3} & \alpha + \frac{2\pi}{3} & \frac{4\pi}{3} & \alpha + \pi \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(7)} = \begin{bmatrix} 0 & \alpha & \frac{2\pi}{3} & \alpha + \frac{\pi}{3} & \frac{2\pi}{3} & \alpha & 0 & \alpha + \pi & \frac{2\pi}{3} & \alpha + \frac{4\pi}{3} & \frac{2\pi}{3} & \alpha + \pi \end{bmatrix},$$

$$\Psi^{(8)} = \left[ 0 \quad \alpha \quad \frac{5\pi}{3} \quad \alpha \quad 0 \quad \alpha + \frac{4\pi}{3} \quad \pi \quad \alpha \quad \frac{2\pi}{3} \quad \alpha \quad \pi \quad \alpha + \frac{4\pi}{3} \right],$$

$$\Psi^{(9)} = \left[ 0 \quad \alpha \quad \frac{\pi}{3} \quad \alpha \quad 0 \quad \alpha + \frac{2\pi}{3} \quad \pi \quad \alpha \quad \frac{4\pi}{3} \quad \alpha \quad \pi \quad \alpha + \frac{2\pi}{3} \right],$$

$$\Psi^{(10)} = \left[ 0 \quad \alpha \quad 0 \quad \alpha + \frac{5\pi}{3} \quad \frac{2\pi}{3} \quad \alpha + \frac{2\pi}{3} \quad 0 \quad \alpha + \pi \quad 0 \quad \alpha + \frac{2\pi}{3} \quad \frac{2\pi}{3} \quad \alpha + \frac{5\pi}{3} \right],$$

$$\Psi^{(11)} = \left[ 0 \quad \alpha \quad 0 \quad \alpha + \frac{\pi}{3} \quad \frac{4\pi}{3} \quad \alpha + \frac{4\pi}{3} \quad 0 \quad \alpha + \pi \quad 0 \quad \alpha + \frac{4\pi}{3} \quad \frac{4\pi}{3} \quad \alpha + \frac{\pi}{3} \right].$$

Блок-схема алгоритма синтеза фазокодированных последовательностей с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции, образующих бесконечное решение вида (9), представлена на рис. 1.

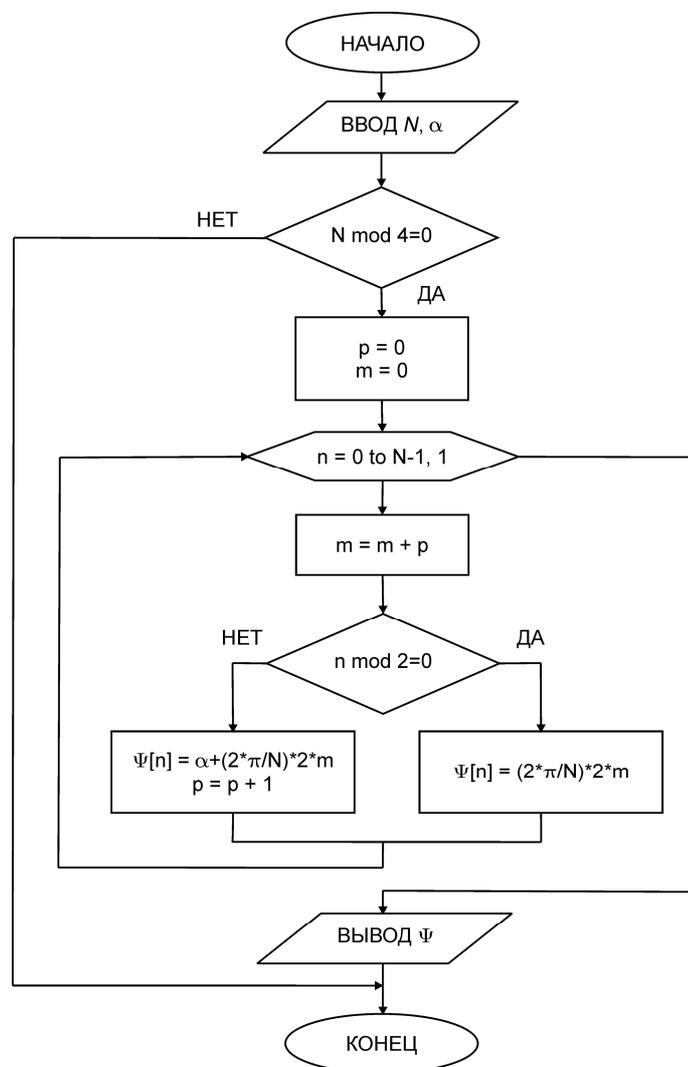


Рис. 1. Блок-схема алгоритма синтеза ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ размерности  $N = 4 \cdot z$ , образующих бесконечное множество кодовых последовательностей

На рис. 2 показано графическое представление ФКП размерности  $N = 12$  при различных значениях угла  $\alpha$  : при  $\alpha = 0^\circ$  ФКП будет иметь вид (рис.2,а)

$$\Psi = [0^\circ \quad 0^\circ \quad 60^\circ \quad 120^\circ \quad 240^\circ \quad 0^\circ \quad 180^\circ \quad 0^\circ \quad 240^\circ \quad 120^\circ \quad 60^\circ \quad 0^\circ],$$

при  $\alpha = 13^\circ$  ФКП будет иметь вид (рис 2,б)

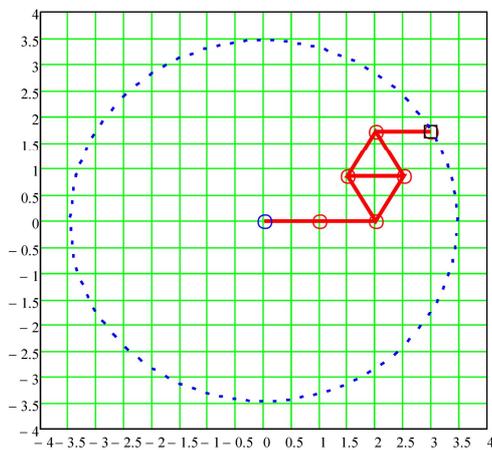
$$\Psi = [0^\circ \quad 13^\circ \quad 60^\circ \quad 133^\circ \quad 240^\circ \quad 13^\circ \quad 180^\circ \quad 13^\circ \quad 240^\circ \quad 133^\circ \quad 60^\circ \quad 13^\circ],$$

при  $\alpha = 47^\circ$  ФКП будет иметь вид (рис 2,в)

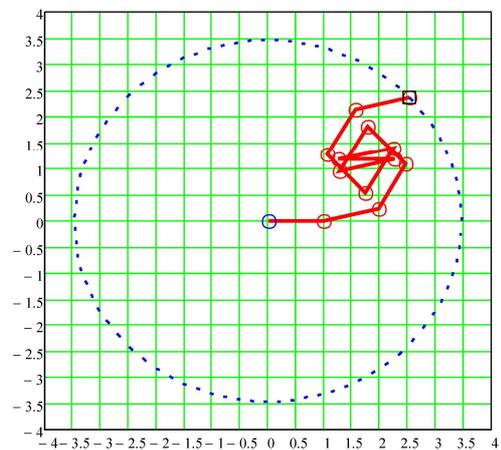
$$\Psi = [0^\circ \quad 47^\circ \quad 60^\circ \quad 167^\circ \quad 240^\circ \quad 47^\circ \quad 180^\circ \quad 47^\circ \quad 240^\circ \quad 167^\circ \quad 60^\circ \quad 47^\circ],$$

при  $\alpha = 95^\circ$  ФКП будет иметь вид (рис 2,г)

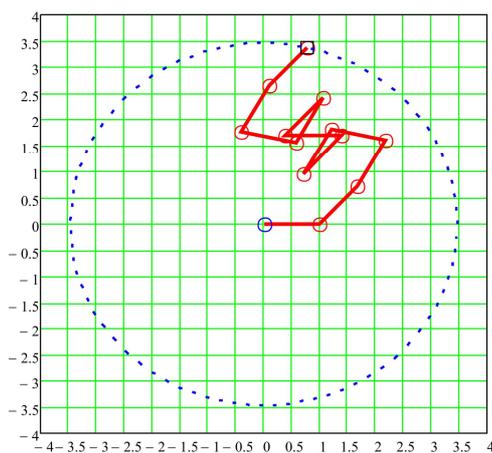
$$\Psi = [0^\circ \quad 95^\circ \quad 60^\circ \quad 215^\circ \quad 240^\circ \quad 95^\circ \quad 180^\circ \quad 95^\circ \quad 240^\circ \quad 215^\circ \quad 60^\circ \quad 95^\circ].$$



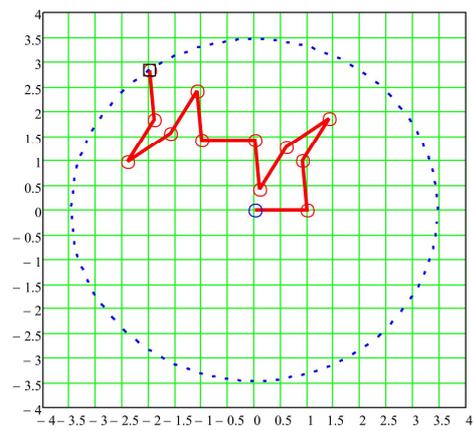
а)



б)



в)



г)

Рис. 2. Графическое представление ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков циклической АКФ размерности  $N = 12$  при различных значениях угла  $\alpha$  :

а)  $\alpha = 0^\circ$  , б)  $\alpha = 13^\circ$  , в)  $\alpha = 47^\circ$  , г)  $\alpha = 95^\circ$

**Заключение.** В работе приводится аналитическое решение задачи синтеза бесконечного множества фазокодированных последовательностей размерности, кратной четырем с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции. В качестве примера рассмотрены ФКП размерностей  $N = 4, 8, 12$ . Приводится блок-схема алгоритма синтеза ФКП с нулевым уровнем боковых лепестков АКФ.

Следует отметить, что хотя для размерностей кода  $N = 4 \cdot z$ , где  $z \in Z$  – любое положительное целое число и существует бесконечное множество решений, задаваемых выражением вида (9), а также бесконечное множество решений, полученных с помощью преобразований (5)–(7), однако, даже в этом случае множество возможных решений не является полным. Существуют другие возможные решения системы уравнений (1)–(2) для  $N = 4 \cdot z$  и уровня боковых лепестков  $a = 0$ .

### Список литературы

1. Woodward, P. M. Probability and Information Theory with Application to Radar / P. M. Woodward. – Permagon Press, N. Y., 1953.
2. Котельников, В. А. Теория потенциальной помехоустойчивости / В. А. Котельников. – М.: Госэнергоиздат, 1956. – 159 с.
3. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М.: 1963.
4. Варакин, Л. Е. Теория сложных сигналов / Л. Е. Варакин. – М.: Сов. Радио, 1970.
5. Свердлик, М. Б. Оптимальные дискретные сигналы / М. Б. Свердлик. – М.: Сов. радио, 1975.
6. Фурман, Я. А. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передреев и др.; Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Физматлит, 2002.
7. Гантмахер, В. Е. Шумоподобные сигналы. Анализ, синтез, обработка / В. Е. Гантмахер. – СПб.: Наука и техника, 2005.
8. Ипатов, В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения / В. П. Ипатов. – М.: Техносфера, 2007.
9. Коробов, Н. М. Тригонометрические суммы и их приложения / Н. М. Коробов. – М.: Наука, 1989.
10. Лидл, Р. Конечные поля: в 2-х томах / Р. Лидл. – М.: Мир, 1988.
11. Галуа, Э. Сочинения / Э. Галуа. – М. – Л.: ОНТИ, 1936.
12. Чеботарев, Н. Г. Основы теории Галуа: в 2-х частях / Н. Г. Чеботарев. – М. – Л.: ОНТИ, 1934.
13. Чеботарев, Н. Г. Теория Галуа / Н. Г. Чеботарев. – М. – Л.: ОНТИ, 1935.
14. Артин, Э. Теория Галуа / Э. Артин. – Киев: Радянська школа, 1963.
15. Постников, М. М. Теория Галуа / М. М. Постников. – М.: Физматлит, 1963. – 218 с.
16. Leukhin, A. N. Algebraic solution of the synthesis problem for coded sequences / A. N. Leukhin // Quantum Electronics. – 2005. – V.35. – № 8. – P. 688 – 692.
17. Леухин, А. Н. Синтез и анализ сложных фазокодированных последовательностей / А. Н. Леухин, А. Ю. Тюкаев, С. А. Бахтин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т.12. – №4. – С. 32–37.
18. Леухин, А. Н. Новые фазокодированные последовательности с хорошими корреляционными характеристиками / А. Н. Леухин, А. Ю. Тюкаев, С. А. Бахтин, Л. Г. Корнилова // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т.12. – №6. – С. 51–54.
19. Леухин, А. Н. Синтез шумоподобных фазокодированных последовательностей / А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия «Физико-математические науки». – 2008. – Том. 150. – кн.2. – С. 38–50.
20. Леухин, А. Н. Полное решение задачи синтеза дискретных фазокодированных сигналов с одноуровневой циклической автокорреляционной функцией / А. Н. Леухин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т.13. – №2–3. – С.48–55.

Статья поступила в редакцию 12.11.08.

---

*N. V. Parsayev, A. N. Leoukhin*

**DISCRETE PHASE-CODED SUCCESSIONS WITH ZERO  
LEVEL OF SIDE LOBES OF CYCLICAL AUTOCORRELATIONAL  
FUNCTION OF THE DIMENSION MULTIPLE OF FOUR**

The method for synthesis of discrete phase-coded successions with zero level of side lobes of cyclical autocorrelational function (ACF) of  $N = 4 \cdot z$  dimensions,  $z \in Z$  being any integer, is given. *The amount of such code successions is shown to be infinite.*

**Key words:** *noise-like signals, discrete phase-coded successions, cyclical autocorrelational function, infinite aggregate of phase-coded successions.*

---

*ЛЕУХИН Анатолий Николаевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры информатики МарГТУ. Область научных интересов: теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор более 150 научных публикаций, в том числе соавтор двух монографий, изданных в главном научном издательстве физико-математической литературы «Физматлит».

*ПАРСАЕВ Николай Владимирович* – аспирант кафедры информатики МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор 10 публикаций.

УДК 621.391.266

*А. А. Рожнецов, В. Н. Дубровин,  
А. А. Баев, А. С. Наумов*

## **ФОРМИРОВАНИЕ 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ТРАНСУРЕТРАЛЬНОЙ РЕЗЕКЦИИ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ\***

*Решена задача формирования трехмерных изображений операционного поля при проведении операций по трансуретральной резекции предстательной железы на основании анализа видеопоследовательностей, получаемых во время проведения операции. Работоспособность полученных алгоритмов проверена на основе анализа реальных изображений и изображений, построенных по трехмерным моделям. Полученные результаты могут быть использованы при построении систем контроля за действиями хирурга во время операции.*

**Ключевые слова:** *трансуретральная резекция, контроль доступа, формирование трехмерных изображений, предстательная железа, информационная поддержка хирурга*

**Введение.** При проведении операций по трансуретральной резекции предстательной железы особую опасность в плане возникновения послеоперационных осложнений представляют последствия повреждения капсулы предстательной железы. Контроль за состоянием капсулы и приближением к ее границам производится хирургом во время проведения операции путем визуального контроля изображения, получаемого от датчика на цистоскопе, а также на основе собственного опыта проведения операции. Использование дополнительных технических средств контроля при проведении операции нежелательно, поскольку это затрудняет действия хирурга, ухудшает обзор операционного поля, может привести к деформации уретры и капсулы предстательной железы, или сопряжено с дополнительной лучевой нагрузкой на пациента. В связи с этим актуальной является проблема создания объективных средств контроля положения рабочих частей резектоскопа для предотвращения повреждений капсулы предстательной железы на основе анализа поступающих из операционного поля изображений. Одной из решаемых при этом задач является формирование трехмерного изображения операционного поля по поступающей видеопоследовательности. Сопоставление получаемых при этом данных с имеющейся цифровой моделью предстательной железы, сформированной на этапе предоперационного обследования, позволяет определять текущее положение резектоскопа и сигнализировать о недопустимом приближении к границе капсулы.

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №07-01-00058, № 08-01-00854-а, № 08-01-12000-офи) и по программе «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/2204).

**Целью работы** является разработка методики формирования трехмерных изображений операционного поля по видеопоследовательностям и проверка ее адекватности получаемых результатов по моделям изображений предстательной железы. Решаемые задачи актуальны также для широкого круга малоинвазивных оперативных вмешательств, проведение которых связано с использованием видеоконтроля.

### 1. Методика формирования 3D изображения операционного поля

Одним из наиболее распространенных методов формирования 3D изображений является метод, базирующийся на анализе стереопарных снимков. Метод основан на измерении смещения координат идентичных точек, называемых сопряженными, в снимках, полученных с разных позиций. В видеопоследовательностях, формируемых датчиком резектоскопа, из-за движения инструмента между соседними кадрами также возникает некоторый сдвиг, обеспечивающий получение стереобазиса.

Для поиска сопряженных точек в стереопарных изображениях используются корреляционные алгоритмы. Для этого в одном изображении, принимаемом в качестве опорного, вокруг каждой точки формируется строб размером  $\Delta x$  на  $\Delta y$  и между отсчетами строка и отсчетами второго изображения вычисляются значения нормированной взаимно корреляционной функции:

$$\eta(x, y, d, b) = \frac{\sum_{n=x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \sum_{m=y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} J_1(n, m) J_2(n+d, m+b)}{\sqrt{\left( \sum_{n=x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \sum_{m=y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} J_1^2(n, m) \right) \left( \sum_{n=x-\Delta x/2}^{x+\Delta x/2} \sum_{m=y-\Delta y/2}^{y+\Delta y/2} J_2^2(n+d, m+b) \right)}}$$

$$x = \Delta x/2, \Delta x/2 + 1, \dots, X - \Delta x/2 - 1,$$

$$y = \Delta y/2, \Delta y/2 + 1, \dots, Y - \Delta y/2 - 1$$

$$d = \Delta x/2, 1, \dots, X - \Delta x/2, \quad b = \Delta y/2, 1, \dots, Y - \Delta y/2,$$

где  $J_1$  и  $J_2$  – отсчеты яркости изображений стереопары,  $X$  и  $Y$  – размеры изображения по горизонтали и вертикали. При горизонтальном перемещении камеры слева направо, как это имеет место в классических методах формирования стереопарных снимков, вертикальный сдвиг  $b$  принимается равным нулю и в качестве оценки величины сдвига сопряженных точек принимается такое значение величины  $d$ , при котором скалярное произведение достигает максимума. При этом координата  $z$  точки в пространстве определяется из соотношения

$$z = B \frac{F}{x_2 - x_1}, \quad (1)$$

где  $B$  – стереобазис,  $F$  – фокусное расстояние оптической системы датчика изображения,  $x_2$  и  $x_1$  – координаты абсцисс сопряженных точек в изображениях.

При анализе кадров видеопоследовательности межкадровые сдвиги могут происходить в произвольных направлениях, поэтому сопряженные точки приходится искать во всех направлениях, относительно точек опорного кадра. Координата  $Z$  точки в пространстве в этом случае определяется из соотношения

$$z = B \frac{F}{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}. \quad (2)$$

На рис.1 приведен пример восстановления по двум соседним кадрам видеопоследовательности трехмерного изображения уретры во время предоперационного осмотра.

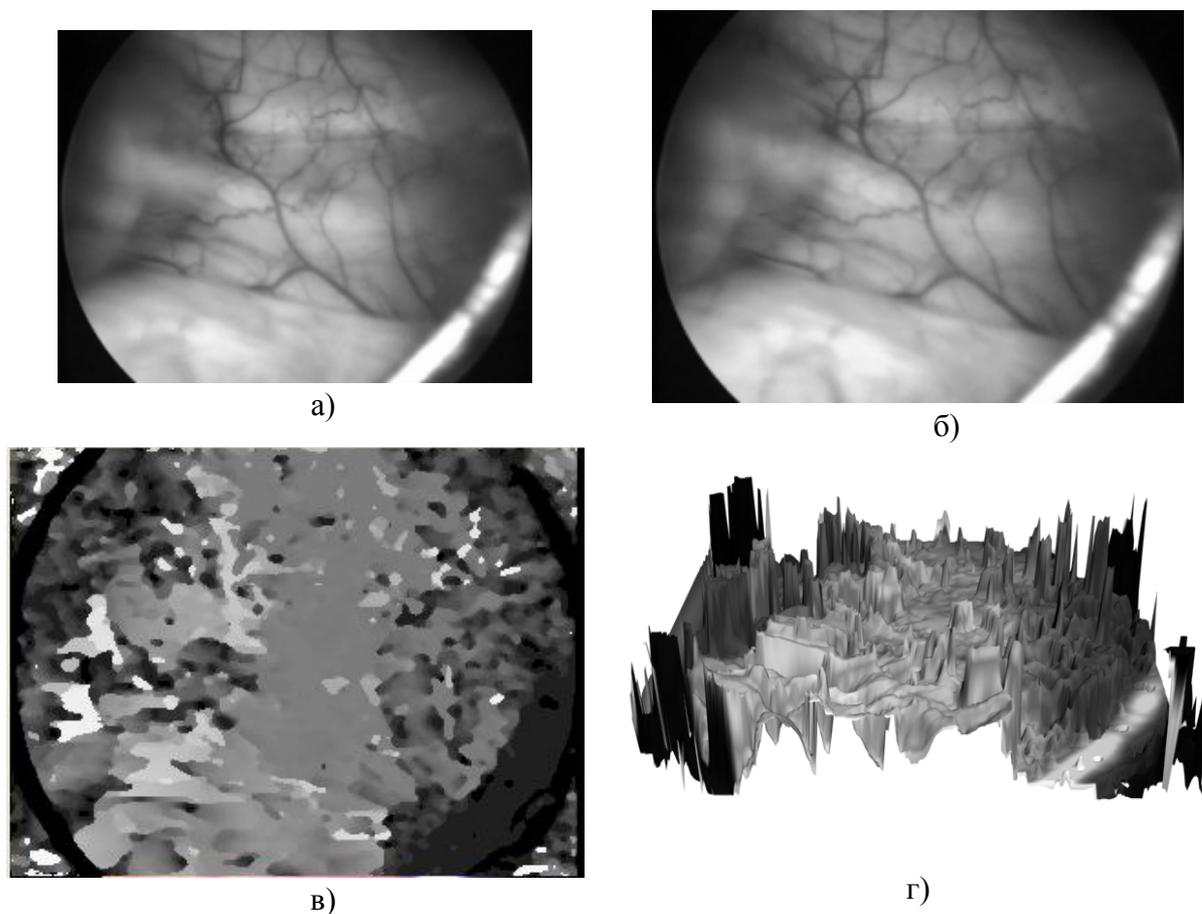


Рис.1. Результат обработки снимков, полученных из видеопоследовательности:  
а, б – исходные снимки, в – карта дальностей, г – трехмерное изображение

Для проверки достоверности получаемых результатов была разработана цифровая трехмерная модель изображений уретры и мочевого пузыря, представленная на рис.2,а. На основе полученной модели были построены карты дальности для ряда положений видеокамеры (рис.2,б). Первая камера обеспечивает боковой обзор и формирование видеопоследовательности при движении камеры вдоль уретры к мочевому пузырю. Вторая камера обеспечивает фронтальный обзор при движении от входа уретры к мочевому пузырю.

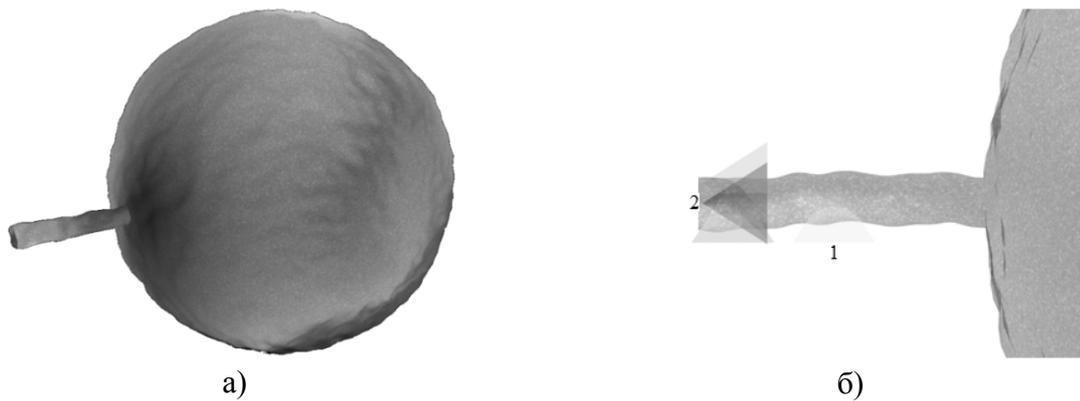


Рис.2. К построению моделей изображений уретры:

а – трехмерная модель уретры и мочевого пузыря, б – положение камер в моделируемых сценах

На рис.3, а, б показаны примеры изображений, получаемых первой камерой при межкадровом сдвиге на 5 мм. На рис.3, в показана эталонная карта дальности, а на рис.3, г – полученная по результатам анализа представленных кадров видеопоследовательности. На рис.4, а, б показаны примеры изображений, получаемых второй камерой при межкадровом сдвиге на 0,1 мм. На рис.4, в показана эталонная карта дальности, а на рис.4, г – полученная по результатам анализа видеопоследовательности.

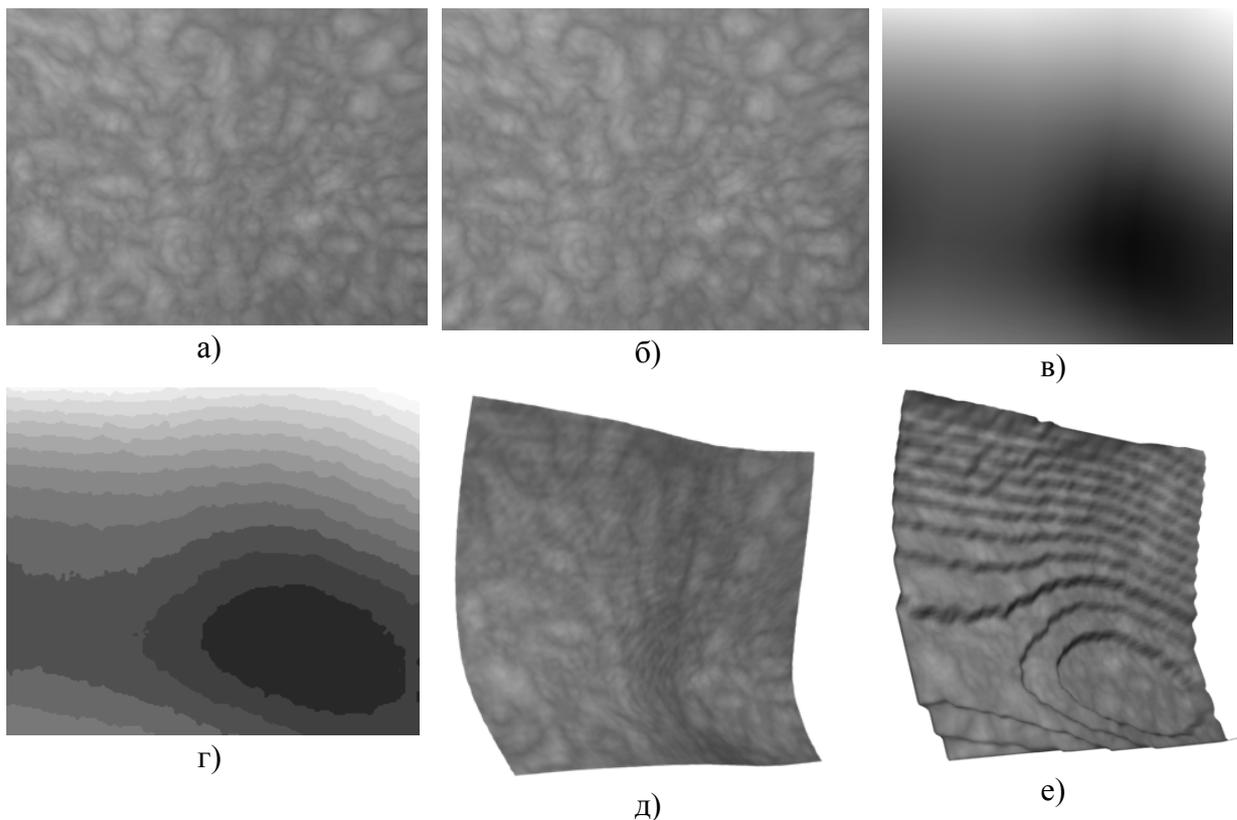


Рис.3. Результаты построения по моделируемым изображениям карты дальности при боковом обзоре: а, б – изображения кадров видеопоследовательности, в – эталонная карта дальности, г – экспериментальная карта дальности, д – модель поверхности стенки уретры, построенная по эталонной карте дальности, е – модель поверхности стенки уретры, построенная по экспериментальной карте дальности

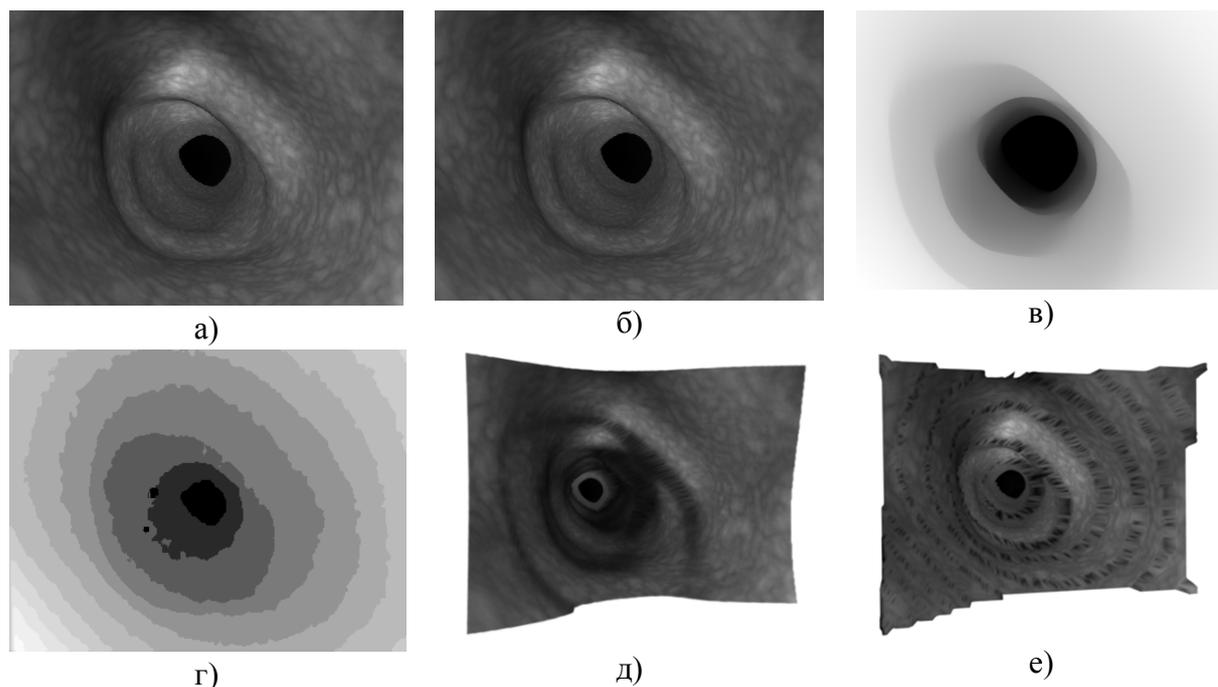


Рис.4. Результаты построения по моделируемым изображениям карты дальности при фронтальном обзоре: а, б – изображения кадров видеопоследовательности, в – эталонная карта дальности, г – экспериментальная карта дальности, д – модель поверхности стенки уретры, построенная по эталонной карте дальности, е – модель поверхности стенки уретры, построенная по экспериментальной карте дальности

Сравнение результатов построения поверхностей по эталонным и экспериментальным картам дальности свидетельствует о высокой достоверности полученных результатов. Коэффициент корреляции между изображениями карт дальности составляет 0,99 для первого тестового изображения и 0,91 для второго тестового изображения. Отклонение от единицы значений коэффициента корреляции обусловлено дискретностью получаемых оценок параллакса сопряженных точек.

**Заключение.** Рассмотрен подход к формированию трехмерных сцен в ходе операций по трансуретральной резекции простаты. Предлагаемый подход базируется на анализе сдвигов фрагментов в соседних кадрах видеопоследовательности, образующих за счет перемещения хирургического инструмента стереопары. На моделях изображений уретры показана высокая степень соответствия получаемых экспериментальных результатов эталонным данным.

#### Список литературы

1. Хорн, Б. К. П. Зрение роботов / Б. К. П. Хорн. – М., 1989.
2. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982.
3. Методы компьютерной обработки изображений / под ред. В. А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2001.
4. Якушенков, Ю. Г. Техническое зрение роботов / Ю. Г. Якушенков. – М.: Машиностроение, 1990. – 272 с.: ил.
5. Юрин, Д. В. Восстановление трехмерных сцен на основе множества изображений, полученных реальными оптическими системами (грант РФФИ, проект №02-01-01063). МФТИ. Долгопрудный.

Статья поступила в редакцию 05.11.08.

*A. A. Rozhentsov, V. N. Doubrovin,  
A. A. Bayev, A. S. Naoumov*

### **3D IMAGE GENERATION AT PROSTATATA GLAND TRANSURETHRAL RESECTION**

*The problem of surgery zone 3D image generation at prostata gland transurethral resection is solved on the basis of the analysis of video sequences obtained during the surgery.*

*The efficiency of the algorithms obtained have been tested against the analysis of real images and those built using 3D models. The results may be used at creating the systems of surgeon activity control during a surgery.*

**Key words:** *gland transurethral resection, access control, 3D image generation, prostata gland, surgeon information support.*

---

*РОЖЕНЦОВ Алексей Аркадьевич* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор более 90 публикаций.

*ДУБРОВИН Василий Николаевич* – доктор медицинских наук, профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – новые методы малоинвазивных урологических операций. Автор более 30 публикаций.

*БАЕВ Алексей Александрович* – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор 7 публикаций.

*НАУМОВ Александр Сергеевич* – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов.

УДК 621.391.266

*А. А. Роженцов, Р. Г. Хафизов,  
И. Л. Егошина, Д. Г. Хафизов*

## ОЦЕНКА ТРУДОЕМКОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ВРАЩЕНИЙ ТРЕХМЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ\*

*Решается задача сравнительной оценки трудоемкости операций определения параметров вращений с использованием матричных преобразований и подходов, базирующихся на кватернионном анализе. Приведены основные аналитические соотношения, необходимые для оценки параметров вращений и определения их трудоемкости.*

*Ключевые слова:* трехмерные объекты, оценка параметров вращений, трудоемкость, матричный анализ, кватернионный анализ.

**Введение.** Задача оценки параметров вращений является одной из актуальных в процессе обработки изображений пространственных объектов. Необходимость ее решения обусловлена тем, что при распознавании 3D изображений в качестве меры схожести нормированных распознаваемого и эталонного векторных сигналов используется их скалярное произведение, являющееся функцией двух переменных: угла  $\Phi$  между этими векторами и степенью схожести (различия) задаваемых векторами изображений. Мера схожести в виде скалярного произведения, характеризующего только степень схожести изображений, получается при повороте одного из изображений на угол  $(-\Phi)$ . Необходимая для этого оценка угла  $\Phi$  достаточно просто вычисляется в том случае, когда векторы сигналов находятся в одной плоскости. Однако такая ситуация имеет место лишь для плоских изображений. Для случая объемных изображений оценка параметров поворота распознаваемого сигнала относительно эталонного сигнала одного из классов алфавита может быть получена при решении обратной задачи вращения поливекторных сигналов. Эта задача сводится к определению параметров вращения, т.е. оси вращения и угла поворота вокруг нее, одного поливекторного сигнала относительно другого. Решение данной задачи возможно как на основе подходов, связанных с матричными преобразованиями, так и на базе кватернионного анализа.

**Целью работы** является проведение сравнительного анализа трудоемкости указанных подходов к оценке параметров вращений трехмерных объектов.

### **1. Оценка параметров вращений из матрицы поворота**

Матрица поворота, задающая вращение в трехмерном пространстве вектора вокруг произвольной оси  $r^T = \{r_x, r_y, r_z\}$  на угол  $\varphi$ , задается в виде [1]:

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №07-01-00058, № 08-01-00854-а) и по программе «Развитие научного потенциала высшей школы» (проект 2.1.2/2204).

$$\mathbf{R}_{r,\varphi} = \begin{bmatrix} r_x^2(1-\cos\varphi) + \cos\varphi & r_x r_y(1-\cos\varphi) - r_z \sin\varphi & r_x r_z(1-\cos\varphi) + r_y \sin\varphi \\ r_x r_y(1-\cos\varphi) + r_z \sin\varphi & r_y^2(1-\cos\varphi) + \cos\varphi & r_y r_z(1-\cos\varphi) - r_x \sin\varphi \\ r_x r_z(1-\cos\varphi) - r_y \sin\varphi & r_y r_z(1-\cos\varphi) + r_x \sin\varphi & r_z^2(1-\cos\varphi) + \cos\varphi \end{bmatrix} \quad (1)$$

Если в эталонной сцене содержится  $k$  отметок с известными координатами

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{0,x} & q_{0,y} & q_{0,z} \\ q_{1,x} & q_{1,y} & q_{1,z} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{k-1,x} & q_{k-1,y} & q_{k-1,z} \end{bmatrix}$$

и имеется повернутая сцена с теми же отметками

$$\mathbf{Q}^{(r)} = \begin{bmatrix} q_{0,x}^{(r)} & q_{0,y}^{(r)} & q_{0,z}^{(r)} \\ q_{1,x}^{(r)} & q_{1,y}^{(r)} & q_{1,z}^{(r)} \\ \dots & \dots & \dots \\ q_{k-1,x}^{(r)} & q_{k-1,y}^{(r)} & q_{k-1,z}^{(r)} \end{bmatrix},$$

то взаимосвязь между ними устанавливается матрицей поворота

$$\mathbf{Q}^{(r)} = \mathbf{Q} \mathbf{R}_{r,\varphi}^T \quad (2)$$

Если сцена содержит три отметки, т.е. размерности матриц  $\mathbf{Q}^{(r)}$ ,  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{R}_{r,\varphi}^T$  совпадают, то из (2) матрица  $\mathbf{R}_{r,\varphi}^T$  выражается следующим образом:

$$\mathbf{R}_{r,\varphi}^T = \mathbf{Q}^{-1} \mathbf{Q}^{(r)} = \begin{bmatrix} R_{0,0} & R_{0,1} & R_{0,2} \\ R_{1,0} & R_{1,1} & R_{1,2} \\ R_{2,0} & R_{2,1} & R_{2,2} \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

Если размерности матриц не совпадают, то матрица  $\mathbf{R}_{r,\varphi}^T$  может быть найдена на основе метода наименьших квадратов [2]:

$$\mathbf{R}_{r,\varphi}^T = (\mathbf{Q}^T \mathbf{Q})^{-1} (\mathbf{Q}^T \mathbf{Q}^{(r)}) = \begin{bmatrix} R_{0,0} & R_{0,1} & R_{0,2} \\ R_{1,0} & R_{1,1} & R_{1,2} \\ R_{2,0} & R_{2,1} & R_{2,2} \end{bmatrix}^T \quad (4)$$

Для оценки параметров вращений необходимо найти элементы матрицы  $\mathbf{R}_{r,\varphi}^T$  и на их основе определить компоненты вектора  $r^T = \{r_x, r_y, r_z\}$  и угол  $\varphi$ .

Для этого необходимо решить систему нелинейных уравнений вида:

$$\begin{bmatrix} r_x^2(1 - \cos \varphi) + \cos \varphi & r_x r_y(1 - \cos \varphi) - r_z \sin \varphi & r_x r_z(1 - \cos \varphi) + r_y \sin \varphi \\ r_x r_y(1 - \cos \varphi) + r_z \sin \varphi & r_y^2(1 - \cos \varphi) + \cos \varphi & r_y r_z(1 - \cos \varphi) - r_x \sin \varphi \\ r_x r_z(1 - \cos \varphi) - r_y \sin \varphi & r_y r_z(1 - \cos \varphi) + r_x \sin \varphi & r_z^2(1 - \cos \varphi) + \cos \varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{0,0} & R_{0,1} & R_{0,2} \\ R_{1,0} & R_{1,1} & R_{1,2} \\ R_{2,0} & R_{2,1} & R_{2,2} \end{bmatrix}$$

Данная система содержит девять уравнений и четыре неизвестных. С учетом особенностей уравнений в данной системе она может быть преобразована к виду:

$$\begin{cases} r_x^2(1 - \cos \varphi) + \cos \varphi + r_y^2(1 - \cos \varphi) + \cos \varphi + r_z^2(1 - \cos \varphi) + \cos \varphi = R_{0,0} + R_{1,1} + R_{2,2} \\ r_x r_y(1 - \cos \varphi) + r_z \sin \varphi + r_x r_y(1 - \cos \varphi) - r_z \sin \varphi = R_{1,0} + R_{0,1} \\ r_x r_z(1 - \cos \varphi) + r_y \sin \varphi + r_x r_z(1 - \cos \varphi) - r_y \sin \varphi = R_{2,0} + R_{0,2} \\ r_y r_z(1 - \cos \varphi) + r_x \sin \varphi + r_y r_z(1 - \cos \varphi) - r_x \sin \varphi = R_{2,1} + R_{1,2} \end{cases}$$

Первое уравнение получено путем суммирования диагональных элементов матриц, а остальные – путем суммирования элементов, расположенных симметрично, относительно главной диагонали матриц. После приведения подобных слагаемых получим следующую систему:

$$\begin{cases} (r_x^2 + r_y^2 + r_z^2)(1 - \cos \varphi) + 3 \cos \varphi = R_{0,0} + R_{1,1} + R_{2,2} \\ 2r_x r_y(1 - \cos \varphi) = R_{1,0} + R_{0,1} \\ 2r_x r_z(1 - \cos \varphi) = R_{2,0} + R_{0,2} \\ 2r_y r_z(1 - \cos \varphi) = R_{2,1} + R_{1,2} \end{cases}$$

Учитывая, что модуль вектора, задающего ось вращения равен единице, и, следовательно  $r_x^2 + r_y^2 + r_z^2 = 1$ , первое уравнение преобразуется к виду  $1 + 2 \cos \varphi = R_{0,0} + R_{1,1} + R_{2,2}$ . Тогда окончательно систему уравнений можно записать как:

$$\begin{cases} 1 + 2 \cos \varphi = R_{0,0} + R_{1,1} + R_{2,2} \\ 2r_x r_y(1 - \cos \varphi) = R_{1,0} + R_{0,1} \\ 2r_x r_z(1 - \cos \varphi) = R_{2,0} + R_{0,2} \\ 2r_y r_z(1 - \cos \varphi) = R_{2,1} + R_{1,2} \end{cases}$$

Данная система имеет следующие решения:

$$\begin{aligned} \varphi &= \pm \arccos \left( \frac{R_{0,0} + R_{1,1} + R_{2,2} - 1}{2} \right), \\ r_z &= \pm \sqrt{-\frac{(R_{1,2} + R_{2,1})(R_{0,2} + R_{2,0})}{(R_{0,0} + R_{1,1} + R_{2,2} - 3)(R_{0,1} + R_{1,0})}}, \\ r_y &= \frac{r_z(R_{0,1} + R_{1,0})}{R_{0,2} + R_{2,0}}, \end{aligned} \quad (5)$$

$$r_x = \frac{R_{0,2} + R_{2,0}}{r_z (R_{0,0} + R_{1,1} + R_{2,2} - 3)}$$

Из-за неоднозначности определения угла  $\varphi$  и компоненты  $r_z$  система имеет два избыточных решения. Для однозначной оценки угла поворота необходимо выполнить совмещение отметок эталонной и наблюдаемой сцен и по наилучшему качеству совмещения определить истинные параметры параметров вращения. Качество совмещения может оцениваться по суммарной величине отклонений отметок:

$$R = \sum_{n=0}^{k-1} \left( \left( q_{n,x}^{(\hat{r})} - q_{n,x}^{(r)} \right)^2 + \left( q_{n,y}^{(\hat{r})} - q_{n,y}^{(r)} \right)^2 + \left( q_{n,z}^{(\hat{r})} - q_{n,z}^{(r)} \right)^2 \right), \quad (6)$$

где  $q_{n,x}^{(\hat{r})}$ ,  $q_{n,y}^{(\hat{r})}$ ,  $q_{n,z}^{(\hat{r})}$  – компоненты повернутых с учетом полученных оценок параметров вращений отсчетов эталонной сцены,  $k$  – количество отсчетов в сцене.

Проверка правильности решений может производиться также непосредственно путем сравнения значений элементов матрицы вращений  $\mathbf{R}$ , полученной в соответствии с (3) или (4) со значениями элементов в матрице  $\hat{\mathbf{R}}$ , полученной путем подстановки найденных значений  $\varphi$ ,  $q_{n,x}^{(\hat{r})}$ ,  $q_{n,y}^{(\hat{r})}$ ,  $q_{n,z}^{(\hat{r})}$  в выражение (1).

## 2. Оценка трудоемкости определения параметров вращений

Результаты определения трудоемкости отдельных операций при оценке параметров вращений с использованием операции совмещения приведены в табл. 1.

В табл.2 и на рис.1 приведены сведения о требуемом количестве элементарных операций в зависимости от количества отсчетов в трехмерной сцене.

Результаты расчета трудоемкости для случая, когда проверка правильности решения системы выполняется на основе анализа матриц вращений, приведены в табл.3, а пример вычисления трудоемкости при различных размерностях – в табл.4.

Т а б л и ц а 2

**Зависимость количества элементарных операций, необходимых для оценки параметров вращений, от количества отметок в сцене**

Количество отсчетов	Количество операций	Количество отсчетов	Количество операций	Количество отсчетов	Количество операций
3	244	13	1004	23	1674
4	401	14	1071	24	1741
5	468	15	1138	25	1808
6	535	16	1205	26	1875
7	602	17	1272	27	1942
8	669	18	1339	28	2009
9	736	19	1406	29	2076
10	803	20	1473	30	2143
11	870	21	1540		
12	937	22	1607		

Т а б л и ц а 1

Операция	Элементарные операции						
	Сложение	Умножение	Деление	Присвоение	Arccos, cos, sin	Корень	Всего
Вычисление матрицы вращений (При $k = 3$ )	18	27					45
Вычисление матрицы вращений (При $k > 3$ )	$18k$	$18k+27$					$36k+27$
Обращение матрицы $3 \times 3$	12	18	15	12			57
Решение системы уравнений	12	5	3		1	1	22
Вычисление матрицы вращений	10	15			2		27
Вращение	$6k$	$9k$					$15k$
Совмещение	$10k$	$6k$					$16k$
Итого (при $k = 3$ )	244						
Итого (при $k > 3$ )	$133+67k$						

Т а б л и ц а 3

Операция	Элементарные операции							Всего
	Сложение	Умножение	Деление	Сравнение	Присвоение	Arccos, cos, sin	Корень	
Вычисление матрицы вращений (При $k = 3$ )	18	27						45
Вычисление матрицы вращений (При $k > 3$ )	$18k$	$18k+27$						$36k+27$
Обращение матрицы $3 \times 3$	12	18	15		12			57
Решение системы уравнений	12	5	3			1	1	22
Вычисление матриц вращений	10	15				2		27
Сравнение матриц вращений				9				9
Итого (при $k = 3$ )								160
Итого (при $k > 3$ )								$36k+142$

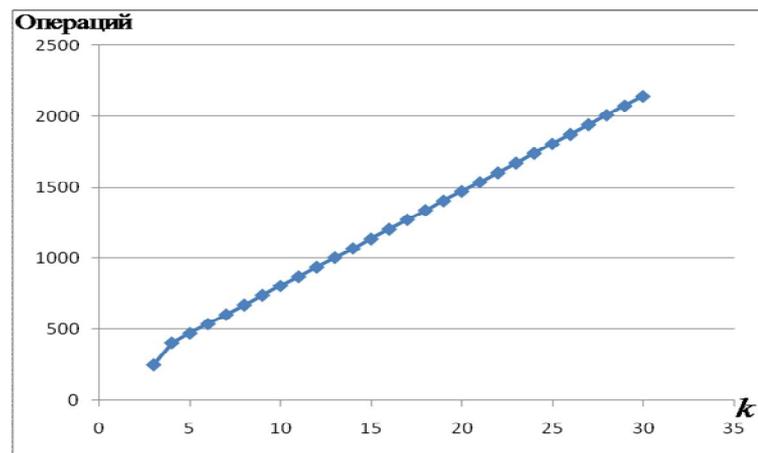


Рис.1. График зависимости количества элементарных операций, необходимых для оценки параметров вращений, от количества отметок в сцене

Т а б л и ц а 4

**Зависимость количества элементарных операций, необходимых для оценки параметров вращений, от количества отметок в сцене**

Количество отсчетов	Количество операций	Количество отсчетов	Количество операций	Количество отсчетов	Количество операций
3	160	13	610	23	970
4	286	14	646	24	1006
5	322	15	682	25	1042
6	358	16	718	26	1078
7	394	17	754	27	1114
8	430	18	790	28	1150
9	466	19	826	29	1186
10	502	20	862	30	1222
11	538	21	898		
12	574	22	934		

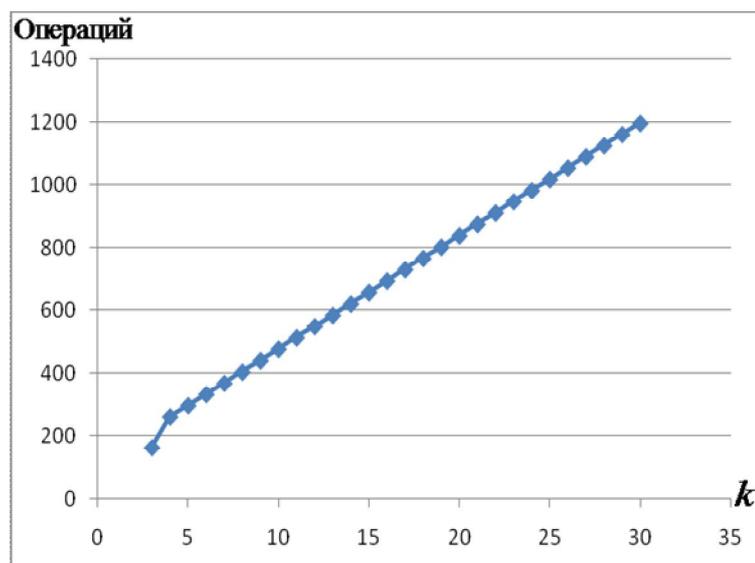


Рис.2. График зависимости количества элементарных операций, необходимых для оценки параметров вращений, от количества отметок в сцене

**3. Расчет трудоемкости решения обратной задачи методами кватернионного анализа**

Решение обратной задачи методами кватернионного анализа сводится к определению скалярного параметра  $2\varphi$  и векторного параметра  $r = r_1 i + r_2 j + r_3 k$  при заданных КТС  $Q$  и  $P$ . Данная задача решается в два этапа [3]. На первом из них определяется направляющий вектор  $r$  оси вращения, а на втором - угол поворота  $2\varphi$ .

Принцип определения направляющего вектора  $r$  основан на равенстве между собой углов между осью конуса и любой его образующей. Поэтому скалярные произведения векторов  $q(n)$  и  $r$  векторов  $p(n)$  и  $r$  в действительном пространстве  $E$  одинаковы. На основании этого можно записать  $(p(n), r)_E = (q(n), r)_E, n = 0, 1, \dots, s - 1$ .

Таким образом, вектор  $r$  может быть получен, из системы двух уравнений, например, для  $n=0, 1$ :

$$\begin{cases} p_1(0)r_1 + p_2(0)r_2 + p_3(0)r_3 = q_1(0)r_1 + q_2(0)r_2 + q_3(0)r_3 \\ p_1(1)r_1 + p_2(1)r_2 + p_3(1)r_3 = q_1(1)r_1 + q_2(1)r_2 + q_3(1)r_3 \end{cases}$$

Положим для определенности, что одна из компонент направляющего вектора  $r$  равна единице, т.е.  $r_1 = 1$ . Тогда, решая систему, получим

$$\begin{aligned} r_2 &= \frac{[p_1(0) - q_1(0)][p_3(1) - q_3(1)] - [p_1(1) - q_1(1)][p_3(0) - q_3(0)]}{[p_2(0) - q_2(0)][p_3(1) - q_3(1)] - [p_2(1) - q_2(1)][p_3(0) - q_3(0)]}; \\ r_3 &= \frac{[p_2(0) - q_2(0)][p_1(1) - q_1(1)] - [p_2(1) - q_2(1)][p_1(0) - q_1(0)]}{[p_2(0) - q_2(0)][p_3(1) - q_3(1)] - [p_2(1) - q_2(1)][p_3(0) - q_3(0)]}. \end{aligned} \tag{7}$$

С учетом нормировки получим

$$r_{norm} = \frac{r_1 i + r_2 j + r_3 k}{\sqrt{1 + r_2^2 + r_3^2}}.$$

Трудоемкость данного шага рассчитаем в числе элементарных операций, исключив повторяющиеся вычисления. Результат определения числа операций для расчета параметров  $r_2$  и  $r_3$  представлен в табл. 5.

Т а б л и ц а 5

Рассчитываемый параметр	Тип операции			
	Сложение/вычитание	Умножение	Деление	Корень квадратный
Числитель $r_2$	5	2		
Знаменатель (общий)	3	2		
Числитель $r_3$	1	2		
$r_2$ и $r_3$			2	
Расчет нормы	2	2		1
Нормировка $r_{norm,1}, r_{norm,2}$ и $r_{norm,3}$			3	
Итого	11	8	5	1

Принцип нахождения угла поворота  $2\varphi$  КТС  $\mathbf{Q}$  вокруг оси с известным, произвольно направленным вектором  $r$ , сводится к решению этой же задачи, но при условии совмещения этого вектора с одной из координатных осей, т.е. к задаче, связанной с элементарными поворотами векторов. При элементарном повороте, например, вокруг оси  $OZ$  на угол  $2\varphi$  вращающий кватернион становится комплексным числом, т.е.  $b_z = \cos \varphi + k \sin \varphi = \exp \{k \varphi\}$ .

Сведем задачу определения угла  $2\varphi$  поворота КТС  $\mathbf{Q}$  вокруг произвольно ориентированной оси к задаче с элементарным поворотом. Для этого найдем нормаль  $n$  к собственной плоскости, образованной осью  $OZ$  и вектором  $r$ . В соответствии со свойствами скалярного произведения векторов, заданных в линейном кватернионном пространстве  $H$ , искомая нормаль  $n = n_1 i + n_2 j + n_3 k$  равна с обратным знаком нормированной гиперкомплексной части скалярного произведения векторов  $r$  и  $k$ , где  $k$  – мнимая единица, отсчитываемая вдоль оси  $OZ$ :

$$n = \frac{-\text{hyp}(r, k)}{|\text{hyp}(r, k)|} = \frac{-\text{hyp}(r_3 - r_2 i + r_1 j)}{|\text{hyp}(r_3 - r_2 i + r_1 j)|} = \frac{r_2 i - r_1 j}{\sqrt{r_2^2 + r_1^2}}. \quad (8)$$

При этом косинус угла  $\beta$  между вектором  $r$  и осью  $OZ$  определяется реальной частью этого скалярного произведения  $\cos \beta = \text{Re}(r, k) = r_3$ .

Вращение вектора  $r$  до совмещения с осью  $OZ$  происходит в собственной плоскости вокруг нормали  $n$  на угол  $\beta$ . Вращающий кватернион  $d$  для выполнения этой операции будет иметь вид  $d = \cos \beta / 2 + n \sin \beta / 2$ .

Чтобы свести задачу определения искомого угла  $2\varphi$  к задаче с элементарными поворотами, поворачиваем сигналы  $\mathbf{Q}$  и  $\mathbf{P}$  вокруг оси  $n$  на угол  $\beta$ . В результате получим соответственно кватернионные сигналы  $\mathbf{T} = \{t(n)\}_{0, s-1}$  и  $\mathbf{W} = \{w(n)\}_{0, s-1}$ :

$$\mathbf{T} = d \mathbf{Q} d^{-1}; \quad \mathbf{W} = d \mathbf{P} d^{-1}.$$

Эти кватернионные сигналы будут повернуты на искомый угол  $2\varphi$ , но уже вокруг оси  $OZ$ . Для определения угла  $2\varphi$  приравняем между собой коэффициенты при мнимых единицах  $i$  и  $j$  для ЭВ  $t(0)$  и  $w(0)$ , получим

$$2\varphi = \arcsin \frac{t_1(0)w_2(0) - t_2(0)w_1(0)}{t_1^2(0) + t_2^2(0)} = \arccos \frac{t_1(0)w_1(0) + t_2(0)w_2(0)}{t_1^2(0) + t_2^2(0)}.$$

Необходимо отметить, что рассмотренная методика не предполагает зашумление повернутого КТС  $\mathbf{P}$ . Реально такая ситуация всегда имеет место при распознавании зашумленных изображений. Такая задача может быть решена путем усреднения полученных для каждой пары ЭВ,  $n = 0, 1, \dots, s-1$ , вычисленных описанным выше способом значений  $2\varphi(n)$  и  $r(n)$ .

Результат определения числа операций для расчета параметров  $r_2$  и  $r_3$  представлен в табл. 6.

Т а б л и ц а 6

Рассчитываемый параметр	Тип операции				
	Сложение / вычитание	Умножение	Деление	Корень квадратный	Тригонометрическая операция
Расчет нормы	1			1	
Нормировка $n_1$			1		
Нормировка $n_2$			1		
Расчет угла $\beta$					1
Расчет вращающего кватерниона $d$		2	1		1
Вращение одного кватерниона	44	72			
Определения угла $2\varphi$	3	4			1
Расчет результирующей оси вращения	2	5			2
Итого	50	83	3	1	5

Итого для оценки параметров вращения по одной паре кватернионов требуется: операций сложения/вычитания – 61, умножений – 91, делений – 8, тригонометрических операций – 5, извлечение квадратного корня – 2.

Всего получаем 167 операций.

Для сигналов размерности  $s$ :

если  $s$  – четное, то  $167*s/2$  операций

если нечетное –  $167*(s-1)/2$  операций.

Результаты расчета трудоемкости для различных размерностей сравниваемых объектов приведены в табл. 7 и на рис. 3.

Т а б л и ц а 7

Размерность	Число операций
2	167
4	334
6	501
8	668
10	835
12	1002
14	1169
30	2505
100	8350

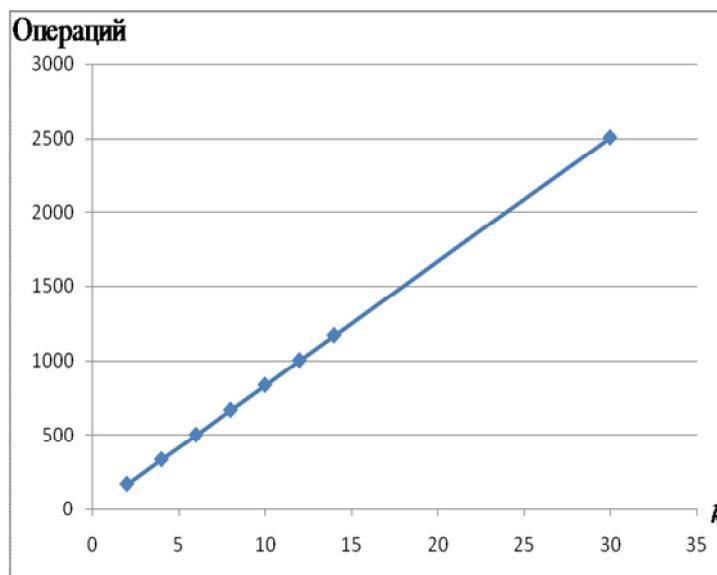


Рис. 3. График зависимости количества элементарных операций, необходимых для оценки параметров вращений, от количества отметок в сцене

**Заключение.** Рассмотрены подходы к решению задачи оценки параметров вращений трехмерных объектов на основе матричных преобразований и на базе методов кватернионного анализа. Приведены основные аналитические соотношения, необходимые для оценки параметров вращений и определения их трудоемкости. Показано, что рассмотренные в работе подходы обладают соизмеримой трудоемкостью при малых размерах объектов.

#### Список литературы

1. Фу, К. Робототехника / К. Фу, Р. Гонсалес, К. Ли; пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 624 с.
2. Тихонов, А. Н. Методы решения некорректных задач / А. Н. Тихонов, В. Я. Арсеньев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1979.
3. Egoshina, I. L. Defining the parameters of quaternion signals rotation / I. L. Egoshina, Ya. A. Furman // 9<sup>th</sup> Int. Conf. on «Pattern Recognition and Image Analysis: New Information Technologies», N. Novgorod, 2008. – Conference Proceedings – Vol. 1. – Pp.116–119.

Статья поступила в редакцию 30.10.08.

*A. A. Rozhentsov, R. G. Khafizov,  
I. L. Yegoshina, D. G. Khafizov*

#### LABOR INTENSITY ASSESSMENT WHEN DEFINING THE ROTATION PARAMETERS OF 3D OBJECTS

*The problem of comparative assessment of labor intensity during the operations of defining the rotation parameters is being solved using matrix transformations and approaches based on quaternion analysis. Main analytical correlations necessary for defining the rotation parameters and their labor intensity assessment are presented.*

**Key words:** 3D objects, defining the rotation parameters, labor intensity, matrix analysis, матричный анализ, quaternion analysis.

*РОЖЕНЦОВ Алексей Аркадьевич* – кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор более 90 публикаций.

*ХАФИЗОВ Ринат Гафиятуллович* – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор более 50 публикаций.

*ЕГОШИНА Ирина Лазаревна* – кандидат технических наук, доцент, зав кафедрой безопасности и информационных технологий Межрегионального открытого социального института. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор более 36 публикаций.

*ХАФИЗОВ Динар Гафиятуллович* – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор более 40 публикаций.

УДК 004.056.55

Д. Ю. Кубашев, А. Н. Леухин

## ПОВЫШЕНИЕ КРИПТОСТОЙКОСТИ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ МЕТОДОМ ГАММИРОВАНИЯ

*Рассматриваются проблемы криптостойкости симметричного шифрования с использованием гаммы. Предложены методы устранения основных недостатков метода гаммирования. Приведены примеры практической реализации рассмотренных методов.*

**Ключевые слова:** симметричное шифрование, повышение криптостойкости шифра простой замены, новый алгоритм гаммирования.

**Введение.** В настоящее время во всём мире используется множество различных методов шифрования. Но ни один из них не обладает идеальными качествами: абсолютной стойкостью к криптоанализу и удобством использования в большинстве случаев.

Рассмотрим подробнее симметрическое шифрование и как частный случай алгоритм ГОСТ 28147–89. Разновидности его режимов используют принцип гаммирования (режимы и гаммирование с обратной связью). Данный стандарт содержит недостатки, присущие всем шифрам гаммирования, такие как нестойкость при повторном использовании ключа и особенности последовательности доступа к информации. Также алгоритм ГОСТ 28147–89 содержит и частные недостатки: наличие избыточной информации в виде синхропосылок и достаточно длинный секретный ключ.

**Целью работы** является представление методики устранения недостатков, присущих алгоритмам шифрования, основанным на методе гаммирования.

Достижение поставленной цели обеспечивается решением следующей **задачи**: выявление необходимых и остаточных правил формирования алгоритмов гаммирования с целью исключения из них недостатков.

Рассмотрим более подробно процесс шифрования методом гаммирования. Шифром [1] гаммирования называется шифр с алфавитом открытых сообщений  $Z_n$ , совпадающим с алфавитом открытых сообщений и ключевым множеством  $K$ . При этом для любого открытого текста  $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_s, \dots\} \in Z_m$  и любых  $k \in K$ .

Зашифрованный текст  $B(A, k) = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_s, \dots\}$

$$b_i = a_i + \psi_1(k) \cdot \text{mod}(m), \quad (1)$$

$$b_i = a_i + \psi_i(a_1, a_2, \dots, a_{i-1}, k) \cdot \text{mod}(m), i = 2, 3, \dots \quad (2)$$

Таким образом, принцип метода заключается в сложении по модулю  $m$  (где  $m$  – мощность алфавита открытых сообщений) открытого текста с некой последовательностью чисел из  $Z_m$  – гаммой, полученной из исходного ключа и предыдущих знаков открытого текста.

Обычно в настоящее время используют  $K = (Z_m)^n$  [2].

Объём ключевой информации ограничивается в данном случае тем, что для шифрования сообщений используется ключ фиксированной длины вне зависимости от длины сообщения. Отсюда очевидным образом следует, что гамма не может быть произвольной последовательностью чисел из  $Z_m$ , а следовательно, речь о «совершенной стойкости» идти не может.

Задача создания качественного шифра заключается в обеспечении следующих свойств [1].

1. Максимальная близость гаммы по статистическим свойствам к случайной равновероятностной последовательности независимых величин (далее по аналогии с термином «белый шум», известным из физики, такую последовательность будем называть «белой гаммой»).

2. Отсутствие возможности практического восстановления неизвестных отрезков гаммы и ключа по известным.

Первое свойство необходимо обеспечивать для невозможности дешифрования шифра гаммирования статистическими методами. Его характеризует в некотором смысле близость конкретного шифра к шифру Вернама. Второе – для того, чтобы по части открытого текста невозможно было восстановить весь или его отрезки.

К достоинствам шифров гаммирования следует отнести следующее: возможность достижения высоких скоростей шифрования; коэффициент размножения ошибки равен единице; поточность шифрования и дешифрования; сохранение размера текста при шифровании.

К недостаткам относятся: нестойкость шифра при повторном использовании ключа; последовательность доступа к информации.

Полученный зашифрованный текст является достаточно трудным для раскрытия в том случае, если гамма шифра не содержит повторяющихся битовых последовательностей. Она должна изменяться случайным образом для каждого шифруемого слова. Фактически же, если период гаммы превышает длину всего зашифрованного текста и неизвестна никакая его часть, то шифр можно раскрыть только прямым перебором. Криптостойкость в этом случае определяется размером ключа.

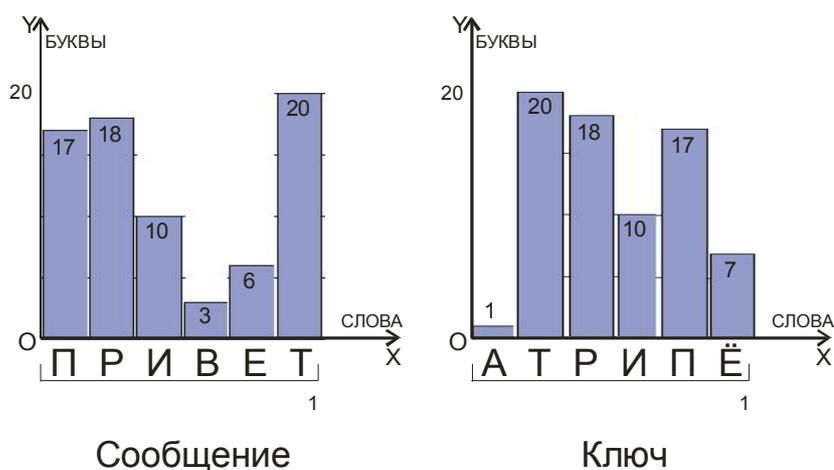


Рис. 1. Использование ключа и сообщения равной длины

На рис. 1 видим, что при наложении гаммы (ключа) в размер слова в шифруемом сообщении изменяется только «амплитуда букв».

Для исключения перечисленных выше недостатков введём два дополнения:

- 1) слово-гамма (ключ) будет не постоянным, а изменяющимся по координатным осям  $OX$  и  $OY$  (см. рис.1), т.е. переменными будут и длина слова, и набор букв в этом слове;
- 2) сообщение, предназначенное для шифрования, перед наложением гаммы будет изменяться в псевдослучайной последовательности по оси  $OY$  (см. рис.2).

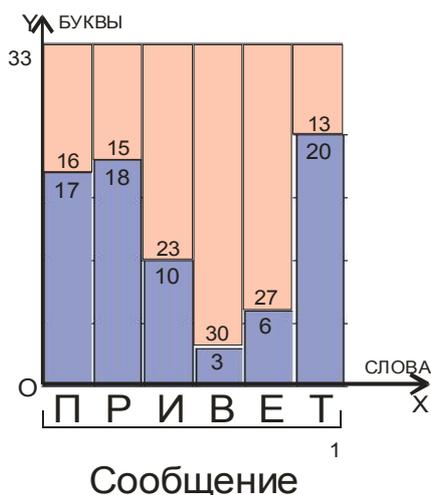


Рис. 2. Значение букв в сообщении относительно максимального значения алфавита

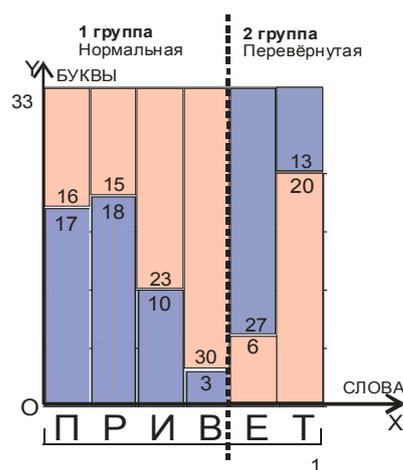


Рис. 3. Процесс предшифрования сообщения

Проведя анализ недостатков подобных систем, обобщим основные правила для формирования алгоритмов гаммирования.

1. К шифрованному сообщению единственным ключом должна быть гамма, применяемая для шифрования, следовательно, вся «ключевая информация» должна содержаться именно в ней.

2. Для достижения наибольшей криптостойкости шифрованное сообщение должно быть приближено к белому шуму, т. е. хаотично. Но т. к. из идеального белого шума невозможно извлечь информацию, то в идеале зашифрованное сообщение должно быть представлено в виде «почти белого шума» или псевдобелого шума.

3. Если для каждого дня и для каждого сеанса связи будет использоваться оригинальный ключ, то это повысит защищённость системы [1].

Для наглядности рассмотрим пример сообщения в виде системы координат (см. рис.1).

Максимальное значение буквы в алфавите равно 33. До наложения гаммы всё сообщение делится на группы. По ходу шифрования часть из выделенных групп будет зеркально отображена, как показано на рис. 3.

Правило, по которому  $n$ -ая группа в сообщении будет нормальной или перевёрнутой, а также ее длина формируется на основе самого текста и ключа (гаммы) по  $\text{mod } (2)$ . Например, необходимо принять решение о производимом действии над следующей группой букв в сообщении. Если соотношение букв предыдущей группы в сообщении и

ключа, вычисленных по  $\text{mod}(2)$ , равно 1, то следующая группа букв в сообщении остаётся в нормальном состоянии, а если 0, то переворачивается (см. рис.3). После того, как первоначальное сообщение изменено по псевдослучайному закону, наложим на него гамму. Для этого предложено для гаммы фиксированной длины использовать её не целиком, а вычитая первые  $n$  букв ( $n$  – число букв предыдущего слова из шифруемого сообщения) (см. рис.4).

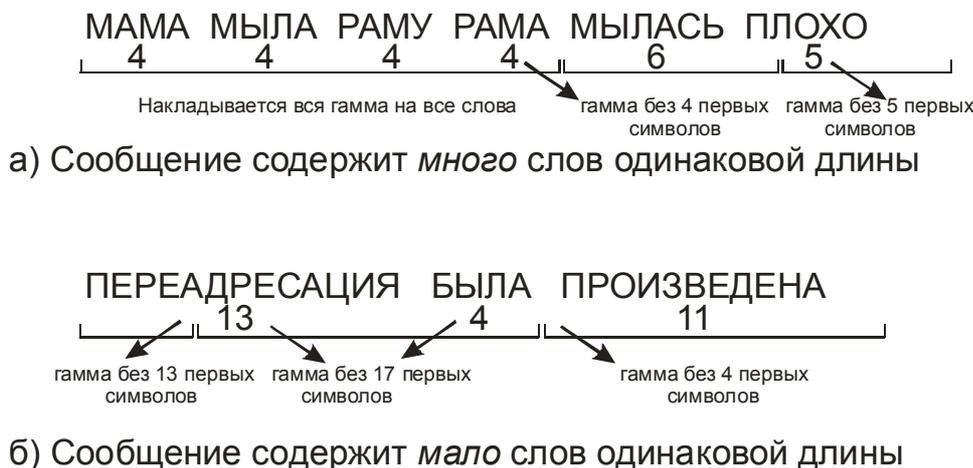


Рис. 4. Использование гаммы фиксированной длины для шифрования сообщения

Известные методы гаммирования с псевдослучайной гаммой [2,4] содержат ряд недостатков, которые удалось исключить применяя методику.

Шифрование с использованием алгоритма ГОСТ 28147–89 методом гаммирования с учётом изменений, введённых оригинальной методикой, будет делиться на предшифрование исходного текста и собственно шифрование подготовленного текста. Предшифрование включает в себя деление открытого текста на части и запись отдельных частей текста в прямом или перевернутом значении.

На основании результата, полученного от предыдущей части открытого текста (группы букв) и ключа по  $\text{mod}(n)$ , получаем следующий отрезок (следующую группу букв).

$$A'_i = (A'_{i-1} [ + ] K) \text{mod}(n), \quad (3)$$

где  $A'_i$  – длина  $i$ -й группы букв;  $i$ -й элемент группы будет иметь значение:

$$A_i = A_{i-1} - x \cdot \alpha, \text{ при } \begin{cases} x = 0, \text{ если } (A_{i-1} + K) \text{mod } 2 = 1 \\ x = 1, \text{ если } (A_{i-1} + K) \text{mod } 2 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

На подготовленный текст накладывается гамма.

$$A = A_i [ + ] K_i \cdot (k - n_{i-1}), \quad (5)$$

где  $K$  – ключ (полная гамма);  $K(k-n)$  – часть гаммы без первых  $n$  символов;  $n$  – количество символов предыдущего слова.

Открытые данные, разбитые на 64-разрядные блоки  $T(i)$ , где  $i = 1, 2, \dots, m$  ( $m$  определяется объёмом шифруемых данных), зашифровываются в режиме гаммирования путём поразрядного сложения по модулю 2 с гаммой шифра ( $\Gamma_{ш}$ ), которая вырабатывается блоками по  $n$  бит.

Уравнение шифрования данных в режиме гаммирования может быть представлено в следующем виде:

$$Ш(i) = A(Y(i-1) + C2, Z(i-1)) \{+\} C1 + T(i) = \Gamma(i) + T(i). \quad (6)$$

В нём  $Ш(i)$  обозначает 64-разрядный блок зашифрованного текста,  $A$  – функцию шифрования в режиме простой замены.  $C1$  и  $C2$  – константы, заданные в ГОСТ 28147–89.

**Выводы.** Предложена методика шифрования, учитывающая присущие симметричному шифрованию с использованием гаммы недостатки. Для их устранения процесс шифрования разделён на два процесса: предшифрование (подготовка передаваемого текста до наложения гаммы) и собственно шифрование. Такой подход поможет защитить закрытую информацию от взлома с помощью статистического криптоанализа и раскрытия информации методом прямого перебора. Шифрование подготовленного текста с помощью наложения гаммы фиксированного размера реализуется с помощью предложенного алгоритма при постоянно изменяющейся длине гаммы и набора букв в этой гамме. В этом случае будет возможно использование одной гаммы в нескольких сеансах связи без снижения криптостойкости метода.

#### Список литературы

1. Введение в криптографию / Под общ. ред. В. В. Ященко. – М.: МЦНМО, «ЧеРо», 1998. – 272 с.
2. Коробейников, А. Г. Математические основы криптологии: Учебное пособие / А. Г. Коробейников, Ю. А. Гатчин. – СПб., 2004. – 108 с.
3. Рябко, Б. Я. Основы современной криптографии для специалистов в информационных технологиях / Б. Я. Рябко, А. И. Фионов. – Ин-т вычислительных технологий СО РАН, Сиб. гос. ун-т телеком. и информатики. – М.: Научный мир, 2004. – 172 с.: ил.
4. Смарт, Н. Криптография / Н. Смарт. – М.: Техносфера, 2005. – 528 с.

Статья поступила в редакцию 10.11.08.

*D. Yu. Koubashev, A. N. Leoukhin*

#### IMPROVEMENT OF INFORMATION TRANSFORMATION CRYPTOGRAPHIC ROBUSTNESS WITH THE GAMMA METHOD

*The issues of cryptographic robustness of symmetric encryption using a gamma are considered. The ways for eliminating major drawbacks of the gamma method are suggested. The examples of practical usage of the methods given are considered.*

**Key words:** *symmetric encryption, improvement of cryptographic robustness of a common substitution cipher, new gamma algorithm.*

*КУБАШЕВ Денис Юрьевич* – аспирант кафедры информатики и системного программирования МарГТУ. Область научных интересов – криптография. Автор двух публикаций.

*ЛЕУХИН Анатолий Николаевич* – доктор физико-математических наук, профессор кафедры информатики МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор более 150 научных публикаций, в том числе соавтор двух монографий, изданных в главном научном издательстве физико-математической литературы «Физматлит».

## ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.316.8

*В. Н. Леухин, А. А. Нагаев, А. В. Андрейкин*

### РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ КОМПЛЕКСА ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ПОДГОНКИ ГРУПП РЕЗИСТОРОВ

*Рассмотрены требования к комплексу электроискровой подгонки при подгонке значительного количества нерегулярно расположенных на подложке пленочных резисторов. Предложена модель комплекса позиционирования измерительных зондов и разрядного электрода, обеспечивающая автоматическое их перемещение по заданным координатам. Произведен кинематический расчет системы.*

***Ключевые слова:** резисторы, наборы резисторов, электроискровая подгонка, измерительные зонды, разрядный электрод, комплекс позиционирования.*

**Введение.** Значительная доля резисторов изготавливается в пленочном исполнении на единой подложке (наборы резисторов типа НР302, Б19, Б20, а также в составе микросборок и гибридных микросхем). Современные требования к показателям точности этих элементов часто требуют корректировки величины их сопротивления, называемой термином «подгонка». Подгонка резисторов может осуществляться с использованием различных методов, чаще всего лазерного, обеспечивающего высокую производительность и точность процесса. Но так как данный метод позволяет только увеличивать сопротивление, то расчетная величина сопротивления должна корректироваться на величину технологического разброса. Например, для толстопленочной технологии при точности воспроизведения номиналов резисторов  $\pm 20\%$  расчетная величина сопротивления должна быть сдвинута на  $-40\%$ . Это приводит к значительному травмированию резисторов при лазерной подгонке.

Развиваемый на кафедре конструирования и производства радиоаппаратуры в течение длительного времени метод электроискровой подгонки обеспечивает двунаправленное изменение величины сопротивления толстопленочных резисторов и позволяет выработать совершенно иные подходы к организации технологического процесса изго-

товления многорезистивных изделий. Ранее [1] были выработаны подходы для подгонки групп резисторов с регулярной структурой, однако в случае значительного их количества, как например, для одного из модулей для телефонных станций, разрабатываемых в научно-исследовательском институте систем коммутации и автоматики (НИИСКА, г. Уфа), где содержится 22 резистора на подложке размером 21x38 мм, задача существенно усложняется. При этом на мультиплицированной подложке содержится шесть одинаковых модулей (рис. 1). Резисторы на рисунке имеют темный цвет.

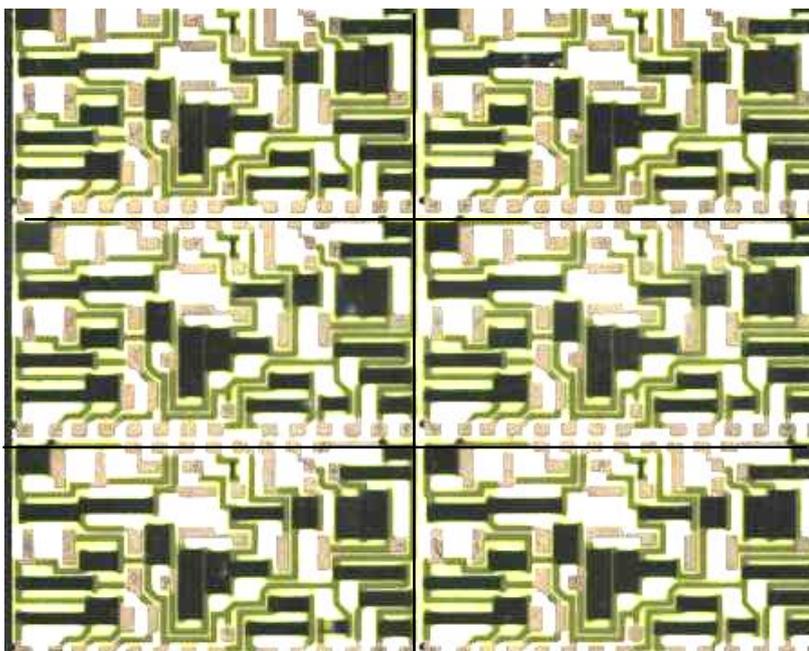


Рис. 1. Мультиплицированная подложка модуля электронного коммутатора

**Целью работы** является разработка комплекса позиционирования для реализации электроискровой подгонки групп резисторов, обеспечивающего высокую переналаживаемость и производительность процесса.

**Решаемые задачи, направленные на достижение цели.** Для реализации процесса электроискровой подгонки групп резисторов, принципы и особенности которой достаточно широко изложены в работах [2–5], необходимо наличие следующих элементов:

- 1) контактное устройство, обеспечивающее фиксацию подложки и подключение подгоняемого резистора (резисторов);
- 2) воздействующий комплекс в виде источника высоковольтных импульсов и разрядного электрода;
- 3) измерительный комплекс для непосредственного измерения величины сопротивления или сравнения величин подгоняемого и эталонного резисторов;
- 4) блок управления, обеспечивающий взаимодействие всех элементов системы.

Можно определить два направления построения устройств групповой подгонки: полностью многоканальная система и коммутируемая система.

Исходя из того, что система в целом должна быть универсальна, т. е. обладать большой гибкостью, необходимо наличие таких средств, пользуясь которыми стала бы возможной подгонка любых микронных узлов на подложке. Этому требованию

при большом количестве резисторов и частой смене конструкций подложек отвечает коммутируемая система.

В соответствии с поставленной целью необходимо обеспечить автоматический контроль величины сопротивления и расположение разрядных электродов над резисторами в случае подгонки групп резисторов на подложке.

В этом случае необходимо рассмотреть, какими средствами возможно перемещать три независимых зонда (два измерительных и один разрядный) в пространстве.

Для перемещения зондов можно использовать линейные двигатели, но в этом случае необходимо использовать сложную систему автоматической коррекции положения, чтобы получить необходимую точность позиционирования. Аналогичная ситуация возникает с электродвигателями вращательного типа. Большой момент трогания и момент инерции приводят к большой погрешности перемещения. Поэтому такие системы требуют дорогостоящего оборудования контроля перемещения. Их преимуществом является большая мощность, что позволяет перемещать объекты большой массы.

Существуют также системы позиционирования, построенные на основе пьезоэлементов. Эти системы обладают высокой точностью, но их недостатком является малое расстояние перемещения, измеряемое единицами миллиметров.

Наиболее подходящим для решения данной задачи является шаговый двигатель. Его преимущество – высокая точность обработки шага, а также возможность управления цифровым сигналом, что также увеличивает точность.

При построении модели позиционирования были рассмотрены различные варианты перемещения с помощью шаговых двигателей. Было выявлено два наиболее подходящих варианта, которые построены по принципу винтового соединения.

Первый вариант заключается в том, что к двигателю прикрепляется вал с резьбой. В резьбу вала вставляется головка или возможна установка каретки с внутренней резьбой (гайка). Таким образом, если вал имеет правую резьбу, то при повороте его по часовой стрелке каретка будет приближаться, а при повороте против часовой стрелки удаляться.

Во втором варианте также применен вал с резьбой. Но он отличается тем, что для перемещения по двум осям пространства применяются два вала, между которыми помещается шарик («шариково-винтовая пара»). Подобные элементы привода обеспечивают высокую точность позиционирования (не хуже  $\pm 25$  мкм) и высокую скорость перемещения, но этот вариант не подходит для решения нашей задачи, так как перекрещенные валы будут мешать перемещению электродов. Решить эту проблему можно разнесением их по вертикальной координате. Но это приведет к увеличению габаритных показателей, а также пути вертикального перемещения. Поэтому было принято решение использовать первый вариант для построения системы перемещения.

На рис. 2 представлена модель системы позиционирования. На основании укреплены основные составляющие комплекса. Это неподвижные направляющие, по которым осуществляется вертикальное перемещение. Так же на основание закреплены направляющие для установки блока установки микросборки. На неподвижных направляющих размещены горизонтальные рамы, на которых в свою очередь установлены каретки с шаговыми двигателями, которые перемещаются по оси X. Перемещение происходит по принципу винта. К шаговому двигателю прикрепляется вал с резьбой. На этот вал и

вспомогательную направляющую устанавливается каретка, имеющая внутреннюю резьбу. Вспомогательная направляющая предотвращает вращение каретки. Таким образом, между кареткой и валом с резьбой образуется винтовое соединение. В результате поворота вала происходит перемещение каретки, соответствующее направлению поворота. На эту каретку устанавливается еще один шаговый двигатель, к которому аналогично прикреплен вал с резьбой. На этот вал и вспомогательную направляющую устанавливается зонд. Перемещение осуществляется аналогичным образом.

Для разрядного электрода горизонтальная рама установлена выше. Это позволяет перемещать электрод независимо от двух других и устанавливать его в нужное положение после процесса измерения.

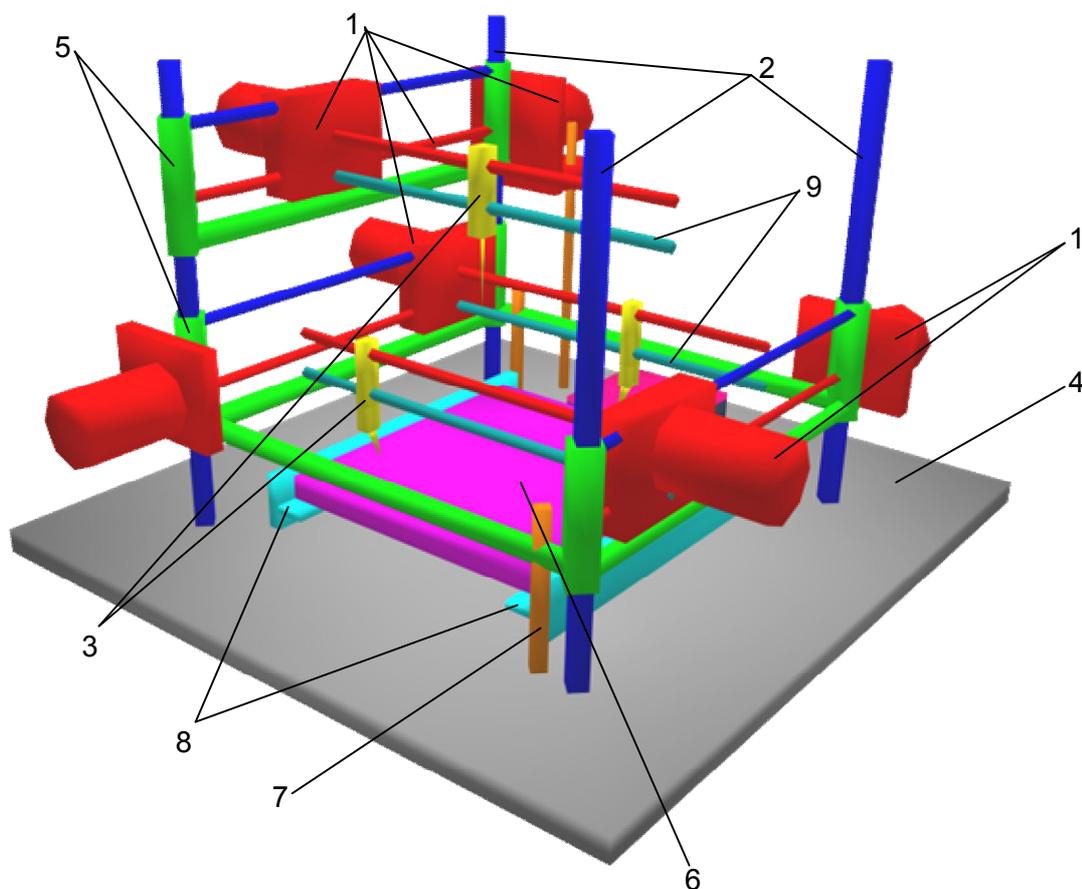


Рис. 2. Вариант системы позиционирования

- |  |  |
|--|--|
|  | 1 – двигатели и подвижные части, перемещаемые непосредственно ими; |
|  | 2 – неподвижные направляющие;                                      |
|  | 3 – перемещаемые электроды;  |
|  | 4 – основание;   |
|  | 5 – основания, предназначенные для перемещения по оси Z;           |
|  | 6 – модуль для установки подложки;                                 |
|  | 7 – подвижная часть для перемещения по оси Z;                      |
|  | 8 – направляющие для модуля установки подложки;                    |
|  | 9 – неподвижные части для перемещения электродов.                  |

Создание макета показало, что система для последнего метода оказывается довольно сложной, но для лабораторных исследований и мелкосерийного производства оказывается незаменимой. Система также имеет более низкие показатели по скорости подгонки резисторов. Но помимо гибкости системы и способности быстро настраиваться на различные узлы, устройство также открывает пути к функциональной подгонке. Она позволяет настраивать узел (устройство) в эксплуатационном режиме (с временным отключением эксплуатационных сигналов).

**Расчет элементов привода.** Для разработки устройства управления комплексом позиционирования необходимо определить некоторые конструктивные параметры для дальнейшей разработки схем управления и программного обеспечения. Основными элементами являются ходовой винт и шаговый двигатель.

Исходными данными для расчета ходового винта являются:

- тяговое усилие  $Q=0,150$  кгс,
- наружный диаметр винта  $d=8$  мм= $0,8$  см,
- средний диаметр ходового винта  $d_2=7$  мм= $0,7$  см,
- внутренний диаметр ходового винта  $d_1=5,5$  мм= $0,55$  см,
- шаг винтовой линии  $S=2$  мм= $0,2$  см,
- число заходов резьбы – 1 заход,
- длина гайки  $10$  мм= $1$  см,
- длина ходового винта  $150$  мм= $15$  см,
- резьба ходового винта – трапециидальная,
- гайка бронзовая Бр0ф10-1 ( $\sigma_{пр}=20$  кг/см).

1) Определим угол подъема винтовой линии

$$\operatorname{tg}\beta = \frac{S}{\pi \cdot d_2} = \frac{0,2}{3,14 \cdot 0,7} = 0,091,$$

где  $\beta=5^\circ 11'$ .

2) Определим КПД передачи

$$\eta = \frac{\operatorname{tg}\beta}{\operatorname{tg}(\beta + \rho)},$$

где  $\rho=6^\circ$  – угол трения выбирается из таблицы [6].

$$\eta = \frac{0,091}{\operatorname{tg}(11^\circ 11')} = \frac{0,091}{0,1977} = 0,46.$$

3) Рассчитываем начальную площадь сечения ходового винта

$$F=0,785 \cdot d_1^2=0,785 \cdot 0,55^2=0,2375 \text{ см}^2.$$

4) Приведенная напряженность ходового винта

$$\sigma_{1_{np}} = \frac{Q}{F} \cdot \sqrt{1 + 1,6 \cdot \left( \frac{S}{\eta \cdot d} \right)^2} = \frac{0,15}{0,2375} \cdot \sqrt{1 + 1,6 \cdot \left( \frac{0,2}{0,46 \cdot 0,8} \right)^2} = 0,7663 \text{ кг/см}^2.$$

5) Допустимая напряженность в материале

$$[\sigma_{\sigma}] = \frac{\sigma_{np}}{K} = \frac{20}{3,5} = 5,71 \text{ кг/см}^2,$$

где К – коэффициент надежности выбирается из таблицы [6].

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что  $\sigma_{1_{np}} \ll [\sigma_{\sigma}]$ , а следовательно, ходовой винт нагрузку в 0,150 кгс выдержит.

Произведем расчет ходового винта на устойчивость.

1) Расчетный момент инерции ходового винта

$$J_{pac} = 0,01 \cdot \frac{3 \cdot d}{d_2} \cdot d_1^4 = \frac{0,01 \cdot 3 \cdot 0,8 \cdot 0,55^4}{0,7} = 0,00313 \text{ см}^4.$$

2) Расчет запаса устойчивости

$$n_y = m \cdot \frac{E \cdot J_{pac}}{Q \cdot l^2},$$

где  $E = 20 \cdot 10^6$  кгс/см – модуль упругости материала ходового винта;  $m = 40$  коэффициент закрепления винта в опоре.

$$n_y = 40 \cdot \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 0,00313}{0,15 \cdot 18^2} = 92,7 \cdot 10^3.$$

Из расчетов видно, что такое кинематическое решение для данной задачи имеет большую надежность.

Для выбора двигателя важно знать крутящий момент. Он определяется по следующей формуле:

$$M_{кр} = Q \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \text{tg}(\beta + \rho) = 0,15 \cdot \frac{0,7}{2} \cdot 0,1977 = 0,01 \text{ кг} \cdot \text{см}.$$

Для уменьшения крутящего момента для двигателя можно использовать приведенную на рис. 3 кинематическую схему.

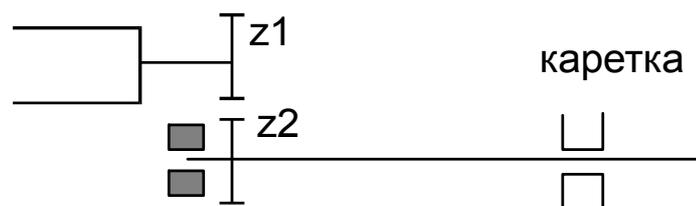


Рис. 3. Кинематическая схема для понижения крутящего момента на двигателе

$$M_{крд} = M_{кр.хв} \cdot \frac{z1}{z2} = 0,01 \cdot \frac{20}{40} = 0,005 \text{ кг} \cdot \text{см} ,$$

где  $z1$  и  $z2$  – передаточные числа зубчатых колес.

На основе вышеперечисленных требований был выбран двигатель ДШ-48, основные характеристики которого представлены в таблице.

**Параметры шагового двигателя ДШ-48**

Напряжение питания, В	Номинальный вращающий момент, Н*м	Максимальный статический момент, Н*м	Потребляемый ток, А	Номинальный шаг, град.	Масса не более, кг
15	0,006	0,034	0,2	1,8	0,08

Номинальный вращающий момент  $0,02 \text{ Н} \cdot \text{м} = 0,6 \text{ кг} \cdot \text{см}$ , что обеспечивает достаточный запас по вращающему моменту. Так как угол поворота двигателя на один шаг составляет  $1,8^\circ$ , то точность позиционирования составит:

$$d = S * 1,8^\circ / 360^\circ = 2 \text{ мм} \cdot 1,8^\circ / 360^\circ = 0,01 \text{ мм} = 10 \text{ мкм}.$$

По требованиям к изготовлению пленочных резисторов [7], минимальный размер контактной площадки составляет  $0,2 \times 0,2 \text{ мм}$ . Таким образом, предложенная модель обеспечивает необходимую точность позиционирования.

**Выводы.** Предложена модель позиционирования измерительных зондов и разрядного электрода для электроискровой подгонки групп резисторов на подложке в случае их нерегулярного расположения. Произведены необходимые расчеты кинематической схемы, подтверждающие ее надежность и устойчивость, а также предъявляемые требования к шаговому двигателю.

### Список литературы

1. Леухин, В. Н. Особенности корректировки групп резисторов электроискровым методом / В. Н. Леухин, А. Е. Саяркин // Сборник статей студентов, аспирантов и докторантов по итогам научно-технических конференций МарГТУ в 2003 г. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. – С. 171-176.
2. Леухин, В. Н. Техника и технология электроискровой обработки элементов и узлов РЭА / В. Н. Леухин // Тр. науч. конф. по итогам н.-и. работ Мар. техн. ун-та. Мар. гос. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2001. – С. 97-109. Деп. в ВИНТИ 21.03.02 № 515-В 2002.
3. Леухин, В. Н. Основные закономерности процесса электроискровой подгонки резисторов / В. Н. Леухин, А. М. Сухов // Тр. науч. конф. по итогам н.-и. работ Мар. техн. ун-та. Йошкар-Ола, 25 марта 1999 / Мар. гос. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 1999. – С. 15-26. Деп. в ВИНТИ 28.10.99 № 3205В99.
4. Леухин, В. Н. Установка электроискровой подгонки резисторов «Искра-5М» / В. Н. Леухин, А. М. Сухов // Инф. лист. №19-00 Марийский ЦНТИ, 2000 г.
5. А.св. № 1760895. Устройство для подгонки сопротивления толстопленочных резисторов на подложке / В. Н. Леухин и др.
6. Конструирование механизмов РЭА: Методические указания к выполнению курсового проекта для студентов специальности 0705 / Сост. Рябов В. И. – Йошкар-Ола: МПИ, 1985. – 46 с.
7. Зайцев, Ю. В. Резисторные и конденсаторные микросборки / Ю. В. Зайцев, А. Т. Самсонов, Н. М. Решетников. – М.: Радио и связь, 1991. – 200 с.

Статья поступила в редакцию 17.11.08.

V. N. Leoukhin, A. A. Nagayev, A. V. Andreykin

**MODEL DEVELOPMENT OF POSITIONING COMPLEX FOR ELECTRIC SPARK FITTING OF RESISTOR GROUPS**

*The requirements for the complex for electric spark fitting of a significant number of film resistors irregularly placed on the substrate are considered. A model of the complex for positioning measuring probes and a discharge electrode, enabling their automatic movement along the coordinates set, is suggested. Kinematic calculation of the system has been accomplished.*

**Key words:** resistors, sets of resistors, electric spark fitting, measuring probes, discharge electrode, positioning complex.

---

*ЛЕУХИН Владимир Николаевич* – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и проектирования радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – электроискровая подгонка резисторов; техническая диагностика силовых трансформаторов методами высокочастотного зондирования; технология монтажа на поверхность. Автор 58 публикаций.

*НАГАЕВ Александр Андреевич* – ОАО «Марийский машиностроительный завод», регулировщик радиоэлектронной аппаратуры и приборов. Область научных интересов – электроискровая подгонка резисторов. Автор трех публикаций.

*АНДРЕЙКИН Александр Васильевич* – аспирант кафедры конструирования и проектирования МарГТУ. Область научных интересов – электроискровая подгонка резисторов. Автор трех публикаций.

УДК 621.049.77-213:621.193

О. Н. Афионов

## УСТОЙЧИВОСТЬ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ КОРПУСОВ К КЛИМАТИЧЕСКИМ ФАКТОРАМ

*Решена задача идентификации природы и механизмов электрохимической коррозии спаев корпусов при дестабилизирующем воздействии внутренних и внешних физико-химических факторов. Был проведен системный анализ причинно-следственных связей между физической структурой металлокерамических спаев и физико-химическими факторами активации электрохимической коррозии корпусов интегральных схем.*

**Ключевые слова:** микросхемы, корпуса, металлокерамика, коррозия, климат, испытания.

**Введение.** Металлокерамические корпуса (МКК), как средство защиты интегральных схем (ИС) от внешних воздействий, получили широкое распространение в микроэлектронике, что обусловлено такими присущими им параметрами качества, как высокая степень герметичности, удобство монтажа и применения, прочность, жесткость конструкции и т. д. Однако по мере развития микроэлектроники отдельные их показатели перестали удовлетворять требованиям производства, в частности, это относится к коррозионной стойкости, ухудшение которой проявляется в том, что при климатических воздействиях с подачей электрической нагрузки фиксируются отказы микроэлектронной аппаратуры из-за увеличения токов утечки в МКК за пределы поля допуска. Практика показала, что в процессе эксплуатации между металлокерамическими спаями выводов на поверхности керамического тела корпусов ИС образуются токопроводящие дендритные переемычки, шунтирующие электрические цепи микросхем и вызывающие сбои или отказы изделий. Кроме дендритных переемычек, наблюдаются и продукты коррозии каплеобразной формы различных цветов, локализованные в периферийных частях по периметру металлокерамических спаев, определяющие как дефекты МКК по внешнему виду, так и снижение защитных свойств лакокрасочных покрытий изделий.

Известные теоретические и экспериментальные исследования коррозии МКК были в основном направлены на анализ воздействия внешних дестабилизирующих физико-химических факторов. Имеющиеся в литературе сведения о коррозионных процессах в металлокерамических спаях МКК неполны и отрывочны. В связи с этим актуально комплексное исследование как природы и механизмов коррозионной деградации МКК, так и установление причинно-следственных связей между конструктивно-технологическими факторами и параметрами физической структуры металлокерамических спаев корпусов, непосредственно связанных с их коррозионной стойкостью.

**Целью** исследования является выявление доминирующих физико-химических факторов активации коррозионных процессов в металлокерамических спаях МКК, определяющих зависимость коррозионной стойкости МКК от конструктивно-технологических особенностей их формирования.

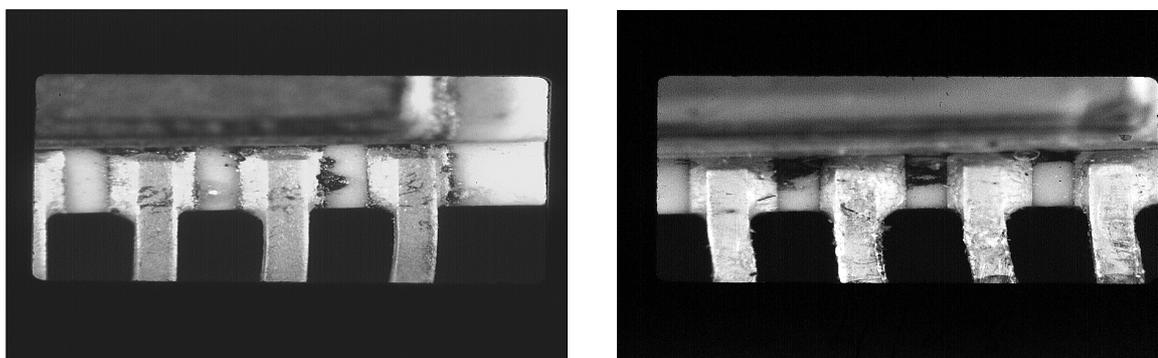
Известно, что только установление причин коррозионного процесса позволяет правильно выбрать методы совершенствования защиты и повышения коррозионной стойкости материалов и изделий.

**Методика исследования.** *Визуально-оптический контроль* прокорродировавших в результате испытаний спаев корпусов показал, что независимо от указанных выше разновидностей продуктов коррозии (дендритные перемычки, объемные образования каплеобразной формы различных оттенков), особенность исследуемых коррозионных процессов состоит в том, что коррозия сосредотачивается на весьма ограниченной площади и коррозионная деградация носит ярко выраженный локальный характер (рис. 1.).

*Рентгеноспектральный анализ*, проведенный на микроанализаторе электронного микроскопа JSM-35, выявил, что в продуктах коррозии спаев корпусов (из керамики ВК91-2) зеленого и коричневого цвета содержатся элементы – вольфрам, медь, железо, никель, кобальт, серебро, хлор, калий, причем в продуктах коричневого цвета обнаружено заметно большее содержание железа.

В составе дендритных перемычек обнаружен тот же набор элементов: медь, никель, железо, серебро, вольфрам, хлор, калий (элементы в обоих типах продуктов указаны в порядке убывания содержания).

Результаты анализа показывают, что коррозионная деградация происходит во всех металлических компонентах металлокерамических спаев, за исключением золотого покрытия.



(а)

(б)

*Рис.1. Продукты коррозии металлокерамических спаев корпусов ИС с лаковыми покрытиями:  
а – продукты коррозии каплеобразной формы зеленого и коричневого цвета на спаях выводов;  
б – дендритные перемычки черного цвета между спаями*

Сравнительный анализ информации [1], имеющейся о процессах электролитической миграции (с последующим дендритообразованием) и питтинговой коррозии, показал, что все экспериментально обнаруженные внутренние и внешние факторы, признаки, общие закономерности, условия возникновения и протекания процесса дендритообразования целиком и полностью совпадают с подобными же сведениями о питтинговой коррозии. Таким образом, вполне обоснованно можно предположить, что в основе механизма зарождения и протекания процесса дендритообразования лежит питтинговая коррозия. Однако набор экспериментальных данных, полученных исследователями процесса дендритообразования, является неполным и не позволяет без дополнительных

«решающих» экспериментов однозначно идентифицировать природу возникновения дендритов. В частности, исследователями не обнаружен один из основных обобщенных информативных признаков, характеризующий питтинговую коррозию – функционирование на металлических поверхностях анодов активно-пассивных коррозионных элементов, в результате работы которых возникают аperiodические колебания скорости коррозии.

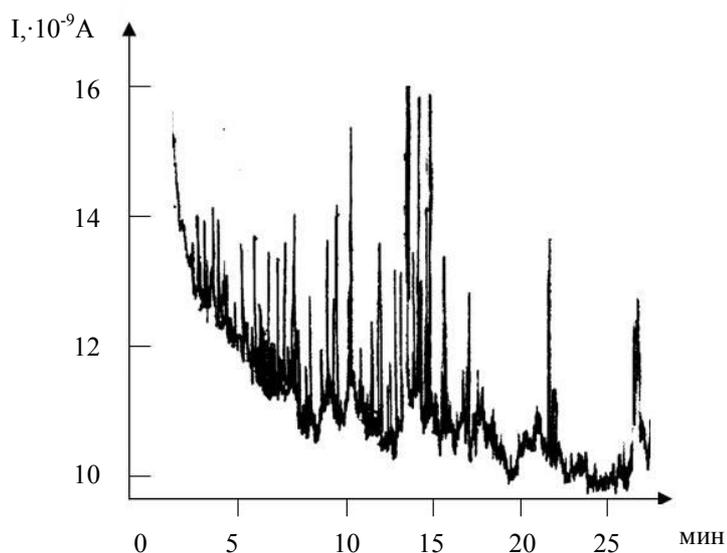


Рис. 2. Потенциостатическая кривая зависимости тока утечки ( $I$ ) между двумя соседними спаями выводов корпуса от времени испытания ( $t$ ). Постоянное напряжение между выводами 50 В

Для экспериментального подтверждения рабочей гипотезы о питтинговой природе процесса дендритообразования были проведены электрохимические испытания корпусов с применением потенциостатического метода. В соответствии с принятым методом на соседние спаи выводов подавали стабилизированное напряжение 50 В, корпуса помещали в климатическую камеру с относительной влажностью 98% и регистрировали зависимость тока утечки по поверхности керамики между спаями от времени испытаний. Полученная экспериментальная кривая (рис.2.) является сложной функцией, непрерывно меняющейся во времени. Сравнительный анализ внешнего вида экспериментальной кривой показал, что она полностью аналогична кривой, характерной для питтинговой коррозии [2]. Как уже указывалось, потенциостатические кривые при питтинговой коррозии отличаются от кривых при всех других видах коррозии характерными аperiodическими колебаниями тока анодного растворения, связанными с точечными пробоями пассивной пленки на поверхности анода. Поэтому появление подобных колебаний на экспериментальной кривой может служить достоверным признаком питтинговой коррозии металлокерамических спаев корпусов.

В свою очередь, питтинговая природа образования каплеобразных продуктов коррозии спаев с достаточной очевидностью подтверждается выраженным локальным характером коррозионной деградации, идентичностью их качественного состава составу

дендритных образований, наличием в продуктах коррозии хлора, а также характерными кинетическими особенностями процесса рассматриваемого вида коррозионного разрушения.

Исследователи, изучавшие процесс электролитической миграции и дендритообразования между металлическими частями изделий, в том числе корпусов ИС, эмпирическим путем смогли выявить только некоторую часть характерных закономерностей, присущих питтинговой коррозии [3]. Скорее всего, это естественным образом объясняется тем, что авторы, не идентифицировав природу возникновения дендритов, в условиях ограниченной информации об электрохимии процесса пришли к ошибочной оценке коррозионной ситуации, что в конечном итоге не позволило разработать полную модель процесса. Однако даже простая констатация факта, что процесс дендритообразования между спаями корпусов ИС по природе своего возникновения есть питтинговая коррозия спаев – анодов, с последующим катодным осаждением растворимых продуктов питтинговой коррозии в виде дендритов, позволяет без существенных дополнительных усилий разработать полную модель этого процесса. Это возможно, т. к. питтинговая коррозия всесторонне исследована, проведена ранжировка значимых факторов процесса и построена полная детерминированная модель процесса, обладающая высокой адаптивностью.

**Анализ результатов.** Таким образом, появляется возможность сосредоточения усилий исследователей на повышении стойкости изделий к дендритообразованию между их металлическими частями с использованием многочисленных и подробных практических рекомендаций, выработанных учеными-коррозионистами, изучавшими питтинговую коррозию. Указанный методический подход применим и в вопросах диагностики и прогнозирования технических отказов, связанных с электролитической миграцией и дендритообразованием. Появляется также возможность использования неразрушающих электрохимических методов, разработанных при исследованиях питтинговой коррозии, для оценки коррозионной стойкости металлокерамических спаев корпусов.

Как известно, для возникновения и протекания питтинговой коррозии необходимы следующие условия [1–5]:

- 1) пассивирующая среда (требуется пребывание металлов в пассивном состоянии);
- 2) анион-активатор в количестве, превышающем критическую концентрацию;
- 3) окислитель, способный сместить потенциал коррозии «положительнее» потенциала питтингообразования (роль окислителя может выполнять анодная поляризация от внешнего источника тока).

Наличие электрических контактов с более благородными металлами и наличие зазоров и щелей повышает вероятность возникновения питтинга. Питтинг наблюдается в средах, содержащих активизирующие анионы, в первую очередь галоидные, причем наиболее агрессивным является хлор-ион.

Известно, что применяемые в базовой конструкции металлокерамических корпусов металлы и сплавы устойчивы к равномерной коррозии и склонны к пассивации [2], благодаря чему сравнительно легко выполняется первое условие питтингообразования. Анализ экспериментальной потенциостатической кривой также показывает, что поверхность спая при электрохимическом испытании пассивируется, о чем свидетель-

ствуется постепенное уменьшение тока утечки в первоначальные моменты поляризации внешним током (см. рис. 2).

Наличие хлора в продуктах коррозии означает, что основным ионом-активатором питтинговой коррозии спаев является хлор-ион. Как известно, в базовой технологии изготовления металлокерамических корпусов на операциях гальванического никелирования применяются такие хлорсодержащие соединения, как соляная кислота, хлористые соли никеля и кобальта. Анализ элементного состава продуктов коррозии показал, что в спаях существует система взаимосвязанных несплошностей, обеспечивающая доступ внешней среды ко всем компонентам спая и накапливающая трудноудаляемые остатки хлорсодержащих технологических сред.

Петрографический анализ ряда спаев с коррозионными разрушениями показал, что толстые металлические пленки в этих спаях имеют пористую, микротрещиноватую структуру, в периферийных частях наблюдаются трещины разрыва, соединяющиеся со щелями, образованными наплывом припоя на керамическую подложку. В припойных швах указанных спаев обнаруживаются поры, соединяющие поверхность металла с основанием. Форма пор показывает, что данные дефекты образуются в процессе пайки вследствие блокирования газовой среды в приповерхностных порах металла растекшимся жидким припоем, с последующим порообразованием в припойном шве из-за температурного расширения заблокированного газа при дальнейшем повышении температуры пайки. Спаи коррозионно-стойких корпусов подобных дефектов в металлизационных покрытиях практически не имеют.

В обоих вариантах спаев на границе спай – керамическая подложка наблюдались щели, образованные частичным наплывом припоя на керамику. Одна из стенок щели была образована нависшим над керамикой припоем, другая – керамикой, причем обращает на себя внимание то, что припойная стенка щелей не защищена гальваническим никелевым и золотым покрытиями, скорее всего, из-за весьма малой высоты щелей. Полученные данные подтверждают наличие в спаях, склонных к коррозии, системы взаимосвязанных несплошностей, имеющей сообщение с внешней средой. Таким образом, выполнимость второго условия питтингообразования обуславливается наличием в дефектах спаев (в виде взаимосвязанных трещин и пор) остатков не удаленных финишной очисткой хлорсодержащих технологических сред. Выполнимость третьего условия питтингообразования при коррозионных испытаниях корпусов с приложением электрического напряжения, как указывалось выше, обуславливается анодной поляризацией спаев. При поляризации спаев внешним источником тока контролирующим фактором питтинговой коррозии становится омическое падение приложенного напряжения на сопротивлении изоляции между спаями. Известно [2], что при анодной поляризации током стационарные электродные потенциалы металлов увеличиваются. Величина увеличения пропорциональна силе протекающего тока. В случаях, когда электролит обладает значительным омическим сопротивлением ( $R$ ), ток в коррозионной системе зависит от  $R$  в соответствии с формулой: [1] 
$$J = \frac{(J'_K - J'_A) + \Delta J}{R},$$

где  $J'_K$ ,  $J'_A$  – стационарные потенциалы катода и анода;  $\Delta J$  – приложенная извне разность потенциалов. Так как обычно  $J'_K$ ,  $J'_A < 1В$ , а  $\Delta J \gg 1В$ , разностью  $J'_K - J'_A$  можно

пренебречь и принять, что  $J = \frac{\Delta J}{R}$ . Известно, что при относительно небольших токах (при больших  $R$  и / или малых  $\Delta J$ ) можно принять линейную зависимость стационарного электродного потенциала анода от силы тока:  $J'_A = J_A^0 + J \cdot \operatorname{tg}\beta$  – равновесный потенциал анода (до приложения напряжения);  $\operatorname{tg}\beta$  – тангенс угла наклона анодной поляризационной кривой (по физическому смыслу – электрическое сопротивление образующейся пассивной пленки на поверхности анода).

Следовательно:

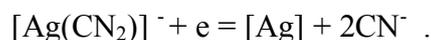
$$J'_A = J_A^0 + \frac{\Delta J}{R} \cdot \operatorname{tg}\beta.$$

Из полученного выражения следует, что увеличение значения стационарного потенциала анода  $J'_A$  до потенциала питтингообразования (потенциала «пробоя») может происходить как за счет увеличения приложенного напряжения, так и уменьшения омического сопротивления пленки электролита на керамике между спаями выводов. Как известно, проводимость слоя жидкости, образующейся на поверхности алюмооксидных подложек при их помещении во влажную среду, в определяющей степени и прямо пропорционально зависит от количества водорастворимых загрязнений. Причем проводимость тонкого слоя водного электролита на загрязненной подложке на несколько порядков выше, чем на чистой.

Таким образом, ионные загрязнения керамики корпусов значительно увеличивают вероятность питтинговой коррозии, в случае склонности металлокерамических спаев к этому виду коррозии. Поэтому необходима тщательная финишная промывка корпусов, обеспечивающая сопротивление изоляции между спаями выводов не менее  $10^{13}$  Ом.

Как показывают результаты анализа продуктов коррозии каплеобразной формы, окислителями, кроме атомов кислорода, являются ионы трехвалентного железа. Т. к. доступ кислорода в щель, образованную частичным наплывом припойной галтели на керамику, из-за весьма малой высоты щели ограничен, в процессе возникновения питтинговой коррозии значительную роль начинает играть наличие в электролите, находящемся в щели, окислительных ионов  $\text{Fe}^{3+}$ . Указанные ионы появляются в результате коррозии коваровых выводов с последующим переносом продуктов коррозии в виде  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  в район щели и частичной диссоциации  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  в электролите. Коррозия поверхности выводов, обращенных к толстопленочной металлизации, возможна в случае существования системы взаимосоединяющихся несплошностей в припойном шве, металлизации, соединяющей указанные поверхности с рассматриваемой щелью. В этом случае обеспечивается как доступ коррозионной среде к поверхности выводов, так и обратный массоперенос продуктов коррозии к щели. Наличие в продуктах коррозии спаев железа показывает, что коррозионная деградация выводов протекает, а коричневый цвет каплеобразных продуктов коррозии показывает, что железо в них содержится именно в виде  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , а не  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , т. к.  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  – коричневого цвета, а  $\text{Fe}(\text{OH})_2$  – белого. Появление ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в районе щели смещает стационарные электродные потенциалы металлов на стенках щели в положительную сторону, и, как уже указывалось выше, при наличии также и ионов хлора повышает вероятность развития питтин-

говой коррозии. Для устранения подобного рода влияния коррозии железа, находящегося в составе выводов, на коррозию спаев выводов и образование дендритных перемычек между ними, нами был предложен способ, заключающийся в использовании выводов, вырубленных из плакированного слоем никеля кобальта. Применение предложенного способа позволяет повысить коррозионную стойкость металлокерамических спаев выводов корпусов ИС. Анализ приведенного выше состава дендритных перемычек между спаями выводов показывает, что основным металлом, подвергающимся питтинговой коррозии с последующим осаждением на катоде, является медь, входящая в состав припоя ПСр-72 (72%Ag + 28% Cu), а серебро занимает одно из последних мест в ряду металлов, входящих как в состав дендритов, так и в состав каплеобразных продуктов коррозии. Следовательно, в данных случаях реализуется упомянутая компонентно-избирательная коррозия ПСр-72, составляющего одну из стенок щели, образованной частичным напылом припоя на керамику. Компонентно-избирательная коррозия в данном случае происходит потому, что продукты реакции ионов меди с хлорид-ионами хорошо растворимы в воде ( $\text{CuCl}_2$ ), а аналогичные продукты на основе серебра ( $\text{AgCl}$ ) практически не растворимы. Появление в продуктах коррозии небольшого количества серебра можно объяснить тем, что в состав технологических загрязнений спая, помимо хлорсодержащих соединений, входят и вещества, образующие с серебром комплексные соединения. Например, таким веществом является  $\text{KCN}^-$ , входящий в состав растворов золочения корпусов, и диссоциирующий в воде на ионы  $\text{K}^+$  и  $\text{CN}^-$ . При взаимодействии серебра с ионом циана образуется комплексное соединение  $[\text{Ag}(\text{CN}_2)]^-$ . Образующиеся на стенках щели комплексные ионы непрерывно уходят в электролит, обеспечивая депассивацию и питтинговую коррозию серебра. В дальнейшем серебро входит в состав дендритов, осаждаясь на катоде по реакции:



Следующий по количеству за медью металл, входящий в состав дендритов – никель, находящийся в спаях в виде слоя химникеля на толсто пленочных покрытиях гальванического никеля под слоем золота. Известно, что никель, так же, как и медь, склонен к питтинговой коррозии, что обуславливает наличие в составе дендритов этих металлов.

Таким образом, обобщая, можно заключить, что при коррозионных испытаниях для склонных к коррозии спаев выполняются все три условия питтингообразования, что и приводит к их питтинговой коррозии. Активация питтинговой коррозии в спаях при испытаниях корпусов без приложения напряжения приводит к появлению каплеобразных продуктов коррозии спаев, с приложением напряжения – к образованию дендритных перемычек между спаями выводов.

Результаты петрографических анализов позволяют также сделать вывод, что стойкость спаев корпусов к питтинговой коррозии в определяющей степени зависит от структурно-фазового состояния толсто пленочных металлизационных покрытий. Проведенный на спаях корпусов и толстых покрытиях керамических плат сравнительный петрографический анализ показал, что дефекты толстых пленок в виде микротрещин и пор образуются в процессе обжига изделий, а дефекты в виде трещин разрыва в периферийных частях – в процессе пайки металлических частей.

Исследования показали, что трещины разрыва в основном образуются в толстых покрытиях с пористой структурой. Следовательно, трещины разрыва формируются под воздействием термомеханических напряжений, возникающих при пайке из-за несогласованности коэффициентов температурного расширения материалов спая:

$$\alpha_{\text{ПСр-72}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \alpha_{\text{кер.}} = 7 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \alpha_{\text{ков.}} = 5 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}; \alpha_{\text{кер.}} \approx \alpha_{\text{ков.}}$$

Очевидно, что из-за близости коэффициентов температурного расширения керамики, металла и ковара основное влияние на создание термомеханических напряжений в металлизационных покрытиях оказывает припой ПСр-72. Напряжения появляются на стадии охлаждения, когда остывающий припой уже недостаточно пластичен, чтобы ослабить остаточные напряжения. Основные напряжения возникают вокруг припойной галтели. Их можно разложить на поперечные и продольные относительно металлической поверхности составляющие, приложенные к периферийным частям металлизационного покрытия.

При недостаточной механической прочности металлизационного покрытия под воздействием этих составляющих возникают поперечные и продольные, относительно поверхности, трещины в объеме покрытия. Первоначально поперечная, или сдвиговая составляющая напряжения открывает трещину, перпендикулярную поверхности покрытия и расположенную вблизи его границы с керамикой. Трещина расположена вблизи этой границы, потому что интенсивность напряжения сдвига резко возрастает от ничтожно малого значения на керамике до конечного значения на поверхности металла, а по известному принципу Дьюрели напряжение на поверхности логарифмически обращается в бесконечность в точках, где равномерная сдвигающая нагрузка резко меняется от нуля до конечного значения.

Продольная составляющая, или компонента вертикального растяжения, изменяет траекторию поперечной трещины параллельно поверхности покрытия. Очевидно, что глубина проникновения трещины в металлизацию определяется ее механической прочностью, зависящей от дефектов структуры в виде микротрещин и пор.

Таким образом, изучение природы коррозионной деградации спаев металлокерамических корпусов в основном должно сводиться к изучению механизмов дефектообразования в толсто пленочном металлизационном покрытии в процессе его обжига.

#### **Выводы.**

1. Электрохимические процессы коррозии металлокерамических спаев корпусов протекают по механизму питтинговой коррозии. Питтинговая коррозия металлов спая активируется хлорсодержащими остатками технологических сред для гальванопокрытий, накапливающихся в дефектах спаев в виде пор, микротрещин и щелей.

2. Загрязнение керамических корпусов остатками водорастворимых технологических сред снижает стойкость металлокерамических спаев к образованию дендритных перемычек между ними.

3. Коррозионную стойкость спаев снижают продукты коррозии металлических деталей (выводов, ободка), содержащие трехвалентные ионы железа.

4. Коррозионная стойкость спаев в доминирующей степени контролируется структурно-фазовым состоянием толсто пленочной металлизации. Дефекты в толстых пленках в виде пор и микротрещин снижают коррозионную стойкость спаев.

5. Дефекты в толстых пленках первоначально образуются в процессе спекания металлокерамических плат и дополнительно развиваются в процессе пайки металлических деталей корпуса из-за несогласованности коэффициентов температурного расширения материалов спая.

#### Список литературы

1. *Антропов, Л. И.* Теоретическая электрохимия / Л. И. Антропов. – М.: Высшая школа, 1984. – 518 с.
2. *Розенфельд, И. Л.* Коррозия и защита металлов (локальные коррозионные процессы) / И. Л. Розенфельд. – М.: Металлургия, 1990. – 448 с.
3. *Улиг, Г. Г.* Коррозия и борьба с ней. Введение в коррозионную науку / Г. Г. Улиг, Р. У. Ревин; Пер. с англ. – Л.: Химия. Ленинградское отделение, 1989. – 455 с.
4. *Ромашов, Н. Д.* Теория коррозии и коррозионностойкие конструкционные сплавы / Н. Д. Ромашов, Д. П. Чернова. – М.: Металлургия, 1986. – 236 с.
5. *Шлугер, М. А.* Коррозия и защита металлов / М. А. Шлугер, Ф. Ф. Ажогин, Е. А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1986. – 216 с.

Статья поступила в редакцию 29.10.08.

*О. Н. Афоню*

#### CLIMAT FACTORS STABILITY OF METAL-CERAMIC PACKAGES

*The problem of nature and electric-chemical corrosion mechanisms identification for frames seams at destabilizing impact of internal and external physical-chemical factors is solved. A system analysis of cause-effect relations between physical structure of metal-ceramic seams and physical-chemical activating factors of electric-chemical corrosion of integrated circuits packages has been accomplished.*

**Key words:** *microchips, packages, metal-ceramics, corrosion, climate, tests.*

---

*АФОНОВ Олег Николаевич* – кандидат технических наук, ведущий электроник кафедры конструирования и производства радиоэлектронной аппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – надежность радиоэлектронной аппаратуры. Автор 21 публикации.

УДК 621.382.049.77-181.2

*В. Н. Игумнов, В. Е. Филимонов,  
А. П. Большаков, А. В. Мороз*

## **МЕТОДИКА ОХЛАЖДЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МАГНИТНОГО ЭКРАНА И ОСОБЕННОСТИ ЕГО КОНСТРУКЦИИ**

*Разработаны методика охлаждения высокотемпературного сверхпроводящего магнитного экрана и его конструкция, позволяющие уменьшить температурные неоднородности в стенках экрана, ограничить скорость охлаждения до скорости перемещения температурного фронта. Показана практическая реализация предложенных технических решений.*

**Ключевые слова:** *охлаждение, высокотемпературная сверхпроводимость, магнитный экран, конструкция.*

**Введение.** Сегодня в электронике используются магнитные экраны из ферромагнитных материалов, представляющие собой оболочки в виде сфер, цилиндров и т.д. [1]. Такие экраны имеют большие остаточные поля, температурную и временную нестабильность.

Самым распространенным в настоящее время является магнитный сверхпроводниковый экран в форме цилиндрического стакана с дном сферической формы. Такой экран охлаждают равномерно и направленно переводя в сверхпроводящее состояние, начиная от центра дна; опускают его в хладагент так, чтобы градиент температуры был достаточно высоким [1]. Теплопроводность стенок экрана не позволяет получить необходимый градиент температуры; ограниченность кривизны сферического дна и кипение хладагента приводят к обширному асимметричному (не точечному) контакту дна с хладагентом, что вызывает неравномерный, несимметричный переход стенок экрана в сверхпроводящее состояние, замораживание магнитного потока в полости экрана, то есть снижение коэффициента ослабления. Кроме того, этот способ охлаждения требует прецизионной механики для медленного равномерного и направленного опускания экрана в хладагент.

**Цель работы.** Разработать методику охлаждения высокотемпературного сверхпроводящего (ВТСП) магнитного экрана и его конструкцию, позволяющие уменьшить температурные неоднородности в стенках экрана, ограничить скорость охлаждения до скорости перемещения температурного фронта.

**Решаемые задачи.** Повысить коэффициент ослабления ВТСП магнитного экрана за счет уменьшения остаточных («вмороженных») магнитных полей.

**Теоретическая разработка методики охлаждения и конструкции.** Принцип методики охлаждения магнитного экрана заключается в том, что при переводе в сверхпро-

водящее состояние уменьшаются температурные неоднородности в стенках экрана, возникающие при его погружении в хладагент вследствие большой разности температур хладагента и экрана (кипение), и теплопроводности, а также ограничивается скорость охлаждения до скорости перемещения температурного фронта. Экран с нагревателем помещают в хладагент и выдерживают до полного охлаждения. Затем нагревают экран до его перехода в нормальное состояние. В этом случае разность температур экрана и

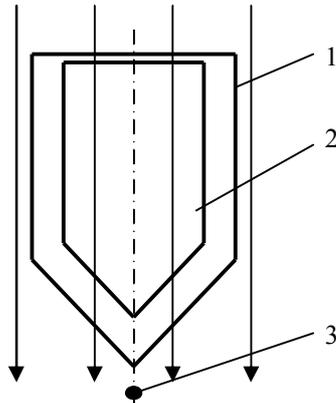


Рис. 1. Схема экрана с нагревателем внутри в хладагенте (условно не показан) в магнитном поле, параллельном оси

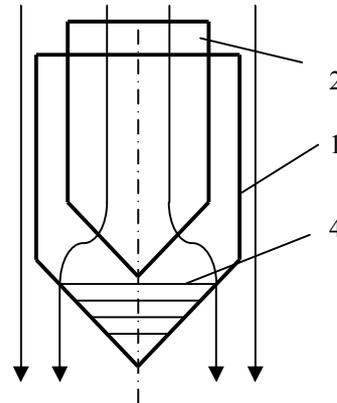


Рис. 3. Экран в стадии извлечения нагревателя в параллельном оси магнитном поле

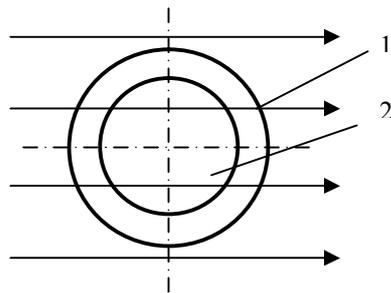


Рис. 2. Схема экрана с нагревателем внутри в хладагенте (условно не показан) в магнитном поле, перпендикулярном оси

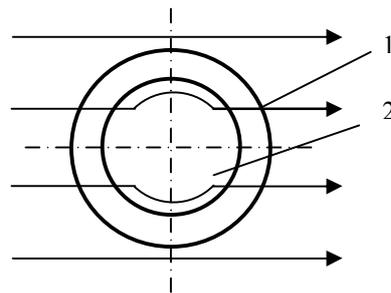


Рис. 4. Экран в стадии извлечения нагревателя в перпендикулярном оси магнитном поле

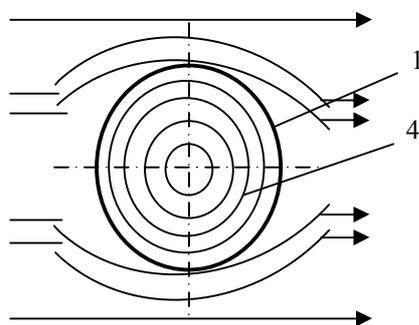


Рис. 5. Схема экрана и перпендикулярного магнитного поля после извлечения нагревателя

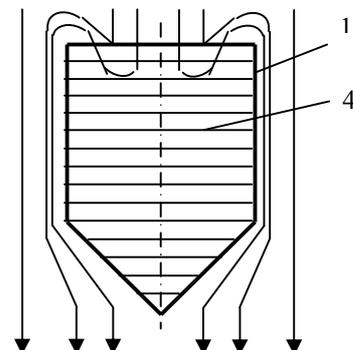


Рис. 6. Схема экрана и параллельного магнитного поля после извлечения нагревателя

хладагента оказывается много меньше, чем при погружении экрана комнатной температуры, кипение хладагента минимальное, температурное поле более однородно. После этого нагреватель вынимают из экрана так, что скорость охлаждения (температурного фронта) определена не теплофизическими параметрами материала экрана, а скоростью удаления нагревателя. В этом случае неоднородности в стенках экрана не искажают температурный фронт – кольцо перпендикулярно оси экрана. В этом кольце возникает экранирующий сверхпроводящий ток, который постоянно, упорядоченно продвигаясь заполняет всю поверхность экрана, последовательно выталкивая магнитное поле, повышается коэффициент ослабления  $K$  экрана, связанный с выталкиванием магнитного поля из полости экрана при его переходе в сверхпроводящее состояние и захватом части магнитного потока в виде замороженных магнитных полей в полости экрана. Коэффициент ослабления равен отношению напряженности постоянного внешнего поля  $H_e$  к напряженности постоянного остаточного поля  $H_t$ , измеренной в центре экранируемого объекта [1]:

$$K = H_e / H_t. \quad (1)$$

Данный эффект достигается также тем, что в магнитном экране дно выполняется в виде полого конуса, чтобы фиксировать и минимизировать начальную область контакта экрана с хладагентом, то есть область возникновения сверхпроводящего тока. В этом случае сверхпроводящий ток образуется на вершине конуса, и в тем меньшей области, чем меньше угол при вершине конуса. Предельным можно считать угол  $90^\circ$ , когда кривизна центра конического дна экрана приближается к кривизне конического дна. Именно такая конструкция экрана позволяет эффективно реализовать описанную методику охлаждения.

Конструкция предлагаемого магнитного экрана отличается от используемых в настоящее время формой дна, которая выполнена в виде полого конуса с углом при вершине менее  $90^\circ$ , а методика охлаждения экрана отличается тем, что после погружения экрана и нагревателя в хладагент и температурной релаксации экран нагревают до его перехода в нормальное состояние ( $T = T_c + 3 \dots 5 \text{K}$ ), а затем нагреватель вынимают так, чтобы скорость вынимания нагревателя равнялась скорости температурного фронта.

**Практическая реализация.** Был изготовлен толсто пленочный экран  $1$  из порошка высокотемпературного сверхпроводника  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  по толсто пленочной технологии (рис. 1–6). В качестве подложки использовался стакан с дном цилиндрической формы из керамики  $\text{MgO}$ : длина 100 мм, диаметр 40 мм, толщина стенок 3 мм, угол при вершине конуса  $45^\circ$ . Подложку изготавливали по типовой керамической технологии: гидростатическое прессование 5 МПа и отжиг в печи ( $T = 1500^\circ\text{C}$ ). Пасту готовили из порошка состава  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  и органической связки, далее подвергали термообработке ( $T_{\text{max}} = 950^\circ\text{C}$ ). Нагреватель  $2$  – медный стержень с нихромовой катушкой (на рис. условно не показана, находится вне экрана). Экран с нагревателем погружали в хладагент – жидкий азот ( $T \approx 77\text{K}$ ). После температурной релаксации экрана его нагревали до температуры 95K (температура перехода  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7 - T_c = 92\text{K}$ ). Температуру контролировали с помощью термомпары  $3$  (рис. 1). Скорость удаления нагревателя выбирали такой, чтобы температурный фронт охлаждения представлял собой кольцо, перпенди-

кулярное оси экрана, и не возникали температурные неоднородности, приводящие к замораживанию магнитного поля. Эту задачу можно решать эмпирически [1] или аналитически. Здесь было использовано выражение из [2], связывающее теплопроводность материала экрана  $a$ , расстояние до точки максимальной температуры  $x_m$  и время достижения такой температуры  $t_m$ :

$$a = x_m^2 / (4t_m). \quad (2)$$

Для материала  $YBa_2Cu_3O_7$  скорость движения нагревателя составила  $8 \cdot 10^{-3}$  м/с. С такой скоростью нагреватель был выведен из экрана. В процессе вывода нагревателя нижняя область (рис. 3, 4) конического дна переходила в сверхпроводящее состояние, где образовывались сверхпроводящие экранирующие токи 4. После полного вывода нагревателя в сверхпроводящем состоянии оказывался весь экран (рис. 5, 6). Измерение коэффициента ослабления экрана показало, что коэффициент для данного примера составил  $5 \cdot 10^3$ , что существенно больше, чем для аналогичного экрана со сферическим дном при обычном способе охлаждения ( $K=300$ ).

Итак, использование предлагаемого магнитного экрана и методики его охлаждения позволяет повысить качество экрана, в частности, коэффициент ослабления магнитного поля.

Описанный в статье магнитный экран обладает следующими преимуществами по сравнению с известными устройствами:

- обеспечивает повышенный коэффициент ослабления магнитного поля;
- обеспечивает более высокую однородность остаточного магнитного поля;
- дает возможность использовать экран с теплофизическими неоднородностями стенок;
- нет необходимости в прецизионной механике для погружения экрана.

**Выводы.** В ходе проделанной работы были получены следующие результаты:

1. Разработана методика охлаждения магнитного экрана, позволяющая уменьшить температурные неоднородности в стенках экрана, ограничить скорость охлаждения до скорости перемещения температурного фронта.

2. Разработана конструкция магнитного экрана в соответствии с предложенной методикой.

3. Практически доказаны преимущества конструкции магнитного экрана, изготовленного по предложенной методике, по сравнению с конструкциями, применяемыми в настоящее время.

#### Список литературы

1. Бондаренко, С. И. Применение сверхпроводимости в магнитных измерениях / С. И. Бондаренко, В. И. Шеремет. – Л.: Энергоатомиздат, 1982. – С.59–92.
2. Лыков, А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков. – М.: Госиздательство технико-теоретической литературы, 1952. – 392 с.

Статья поступила в редакцию 18.11.08.

*V. N. Igoumnov, V. Ye. Filimonov,  
A. P. Bol'shakov, A. V. Moroz*

**TECHNIQUE FOR HIGH-TEMPERATURE SUPERCONDUCTING MAGNET  
SCREEN COOLING AND PECULIARITIES OF ITS DESIGN**

*The technology for high-temperature superconducting magnet screen cooling and its design, which allow to decrease temperature nonhomogeneity in the screen walls, limit the speed of cooling to the speed of temperature front moving, are developed. Practical implementation of the technical decisions suggested is shown.*

**Key words:** *cooling, high-temperature superconductivity, magnet screen, design.*

---

*ИГУМНОВ Владимир Николаевич* – кандидат технических наук, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – криоэлектроника, высокотемпературная сверхпроводимость, электроискровая подгонка. Автор 89 публикаций.

*ФИЛИМОНОВ Виталий Евгеньевич* – зав. лабораторией кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – высокотемпературная сверхпроводимость, тонкие пленки, вакуумная техника. Автор 33 публикаций.

*БОЛЬШАКОВ Александр Павлович* – электроник кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – криоэлектроника, высокотемпературная сверхпроводимость. Автор 6 публикаций.

*МОРОЗ Андрей Викторович* – студент МарГТУ. Область научных интересов – высокотемпературная сверхпроводимость, тонкие пленки. Автор 4 публикаций.

## НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

УДК 621.391.6

### Конференция РРВ-2008

С 22 по 26 сентября 2008 года на базе Южного Федерального университета проходила XXII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн» – РРВ-2008. Проведение конференций поручается организациям, которые имеют в своем составе коллективы, известные в России и за рубежом в области распространения радиоволн. История конференции насчитывает уже более 60 лет. Ранее конференции проходили в городах: Москва, Санкт-Петербург, Нижний Новгород, Казань и др. В 2005 году такая конференция проводилась в г. Йошкар-Ола на базе Марийского государственного технического университета. В МарГТУ руководит этой тематикой и возглавляет научную школу по распространению радиоволн и физике атмосферы проректор по научной работе и инновационной деятельности, доктор физико-математических наук, профессор Владимир Алексеевич Иванов. В. А. Иванов является членом бюро Научного Совета Российской академии наук по комплексной проблеме «Распространение радиоволн», членом Программного комитета конференции. Научная школа МарГТУ под руководством В. А. Иванова объединяет ученых нескольких кафедр и научных лабораторий МарГТУ. В ее составе работают три доктора наук (члены Научного Совета РАН), восемь кандидатов наук, докторанты, аспиранты, магистры. Научная школа под руководством В. А. Иванова известна в нашей стране и за рубежом исследованиями и созданием аппаратуры для дистанционной диагностики ионосферы Земли и ионосферных радиоканалов широкополосными сигналами (мобильный ЛЧМ ионозонд, каналный ионозонд, ионозонд вертикального однопозиционного зондирования ионосферы и др.).

Конференция «Распространение радиоволн» проводится раз в три года и является форумом научной общественности России и стран СНГ. О ее высочайшем уровне свидетельствует список организаторов: Российская академия наук, Министерство образования и науки РФ, Российский фонд фундаментальных исследований, Национальный комитет URSI, Российская секция IEEE, Объединенное физическое общество РФ, Секция прикладных проблем при Президиуме РАН. Председатель конференции – руководитель Научного Совета РАН по комплексной проблеме «Распространение радиоволн», доктор технических наук, профессор ИРЭ РАН Неон Александрович Арманд.

Тематика конференции включает следующие проблемы:

- дистанционное зондирование верхней атмосферы и космического пространства;

- распространение УКВ и микроволн, волн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов в тропосфере и урбанизированных средах;
- распространение километровых и более длин волн;
- распространение декаметровых радиоволн. Нелинейные эффекты в ионосфере;
- дистанционное зондирование атмосферы и земных покровов в радио, ИК и оптическом диапазонах;
- математическое моделирование процессов распространения радиоволн. Распространение широкополосных сигналов в средах с дисперсией;
- распространение оптических волн и дистанционное зондирование окружающей среды.

В конференции РРВ-2008 приняла участие большая делегация МарГТУ. В состав делегации входили: два доктора наук, два кандидата наук, три аспиранта, один студент. Докладывались результаты научных исследований, полученные за последние три года при выполнении инициативных научных проектов и ориентированных фундаментальных исследований по грантам Российского фонда фундаментальных исследований, госконтрактам Министерства образования и науки РФ в рамках Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России», грантам по программе «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (УМНИК). Председателем заседания секции «Дистанционное зондирование верхней атмосферы и космического пространства» являлась зав. кафедрой радиотехники и связи МарГТУ, доктор физико-математических наук, профессор Н. В. Рябова. Доклады зав. кафедрой высшей математики, доктора физико-математических наук Д. В. Иванова и аспиранта кафедры высшей математики А. Р. Лащевского, а также аспирантов кафедры радиотехники и связи А. В. Мальцева, И. Е. Царева и студентки М. И. Рябовой были отмечены в ряду лучших.

По результатам работы на Всероссийской конференции «Распространение радиоволн» РРВ-2008 были приняты основные приоритетные направления развития науки в области распространения радиоволн в России на ближайшие три года, в которые вошли направления работы научной школы МарГТУ под руководством В. А. Иванова.

**Н. В. Рябова**

Статья поступила в редакцию 30.10.08.

---

*РЯБОВА Наталья Владимировна* – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой радиотехники и связи МарГТУ. Область научных интересов – ионосфера, распространение радиоволн, прогнозирование, моделирование, адаптивная система, информационно-телекоммуникационная система. Автор 132 публикаций, в том числе авторской монографии, монографий в соавторстве, учебного пособия с грифом Министерства образования РФ.

УДК 004.02

## **МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ «ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНЫЕ ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ НА КЛАСТЕРНЫХ СИСТЕМАХ»\***

С 17 по 21 ноября 2008 года в Казани при патронате Кабинета министров Республики Татарстан проходила 8-я международная конференция «Высокопроизводительные Параллельные Вычисления на Кластерных Системах» – НРС-2008.

В рамках конференции были заслушаны пленарные доклады, проведены заседания секций:

секция А. Принципы построения кластерных вычислительных систем. Программные среды и инструменты для разработки параллельных программ;

секция В. Параллельные алгоритмы и прикладные программные системы параллельных вычислений в задачах математики и механики;

секция С. Параллельные алгоритмы распознавания образов и обработки изображений, эволюционное моделирование;

секция D. Параллельные алгоритмы и прикладные программные системы параллельных вычислений в физике, химии и других областях.

В работе конференции НРС-2008 приняли участие 40 докторов наук (среди них – один академик РАН, четыре член-корреспондента РАН, три академика АН РТ, три член-корреспондента АН РТ) и 45 кандидатов наук, представители 20 городов России, ближнего и дальнего зарубежья.

На первом пленарном заседании присутствовали все участники конференции, представители всех научных организаций и вузов г. Казани. Были оглашены приветствия участникам конференции премьер-министра Республики Татарстан Р. Н. Минниханова и Президента Академии наук Республики Татарстан А. М. Мазгарова. Заслушаны представительские доклады первого заместителя премьер-министра Республики Татарстан, председателя конференции профессора Б. П. Павлова; ректора КГТУ им. А. Н. Туполева, председателя оргкомитета конференции профессора Ю. Ф. Гортышова; декана факультета ВмиК Нижегородского госуниверситета, члена оргкомитета конференции профессора В. П. Гергеля; представителя компании Microsoft В. С. Украинского. Состоялись и два проблемных доклада – профессора О. Л. Бандман (ИВМиМГ РАН) и член-корреспондента РАН Е. Е. Тыртышников (ИВМ РАН). На втором пленарном заседании под председательством академика РАН В. К. Левина были заслушаны и обсуждены проблемные доклады член-корреспондента РАН Б. Н. Четверушкина и доктора М. В. Якобовского (ИММ РАН); профессора В. В. Корнеева (ФГУП «НИИ КВАНТ»); профессора В. А. Крюкова (ИПМ РАН); профессора В. А. Райхлина (КазГТУ); старшего научного сотрудника Д. В. Чачкова (КНЦ РАН).

На секции А (председатель доктор технических наук В. П. Гергель) присутствовали

---

\* По материалам сайта <http://agora.guru.ru/>

45 участников конференции. В число рассмотренных тем вошел ряд важных направлений суперкомпьютерных технологий и высокопроизводительных вычислений: оптимизация сложного программного обеспечения по критерию производительности; оценка производительности современного компьютерного оборудования; методы разработки программ для высокопроизводительных графических процессоров; системы управления кластерными вычислениями; проблемно-ориентированные системы для решения прикладных вычислительно-трудоемких задач; технологии Grid.

На секции В (председатель доктор физико-математических наук А. М. Елизаров) присутствовали 40 представителей научных школ Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН, ИММ РАН, МММ КазНЦ РАН) и университетов (КазГТУ, КГУ, ННГУ, НИИ ММ им. Н. Г. Чеботарева, МИФИ, ТГУ, УдмГУ). В основном – это молодые ученые. Были рассмотрены вопросы применения высокопроизводительных систем для решения задач линейной алгебры, математической физики, оптимизации и принятия решений, моделирование случайных процессов.

На секции С (председатель доктор технических наук Я. А. Фурман) в работе приняли участие 40 человек, в основном – молодые ученые. Рассматривались вопросы обработки изображений и сигналов, распознавания образов, построения геоинформационных систем, распределенных баз данных. От МарГТУ в работе секции приняли участие доктор технических наук, профессор Я. А. Фурман, кандидат технических наук, доцент А. А. Роженцов, аспирант С. В. Горинов.

На секции D (председатель член-корреспондент РАН К. М. Салихов) заслушано 16 докладов. Тематика докладов охватывала задачи, связанные с высокопроизводительными вычислениями в метеорологии, квантовой химии, экономике, молекулярной динамике, ЭПР-спектроскопии, инженерных расчетах. Несколько докладов было посвящено использованию Grid-среды для высокопроизводительных вычислений. Все доклады сделаны на высоком научном уровне, актуальны по тематике и направлены на решение задач, имеющих прикладное значение.

В рамках конференции прошел конкурс по программе УМНИК.

На конференции был проведен «круглый стол», в работе которого приняли участие 30 ведущих представителей образовательных школ вузов и Академии наук. Рассматривались вопросы подготовки кадров по высокопроизводительным вычислениям. По итогам обсуждения принято решение конференции.

**А. А. Роженцов**

Статья поступила в редакцию 25.11.08.

---

*РОЖЕНЦОВ Алексей Аркадьевич* – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор более 90 публикаций.

**УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ,  
ОПУБЛИКОВАННЫХ  
В ЖУРНАЛЕ В 2008 ГОДУ**

**ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ  
И РАДИОТЕХНИКА**

**М. И. Бастрасова.** Экспериментальное исследование диапазонов оптимальных рабочих частот декаметровых систем связи

2

**Е. А. Григорьевых.** Исследование помехоустойчивости физических носителей комплекснозначных кодовых последовательностей с равномерным энергетическим спектром

2

**В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова, А. В. Мальцев, М. И. Рябова, И. Е. Царев.** Зондирование ионосферных каналов высокочастотной связи с поверхности Земли

1

**В. А. Иванов, Д. В. Иванов, А. Р. Лащевский, М. И. Рябова.** Влияние дисперсности ионосферы на разрешающую способность ЛЧМ ионозондов

3

**Д. В. Иванов, В. А. Иванов, Н. В. Рябова, А. А. Елсуков, А. Р. Лащевский, А. В. Мальцев, М. И. Рябова, И. Е. Царев.** Глобальные вариации максимально применимых частот ВЧ радиолиний в период солнечного затмения 29 марта 2006 г.

3

**Ю. А. Ипатов, А. В. Кривецкий.** Сегментация цветных аэрофотоснимков на основе алгоритма селективного обучения

2

**В. В. Павлов.** Антенная система аппаратуры однопозиционного вертикального зондирования ионосферы

1

**К. Б. Рябинин.** Решение задачи выбора посадочной площадки беспилотного летательного аппарата на базе кватернионного анализа

1

**А. Ю. Тюкаев.** Алгоритм синтеза квазиортогональных  $M$ -фазных дискретно-кодированных последовательностей систем Гаусса и Фрэнка

1

**И. Е. Царев.** Уменьшение уровня корреляционных шумов в канальном ЛЧМ ионозонде при заданной разрешающей способности

3

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА  
И ИНФОРМАТИКА**

**Д. Ю. Кубашев, А. Н. Леухин.** Повышение криптостойкости преобразования информации методом гаммирования

3

**А. Н. Леухин.** Теория синтеза фазокодированных последовательностей с одноуровневой АКФ

3

**LIST OF MATERIALS  
PUBLISHED IN  
MarSTU REPORTER IN 2008**

**TELECOMMUNICATION  
AND RADIO ENGINEERING**

**M. I. Bastrakova.** Experimental study of the range of optimum working frequencies of decimeter systems

**Ye. A. Grigoryevykh.** Research into the noise stability of physical carriers of complex-valued code sequences with uniform power spectrum

**V. A. Ivanov, D. V. Ivanov, N. V. Ryabova, A. V. Maltsev, M. I. Ryabova, I. Ye. Tzarev.** Ionospheric high-frequency communication channels sounding from the Earth surface

**V. A. Ivanov, D. V. Ivanov, A. R. Lashchevskiy, M. I. Ryabova.** Ionosphere dispersivity impact on IFM ionosonde resolving power

**D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, A. A. Yelsoukov, A. R. Lashchevskiy, A. V. Maltsev, M. I. Ryabova, I. Ye. Tzaryov.** Global variations of maximum applicable frequencies HF radio lines during the solar eclipse of 29 march 2006

**Yu. A. Ipatov, A. V. Krevetsky.** Segmentation of color aerial photographs on the basis of selective training algorithm

**V. V. Pavlov.** Antenna system of the equipment for one-position vertical sounding of the ionosphere

**K. B. Ryabinin.** Solving the problem of selecting a landing ground for the pilotless vehicle on the basis of quaternion analysis

**A. Yu. Tyukaev.** Algorithm of quasiorthogonal  $M$ -phase discrete-coded sequences synthesis of Gauss and Frank systems

**I. Ye. Tzaryov.** Correlation noise level decreasing in channel LFM ionosonde at a given resolving power

**COMPUTER ENGINEERING  
AND INFORMATION TECHNOLOGY**

**D. Yu. Koubashev, A. N. Leoukhin.** Improvement of information transformation cryptographic robustness with the gamma method

**A. N. Leukhin.** Synthesis theory of phase-coded sequences with one-level autocorrelation function

**А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев.** Дискретные фазокодированные последовательности с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции размерности квадратных чисел

3

**Н. В. Парсаев, А. Н. Леухин.** Дискретные фазокодированные последовательности с нулевым уровнем боковых лепестков циклической автокорреляционной функции размерности, кратной четырем

3

**Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова,**

**А. Ю. Чернышев.** Непосредственное формирование порождающих матриц и практическое применение кодов Адамара

2

**А. А. Рожнецов, С. Н. Крылов, А. А. Баев.** Распознавание плоских изображений групповых точечных объектов с неупорядоченными отметками

2

**А. А. Рожнецов, В. Н. Дубровин, А. А. Баев, А. С. Наумов.** Формирование 3D изображений при проведении трансуретральной резекции предстательной железы

3

**А. А. Рожнецов, Р. Г. Хафизов, И. Л. Егوشина, Д. Г. Хафизов.** Оценка трудоемкости определения параметров вращений трехмерных объектов

3

**Я. А. Фурман.** Распознавание образов как задача разложения вектора в базисе эталонных векторов алфавита

1

**Д. Г. Хафизов.** Получение аналитического представления формы пространственного группового точечного объекта

2

**Р. Г. Хафизов, Ю. Е. Третьякова.** Информационная технология визуализации и многоцелевого анализа пространственных динамических изображений предстательной железы для подготовки и проведения трансуретральной операции

2

#### ЭЛЕКТРОНИКА

**О. Н. Афонов.** Устойчивость металлокерамических корпусов к климатическим факторам

3

**В. Н. Игумнов, В. Е. Филимонов, А. П. Большаков, А. В. Мороз.** Методика охлаждения высокотемпературного сверхпроводящего магнитного экрана и особенности его конструкции

3

**В. Н. Леухин, А. В. Андрейкин, А. А. Нагаев.** Анализ влияния технологических операций на выходные показатели качества резистивных сборок

2

**A. N. Leoukhin, N. V. Parsayev.** Discrete phase-coded successions with zero level of side lobes of cyclical autocorrelational function of quadratic numbers dimension

**N. V. Parsayev, A. N. Leoukhin.** Discrete phase-coded successions with zero level of side lobes of cyclical autocorrelational function of the dimension multiple of four

**Ye. V. Petukhova, Yu. V. Sushentsova,**

**A. Yu. Chernyshov.** Direct forming of generating matrices and practical application of Adamar codes

**A. A. Rozhentsov, S. N. Krylov, A. A. Bayev.** Recognition of group point objects flat images with disordered marks

**A. A. Rozhentsov, V. N. Doubrovin, A. A. Bayev, A. S. Naoumov.** 3D image generation at prostata gland transurethral resection

**A. A. Rozhentsov, R. G. Khafizov, I. L. Yegoshina, D. G. Khafizov.** Labor intensity assessment when defining the rotation parameters of 3D objects

**Ya. A. Furman.** Image recognition as a task of vector decomposition in the basis of standard vectors of the alphabet

**D. G. Khafizov.** Getting an analytical representation of the spatial group point objects form

**R. G. Khafizov, Yu. Ye. Tretyakova.** Information technology for visualization and multipurpose analysis of a prostate spatial dynamic image for preparation and conducting a transurethral operation

#### ELECTRONICS

**O. N. Afonov.** Climat factors stability of metal-ceramic packages

**V. N. Igoumnov, V. Ye. Filimonov, A. P. Bol'shakov, A. V. Moroz.** Technique for high-temperature superconducting magnet screen cooling and peculiarities of its design

**V. N. Leoukhin, A. V. Andreykin, A. A. Nagayev.** Analysis of influence of technological operations on the output quality indexes of resistive assemblages

**В. Н. Леухин, А. А. Нагаев, А. В. Андре-  
йкин.** Разработка модели комплекса позици-  
онирования для электроискровой подгонки  
групп резисторов

3

**Н. Г. Моисеев.** Надежностно-ориентирован-  
ное проектирование изделий электронной тех-  
ники

1

**А. А. Нагаев, В. Н. Леухин.** Влияние диэлек-  
трической маски на корректировку величины  
сопротивления толстопленочных резисторов  
методом электроискровой подгонки

2

**Е. П. Павлов, М. С. Синельников.** Управ-  
ление технологической точностью выходных  
параметров больших гибридных интегральных  
схем в многооперационном технологическом  
процессе

1

**М. А. Передреева.** Статистический анализ  
дисперсности металлических порошков в про-  
изводстве металлокерамических плат

1

**М. А. Передреева, В. В. Егосин.** Проблема  
согласования усадочных свойств металлизаци-  
онного слоя и подложки при производстве ме-  
таллокерамических плат

2

#### НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

**Ю. С. Андрианов.** МарГТУ на Российских  
смотровых площадках

2

**А. А. Рожнецов.** К 100-летию со дня рожде-  
ния Владимира Александровича Котельникова

1

**А. А. Рожнецов.** Конференция РОАИ-8-2007

2

**А. А. Рожнецов.** Международная конферен-  
ция «Высокопроизводительные параллельные  
вычисления на кластерных системах»

3

**Н. В. Рябова.** Об итогах IV Региональной кон-  
ференции «Новые технологии в инфотелеком-  
муникациях и радиотехнике»

1

**Н. В. Рябова.** Конференция РРВ-2008

3

**V. N. Leoukhin, A. A. Nagayev, A. V. Andrey-  
kin.** Model development of positioning complex  
for electric spark fitting of resistor groups

**N. G. Moiseyev.** Reliability-focused designing  
of electronic devices

**A. A. Nagayev, V. N. Leoukhin.** Influence of  
a dielectric mask on the correction of resistance  
value of thick-film resistors by the method of  
electric-spark fitting

**E. P. Pavlov, M. S. Sinelnikov.** Management  
of technological precision of output parametres  
of large hybrid integrated circuits in a multi-step  
tehnological process

**M. A. Peredreyeva.** Statistical analysis of the  
metal powders dispersion when producing the  
metal-ceramic cards

**M. A. Peredreyeva, V. V. Egoshin.** The prob-  
lem of shrinking characteristics matching be-  
tween metallized layer and substrate while pro-  
ducting metal-ceramic boards

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

**Yu. S. Andrianov.** MSTU on Russian inspec-  
tion sites

**A. A. Rozhentsov.** To the 100th anniversary of  
Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov

**A. A. Rozhentsov.** POAI-8-2007 conference

**A. A. Rozhentsov.** International conference «High-  
performance parallel calculations on cluster sys-  
tems»

**N. V. Ryabova.** On the results of the IVth Regi-  
onal conference «New technologies in the sphere  
of information-telecommunication and radio-engi-  
neering»

**N. V. Ryabova.** RRV-2008 Conference

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Марийского государственного технического университета» принимает к публикации статьи, соответствующие профилю издания, объемом не более 15 страниц, включая рисунки.

Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты исследований автора, завершенных не более чем за год до публикации.

К печати будут приниматься материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Статьи подвергаются обязательному рецензированию. Рецензенты назначаются редколлегией журнала. Мнение рецензента доводится до автора представленных работ. В «Вестнике ...» печатаются только статьи, получившие положительные рецензии.

### Требования к оригиналам представляемых работ

#### *Структура научной статьи*

1. Аннотация (3-4 предложения).
2. Ключевые слова.
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 представлена в электронном виде и компьютерной распечатке (2 экз.) на бумаге формата А4. Размер шрифта 12 пт, межстрочный интервал одинарный. Поля: справа – 2 см, слева, сверху и снизу – 3 см.

На первой странице статьи слева печатается УДК (размер шрифта 12 пт, прямой, светлый). Ниже, справа – инициалы, фамилия автора (размер шрифта 14 пт, курсив, жирный). Ниже, по центру – название статьи (размер шрифта 14 пт, прямой, жирный).

Далее размещаются аннотация и ключевые слова, которые должны быть представлены на **русском и английском языках**.

Рисунки, графики, таблицы должны иметь нумерационный и тематический заголовки (размер шрифта 10 пт).

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.

#### **Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.**

Статья должна быть подписана автором. После подписи автора и даты указываются его фамилия, имя, отчество (полностью), место работы, должность, область научных интересов, количество опубликованных работ, домашний адрес, телефон, e-mail.

К статье прилагаются следующие **документы**:

- выписка из протокола заседания кафедры;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

Материалы представляются в папке с завязками (каждая статья в отдельной папке).

---

Подписка на журнал осуществляется по каталогу «Газеты. Журналы» Агентства «Роспечать» (подписной индекс **42916**, тематический указатель: Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов).