

ВЕСТНИК 3(7) 2009

МАРИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-технический 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 мас-
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 на-
стоящем издании, допускается только с
письменного разрешения редакции.

Адрес редакции:

424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Тел. (8362) 68-60-12, 68-78-46

Факс (8362) 41-08-72

e-mail: vestnik@marstu.net

Редактор *Т. А. Рыбалка*

Дизайн обложки *Л. Г. Маланкина*

Компьютерная верстка

А. Ю. Желонкин

Перевод на английский язык

О. В. Миронова

Подписано в печать 30.12.09.

Формат 60×84 1/8. Усл. п. л. 10,9.

Тираж 500 экз. Заказ № 194/09.

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)

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

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

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

А. 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)

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

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

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

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

© Марийский государственный технический университет,
Вестник Марийского государственного
технического университета, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

- В. А. Иванов, Н. В. Рябова, И. Е. Царев, А. В. Коркин.** Автоматическое определение отношения сигнал – шум при измерении функции рассеяния узкополосных декаметровых радиоканалов 3
- Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова, А. Ю. Чернышев.** Формирование и взаимные преобразования порождающих и проверочных матриц линейных блочковых кодов 13
- В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина.** Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий 23

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

- А. А. Роженцов, А. А. Баев, К. В. Морозовский.** Обработка 3D изображений на базе кватернионного преобразования Фурье 28
- Р. Г. Хафизов, Д. Г. Хафизов, С. А. Охотников.** Применение стереографической проекции для решения задач распознавания контуров изображений 36
- Р. В. Ерусланов.** Клавиатурная идентификация пользователя на базе метода многосвязного представления 43

ЭЛЕКТРОНИКА

- А. А. Нагаев, В. Н. Леухин.** Анализ применимости электроискровой подгонки для корректировки функциональной характеристики пленочных резистивных элементов 51
- Е. П. Павлов, Е. Л. Грязина, Ю. М. Зантимилова.** Система показателей качества объемного электромонтажа электронных средств 60
- О. Н. Афонов.** Признаки «горячей» сверхпроводимости в тонкопленочных обкладках конденсатора 73

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

- В. А. Иванов, Н. В. Рябова.** От междисциплинарной олимпиады к научным исследованиям в высокотехнологичных отраслях инновационной экономики России
- А. Н. Леухин.** Новые результаты решения проблемы повышения точности определения координат объекта на Земле (рецензия на монографию) 88
- Указатель материалов, опубликованных в журнале в 2009 году** 90

Информация для авторов

CONTENTS

TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

- V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, I. E. Tsarev, A. V. Kor-kin.** Automatic determination of the signal-to-noise ratio when measuring the scattering function of narrow-band decameter radio channels 3
- E. V. Petuhova, Y. V. Sushentsova, A. Y. Cherny-shev.** Formation and reciprocal transformations of generator and check matrices of linear block codes 13
- V. V. Rozhentsov, T. A. Lezhnina.** The method of determining the eyesight resolution by the light flicker frequency 23

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

- A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev, K. V. Morozovskiy.** Processing of 3D images on the basis of quaternion inverse Fourier transformation 28
- R. G. Hafizov, D. G. Hafizov, S. A. Ohotnikov.** Application of stereographic projection for solving problems of recognition of image contours 36
- R. V. Eruslanov.** Keyboard identification of the user on the basis of the multilinked presentation method 43

ELECTRONICS

- A. A. Nagaev, V. N. Leuhin.** The analyses of applicability of the electro-spark trimming for the correction of the taper of the film resistance elements 51
- E. P. Pavlov, E. L. Gryazina, Y. M. Zantimirova.** The system of quality indices of volumetrical wire-bonding of electronic means 60
- O. N. Afonov.** The signs of «hot» superconductivity in thin film capacitor plates 73

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

- V. A. Ivanov, N. V. Ryabova.** From the interdisciplinary competition to scientific researches in highly technological branches of innovational economics of Russia 84
- A. N. Leuhin.** New results in problem solving of accuracy enhancement of object position determination on the Earth (monograph review) 88
- List of materials Published in MarSTU Reporter in 2009** 90
- Information for the authors** 93

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.371.25;550.388.2

*В. А. Иванов, Н. В. Рябова,
И. Е. Царев, А. В. Коркин*

АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОТНОШЕНИЯ СИГНАЛ – ШУМ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ФУНКЦИИ РАССЕЯНИЯ УЗКОПОЛОСНЫХ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОКАНАЛОВ

Предложен алгоритм выделения компонент шума и сигнала при измерении функции рассеяния узкополосного декаметрового радиоканала, позволяющий адаптировать декаметровые системы передачи данных к параметрам среды распространения сигнала путем сопоставления параметров канала с характеристической поверхностью модема. Представлены результаты анализа эффективности работы алгоритма при различных состояниях среды распространения (ионосферы).

Ключевые слова: зондирующий сигнал с линейной частотной модуляцией, функция рассеяния декаметрового радиоканала, адаптация декаметровых радиосистем, зондирование узкополосных декаметровых радиоканалов.

Введение. В настоящее время одной из актуальных проблем развития инфокоммуникационных систем декаметрового (ВЧ) диапазона является задача существенного повышения надежности и скорости передачи данных без увеличения полосы канала (~3 кГц) при значительном снижении излучаемой мощности. При этом используются созданные в последнее время эффективные методы кодирования [1–3], итеративные методы обработки сигналов [4] и методы диагностики каналов, характеристики которых испытывают достаточно быстрые и случайные изменения во времени. Из-за того, что ВЧ каналы связи являются линейным [5], они могут быть описаны импульсной $h(\tau, t)$ и частотной $H(f, t)$ (где τ – задержка, f – частота, t – текущее время) характеристиками, зависящими от параметров среды распространения (ионосферы). Известно [6–8], однако, что из-за многолучевого приема и случайных вариаций параметров среды эти характеристики случайным образом меняются в зависимости от текущего времени на времени передачи. В связи с этим для описания линейных стохастических каналов стала применяться функция рассеяния [5, 9–14] $S(\tau, F_d)$ (где F_d – доплеровское смещение частоты), являющаяся статистически более устойчивой величиной на этом времени. Кроме того, функция рассеяния канала (ФРК) может быть согласована с харак-

теристиками модемов систем связи, если ее амплитуда измеряется в отношениях сигнал – шум – S/N .

Цель работы – разработка методики и алгоритма автоматического определения отношения сигнал – шум при измерении ФРК на основе данных зондирования узкополосных декаметровых радиоканалов сложными сигналами с линейно-частотной модуляцией.

Аппроксимация ФРК узкополосного канала ВЧ связи. Для узкополосных каналов ВЧ связи ФРК отдельных лучей, как правило, не разрешаются. Поэтому интегральная ФРК может быть аппроксимирована гауссовой поверхностью в виде импульса, в вертикальных сечениях которой, проходящих через вершину, имеем функции Гаусса, а в горизонтальных – эллипсы с осями, направленными по координатным осям: τ, F_d . Такая ФРК имеет следующий аналитический вид:

$$S(\tau, F_d) = \frac{S}{N} \exp \left[-\frac{(\tau - \tau_m)^2}{2\sigma_\tau^2} - \frac{(F_d - F_{dm})^2}{2\sigma_F^2} \right], \quad (1)$$

где σ_τ – уширение (разброс) ФРК по задержке, σ_F – уширение (разброс) ФРК по доплеровскому сдвигу.

Очевидно, что ФРК имеет значимую величину внутри эллипса с полуосями σ_τ и σ_F , который можно представить в виде:

$$\frac{(\tau - \tau_m)^2}{\sigma_\tau^2} + \frac{(F_d - F_{dm})^2}{\sigma_F^2} \leq 1. \quad (2)$$

Отсюда следуют неравенства для аргументов:

$$|\tau - \tau_m| = |\Delta\tau| \leq \sigma_\tau \quad \text{и} \quad |F_d - F_{dm}| = |\Delta F_d| \leq \sigma_F. \quad (3)$$

Согласно выражениям (2) и (3) канальными параметрами являются: $\tau_m, F_{dm}, \frac{S}{N}, \sigma_\tau, \sigma_F$. Из них три последних являются основными.

Основные характеристики модемов ВЧ связи. В настоящее время мерой эффективности работы модемов цифровой ВЧ связи является [15] характеристическая поверхность производительности (ХПП), которая показывает, при каких параметрах канала и с какой скоростью может быть организована передача данных с заданной вероятностью ошибок приема одного бита информации. ХПП принято изображать над плоскостью $\{\sigma_F, \sigma_\tau\}$.

На рис. 1 приведены ХПП для 8PSK-модемов [16], реализующих различные скорости передачи информации при ошибке приема одного бита информации, равной 10^{-3} .

Видно, что ХПП допускает аппроксимацию функцией, представленной на рис. 2, а ее проекция на плоскость $\{\sigma_F, \sigma_\tau\}$ имеет вид прямоугольника.

Аппроксимация ХПП показывает, что для ХПП модема можно ввести три ключевых параметра, порожденных состоянием канала распространения. Это – предельно допустимые значения $\sigma_{0F}, \sigma_{0\tau}, \left(\frac{S}{N}\right)_0$.

Для различных типов каналов могут быть использованы различные типы модемов, ХПП которых могут отличаться ориентацией по осям координат σ_F, σ_τ (см. рис. 3).

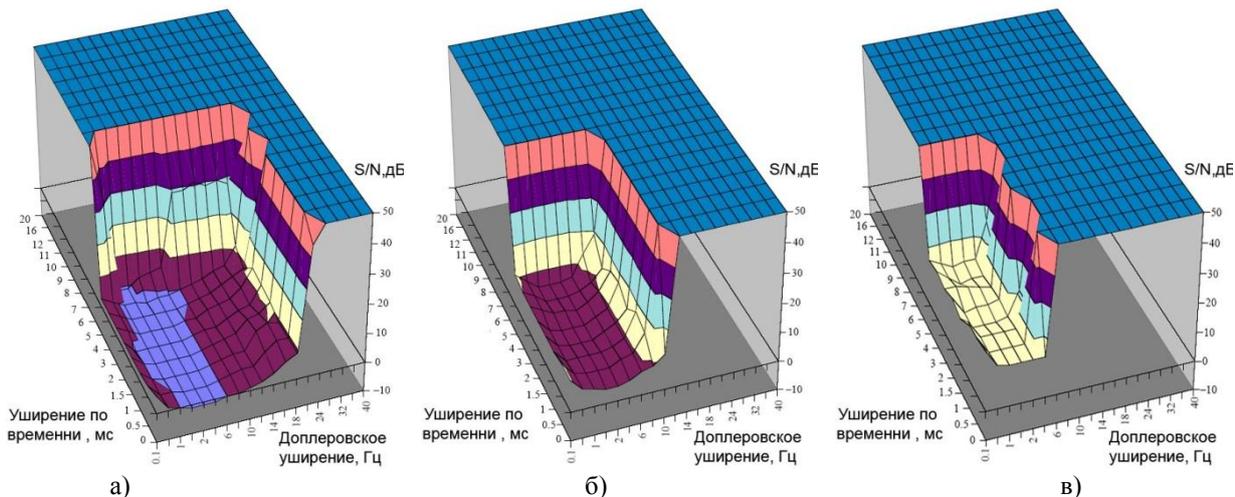


Рис. 1. Характеристические поверхности производительности 8PSK-модемов, реализующих разные скорости передачи информации: а) 300 бит/с; б) 1200 бит/с; в) 2400 бит/с

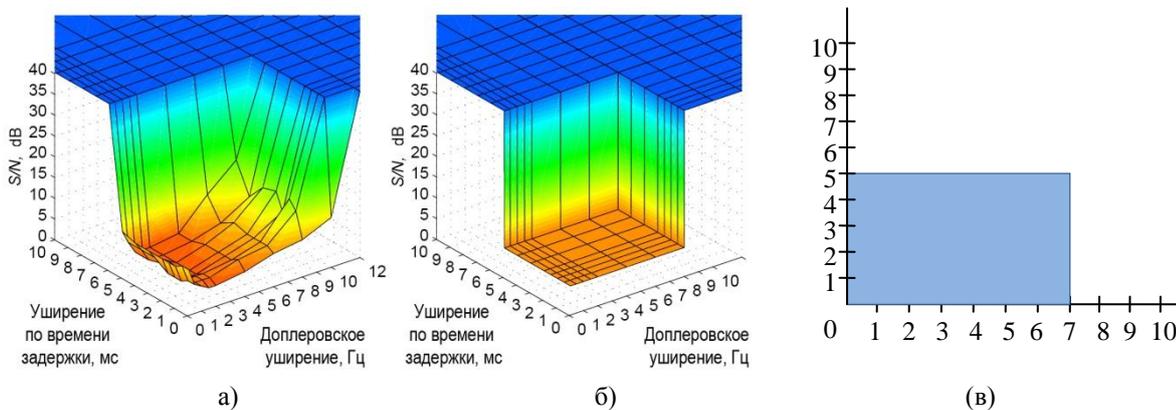


Рис. 2. ХПП – (а), ее аппроксимация – (б) и проекция – (в) на плоскость $\{\sigma_F, \sigma_\tau\}$

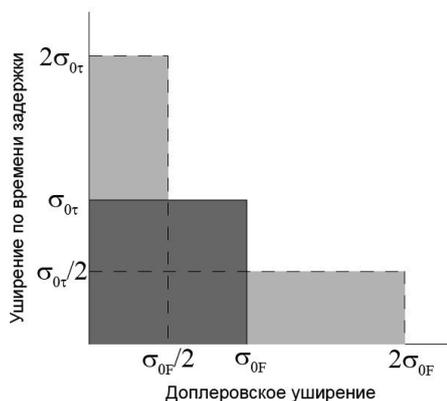


Рис. 3. Проекция ХПП для модемов, работающих при различных условиях распространения связанных сигналов

Алгоритм автоматического определения отношения сигнал – шум. Отметим, что ФРК принято изображать на плоскости $\{\sigma_\tau, \sigma_F\}$. Предположим, что ФРК измеряется в децибелах.

Рассмотрим распределение вероятности множества отсчетов ФРК в вектор-столбцах, заданных условием: $\sigma_\tau = const$. Если в столбце присутствуют только отсче-

ты шума (см. рис. 4 – область, ограниченная линиями 2 и 3), то закон их распределения является одномодальным, а если – смеси сигнала и шума (см. рис. 4 – область, ограниченная линиями 1 и 2), то – бимодальным. Известно [17], что при логарифмическом масштабе отсчетов бимодальность меняет асимметрию закона распределения. Данное свойство использовано нами в разработанном алгоритме обнаружения сигнала на плоскости $\{\sigma_T, \sigma_F\}$.

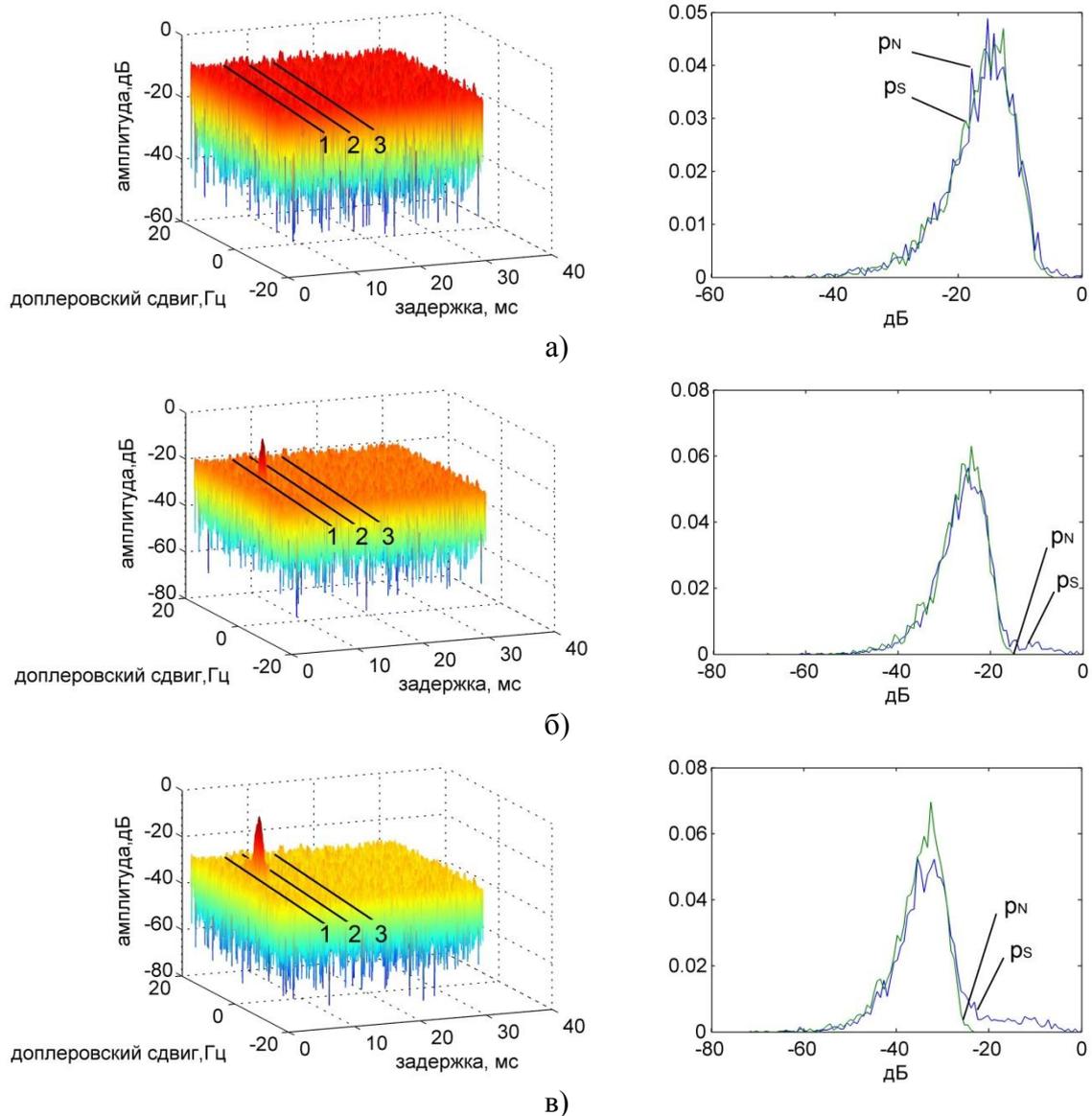


Рис. 4. Распределение плотности вероятности шума и смеси сигнала и шума:

а) – при S/N ; б) – при $2S/N$; в) – при $4S/N$

Кроме того, использованы подходы, применяемые при очистке от шумовой компоненты изображений. В частности, метод пространственной фильтрации изображения.

Итак, алгоритм автоматического разделения сигнала и шума в вектор-столбцах и оценки отношения S/N включает следующие шаги:

1) производится обработка числового массива, заданного на плоскости $\{\sigma_T, \sigma_F\}$, низкочастотным гауссовым фильтром;

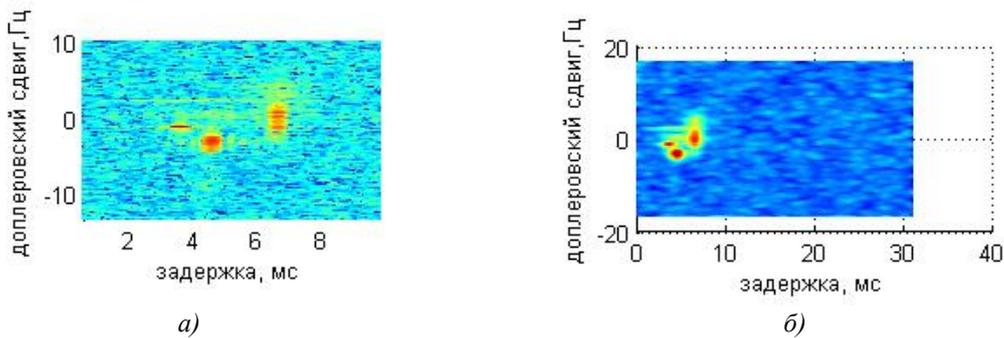


Рис. 5. ФРК: а) – исходная; б) – после фильтрации

2) производится определение области значений массива, в которой присутствует смесь сигнала и шума. Для этого в каждом из столбцов определяется центральный момент 3-го порядка, который является показателем коэффициента асимметрии. На основе данного анализа получается массив M (рис. 6), где k -й элемент массива M является нормированным к единице значением момента 3-го порядка в k -м столбце ФРК;

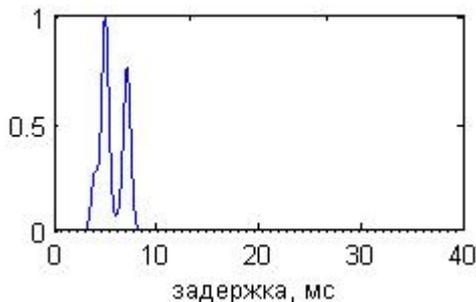


Рис. 6. Зависимость коэффициента асимметрии от задержки

3) из полученной зависимости значений коэффициента асимметрии от задержки – M производится выбор столбцов, в которых присутствует смесь сигнала и шума, для этого сравнивается значение M_k с порогом $\mu = 2\sigma_M$, где σ_M – дисперсия значений элементов массива M . Если значение $M_k > \mu$, то принимается гипотеза, что в k -м

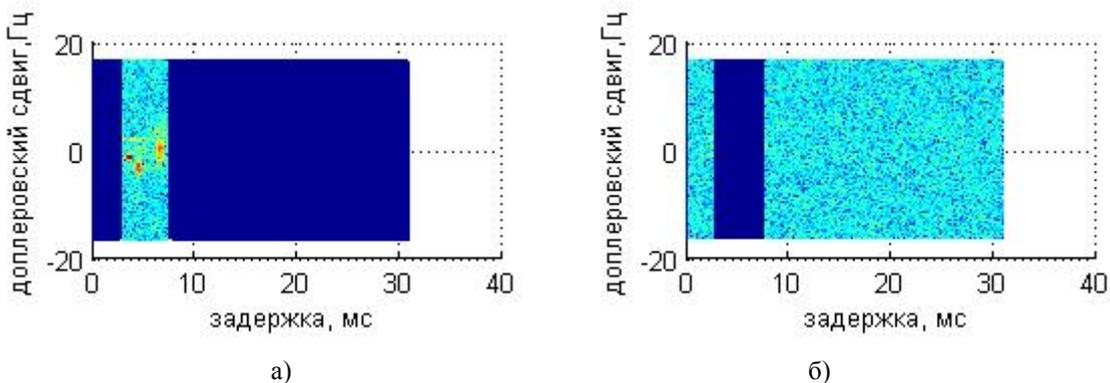


Рис. 7. Массивы данных: а) – S_a ; б) – N_a

столбце содержится сигнал и он копируется в массив S_a (рис. 7, а). Если $M_k < \mu$, то делается гипотеза, что столбец может содержать только шумовые составляющие и он

копируется в массив Na (рис. 7, б). При этом, если выполняется условие $\theta > \frac{\sigma_\tau(1+0,5)}{d\tau}$

(где θ – количество элементов в массиве M , превышающих порог μ ; σ_τ – максимальное уширение по задержке на данной трассе, которое может быть выбрано по рекомендациям Международного союза электросвязи (МСЭ) [16]; $d\tau$ – разрешающая способность по задержке; 0,5 – защитный интервал, равный 50% от σ_τ), то считается, что ФРК содержит только шумовые составляющие и работа данного алгоритма заканчивается. Если же данное условие не выполняется, производится дальнейший анализ массивов Sa и Na ;

4) в массиве Na выбирается такое же количество столбцов, что и в массиве Sa , и строятся плотности распределения вероятностей случайных значений элементов из массивов Sa и Na . В точке пересечения полученных распределений определяется значение порога η , по которому производится обнуление всех составляющих ФРК ниже найденного порога;

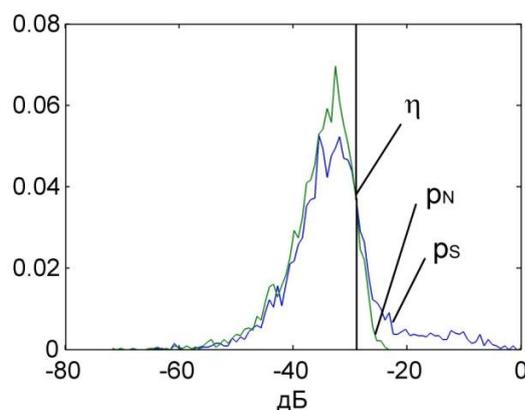


Рис. 8. Распределение вероятностей элементов для массивов Sa и Na

5) после пороговой обработки на ФРК остаются случайные выбросы шумовых компонент (рис. 9, а), поэтому необходимо произвести их фильтрацию. Данная задача решается с помощью низкочастотного медианного фильтра с использованием алгоритма без размытия границ изображения [17]. Результат фильтрации показан на рис. 9, б;

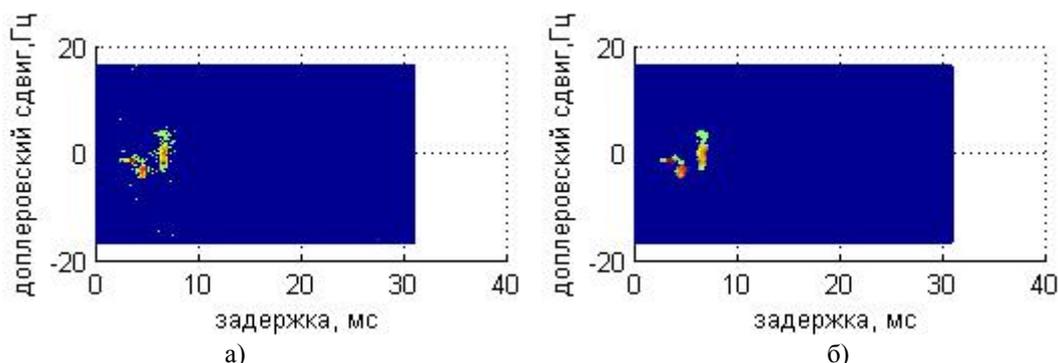


Рис. 9. ФРК: а) – после пороговой обработки; б) – после медианной фильтрации

б) полученный массив представляет собой маску (рис. 9, б), содержащую компоненты сигнала. Остальные компоненты изображения относятся к шуму. На основе анализа первого массива определяются параметры уширения ФРК в частотной и временной областях;

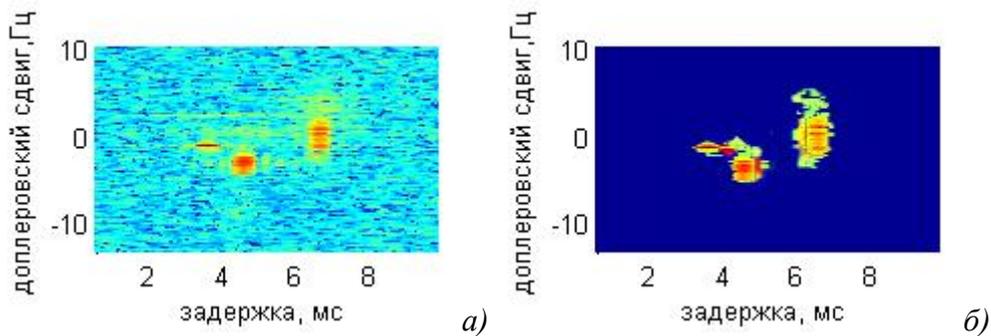


Рис. 10. ФПК: а) – исходное изображение; б) – изображение после фильтрации

7) данная маска используется далее при анализе вариаций во времени импульсных характеристик (ИХ) канала и его шумов. В результате определяется отношение S/N для сигнала канального зонда, которое пересчитывается к входу приемника. Оно может быть использовано для оценки S/N модема системы связи и сравнено с его предельно допустимым значением $(S/N)_0$.

Результаты апробации алгоритма. Работа алгоритма тестировалась с использованием имитатора узкополосного канала [14] ВЧ связи, работающего по методу Ваттерсона [19]. Тестирование проводилось для различных канальных условий по классификации МСЭ. Определялась вероятность правильного обнаружения $p_{об} = \frac{n_{об}}{n}$ от

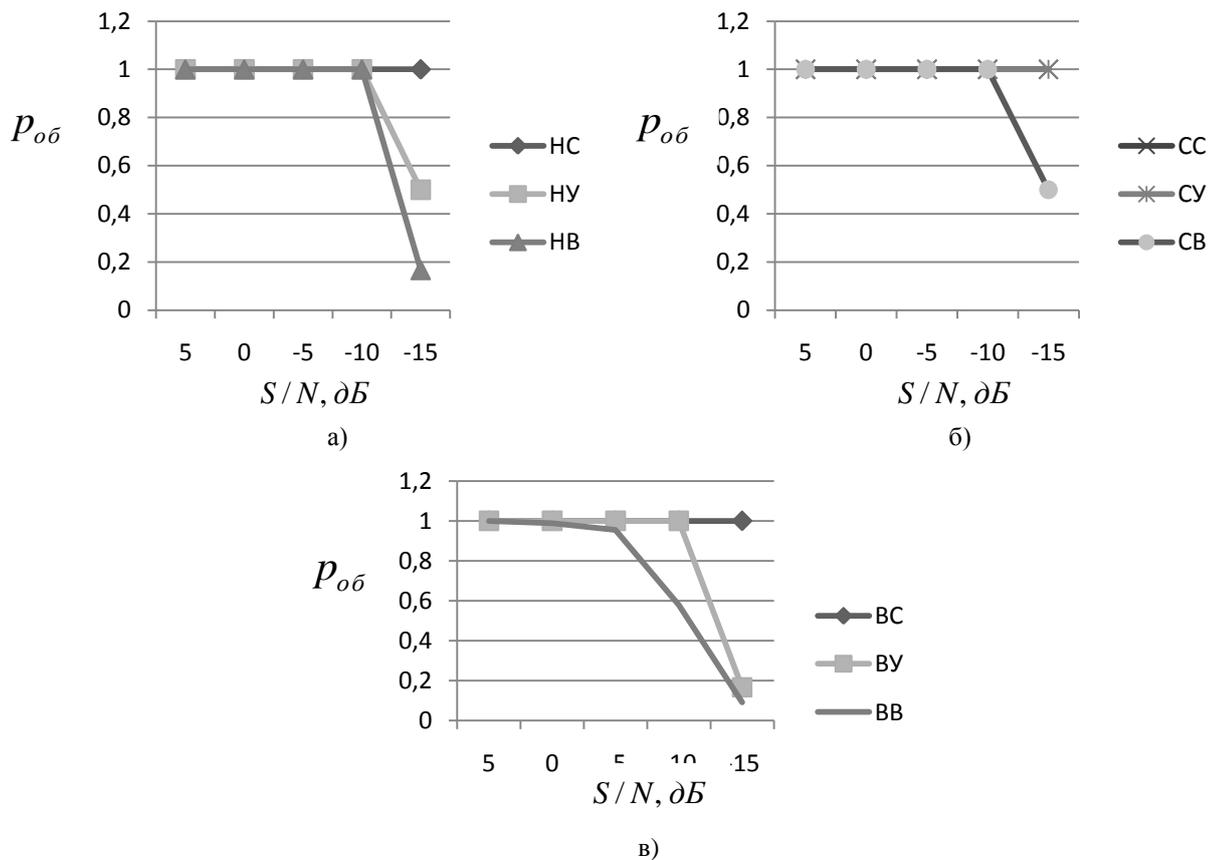


Рис. 11. Зависимость вероятности правильного обнаружения от отношения сигнал – шум: а) – для низкоширотных; б) – для среднеширотных; в) – для высокоширотных радиотрасс

уровня аддитивного шума в канале, где $n_{об}$ – количество сеансов, в которых произошло обнаружение сигнала, n – общее количество сеансов. Анализ проводился для узкополосного декаметрового радиоканала с полосой, равной 3,1 кГц. Для определения ФРК использовался многоэлементный линейно-частотно-модулированный (ЛЧМ) сигнал с длительностью элемента 31 мс и общей длительностью, равной 16 с.

На рис. 11 представлены результаты расчетов, выполненных с использованием разработанного алгоритма. В обозначениях первая буква относится к широте радиотрассы (Н – низкоширотная, С – среднеширотная, В – высокоширотная), а вторая – к условиям распространения сигнала на линии ВЧ связи (С – спокойные, У – умеренные, В – возмущенные).

Видно, что в выбранном диапазоне изменений S/N вероятность правильного обнаружения для каналов с возмущенными условиями распространения падает с уменьшением отношения S/N , а для остальных каналов она остается постоянной.

Экспериментальные оценки отношения сигнал – шум. В экспериментах использовался каналный зонд, разработанный в Марийском государственном техническом университете [12,13]. Эксперименты проводились на среднеширотной трассе протяженностью 5,5 Мм. Наиболее удобной формой для оценок отношения сигнал – шум является сравнение результатов связи и зондирования, пересчитанных ко входу приемников. В [20] показано, что для системы зондирования мощности элемента сигнала на входе и выходе оптимального приемника отличаются в $2B$ раз (где B – база элемента сигнала), а в логарифмическом масштабе на $10 \log(2B)$ дБ. На рис. 12 представлен пример измеренных вариаций во времени импульсной характеристики для трассы г. Хабаровск – г. Йошкар-Ола, а на рис. 13 – соответствующих вариаций S/N . Временные вариации этого отношения свидетельствуют о том, что для получения статистически устойчивой оценки отношения сигнал – шум необходимо усреднение экспериментальных данных на времени измерения ФРК. Среднее значение отношения представлено на рис. 13 горизонтальной линией.

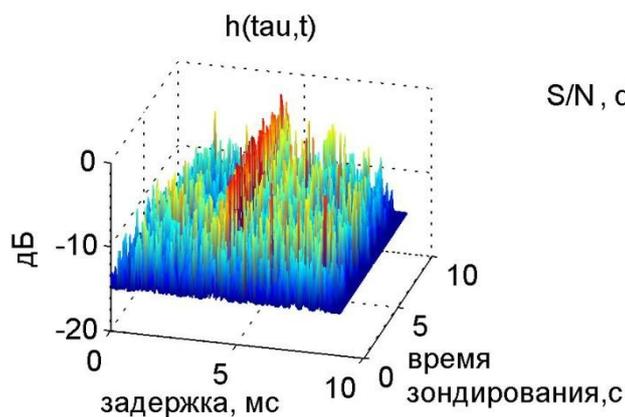


Рис. 12. Импульсная характеристика канала

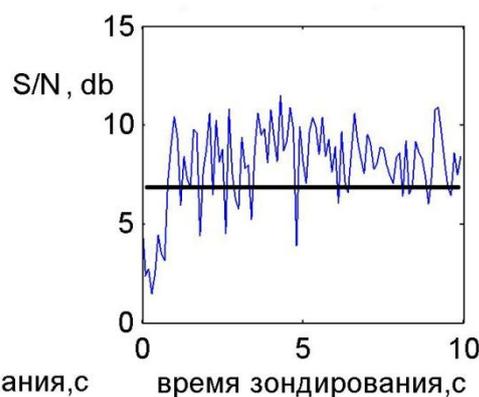


Рис. 13. Оценка S/N системы зондирования

Выводы. Разработан алгоритм автоматического разделения компонент сигнала и шума при измерении функции рассеяния стохастических многолучевых ВЧ радиоканалов при их зондировании многоэлементным ЛЧМ сигналом. Проведена оценка эффек-

тивности работы алгоритма при различных состояниях ионосферы. Показано, что алгоритм эффективен при использовании в спокойных и умеренных канальных условиях, при этом для увеличения вероятности правильного обнаружения для возмущенных каналов требуется увеличивать мощность зондирующего сигнала. Установлено, что для получения статистически устойчивой оценки отношения сигнал – шум экспериментальные данные необходимо усреднять на времени измерения ФРК.

Список литературы

1. Hall, E. K. Design and analysis of turbo codes on Rayleigh fading channels / E. K. Hall, S. G. Wilson // IEEE J. Sel. Areas in Communications. – 1998. – №16(2). – P.160–174.
2. Marsland, I. D. Multiple differential detection of parallel concatenated convolutional (turbo) codes in correlated fast Rayleigh fading / I. D. Marsland, P. T. Mathiopoulos // IEEE J. Sel. Areas in Communications. – 1998. – №16(2). – P.265–275.
3. Vucetic, B. Turbo Codes: Principles and Applications / B. Vucetic, J. Yuan // Kluwer Academic Publishers. – USA, Boston, 2000.
4. Малютин А. А. Разработка канальных протоколов передачи данных для высокоскоростных систем связи КВ диапазона, использующих частотно-эффективные методы модуляции, совмещённые с турбокодированием / А. А. Малютин // Материалы IX Международной конференции «Радиолокация, радионавигация, связь», Воронеж, 2003 г. – Воронеж: ВНИИС, 2003. – Т.2. – С. 775–786.
5. Bello, P. A. Characterization of randomly time-variant linear channels / P. A. Bello // IEEE Trans. – December, 1963. – Vol. CS-11. – No. 4. – P. 360-393.
6. Долуханов, М. П. Распространение радиоволн / М. П. Долуханов. – М.: Связь, 1972.
7. Комарович, В. Ф. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи / В. Ф. Комарович, В. Н. Соунов. – М.: Связь, 1977. – 136 с.
8. Хмельницкий, Е. А. Оценка реальной помехо-защищенности приема сигналов в КВ диапазоне / Е. А. Хмельницкий. – М.: Связь, 1975. – 232 с.
9. Gherm, V. E. Scattering function of the fluctuating ionosphere in the HF band / V. E. Gherm, N. N. Zernov // Radio Science. –1998. – Vol. 33. – P. 1019-1033.
10. Gherm, V. E. Investigation into the problem of characterization of the HF ionospheric fluctuating channel of propagation: construction of a physically based HF channel simulator / V. E. Gherm, N. N. Zernov, H. J. Strangeways // Annals of geophysics, Supplement to vol. 47, N. 2/3, 2004.
11. Иванов, В. А. Функция рассеяния ионосферных каналов высокочастотной связи / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, Д. В. Иванов и др. // Труды XV Международной НТК «Радиолокация, навигация, связь» 14-16 апреля 2009 г. – Воронеж: науч. издат. центр ВГУ, 2009. – Том 2. – С. 647-659.
12. Иванов, В. А. Канальный ионозонд для определения помехоустойчивых узкополосных радиоканалов / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, М. И. Рябова // Инновационные разработки вузовской науки – Российской экономике: сб. статей. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2008. –С. 90-95.
13. Иванов, В. А. Канальный зонд для исследования функций рассеяния ионосферных ВЧ радиоканалов / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, И. Е. Царев и др. // Труды симпозиума XXII-ой Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» 22-26 сентября 2008 г. – Ростов-на-Дону – п. Лоо. – Ростов-на-Дону: Изд-во СКНЦ ВШ ЮФУ АПСН, 2008. – Том 2. – С. 45-48.
14. Иванов, В. А. Численные и полунатурные исследования функции рассеяния узкополосных декаметровых радиоканалов / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, Д. В. Иванов, Е. И. Царев // Электромагнитные волны и электронные системы. – Радиотехника. – 2009. – Том 14, № 8. – С.46-54.
15. Arthur, P. C. Multi-dimensional HF modem performance characterization / P. C. Arthur, M. J. Maundrell // IEE Conf. Publ. No. 411: 7th Int. Conf. on HF Radio Systems and Techniques, IEE, Nottingham, UK, 1997. – Pp. 154–158.
16. Testing of HF Modems with Bandwidths of up to 12 kHz Using Ionospheric Channel Simulators, International Telecommunication Union, Radiocommunication Sector (ITU-R) Recommendation F.1487, 2000.
17. Рябова, Н. В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: Научное издание. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. – 292 с.
18. Стейн, С. Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений / С. Стейн, Дж. Джонс; перевод с англ.; под ред. Л. М. Финка. – М.: Связь, 1971. – 376 с.

19. Watterson, C. C. Experimental Confirmation of an HF Channel Model / C. C. Watterson, J. R. Juroshek, W. D. Bensema // IEEE Trans. On Comm. Tech., Dec. 1970. – Vol. COM-18, No. 6.

20. Кук, Ч. Радиолокационные сигналы. Теория и применение / Ч. Кук, М. Бернфельд; пер. с англ.; под ред. Кельзона В. С. – М.: Советское радио. – 1971. – 567 с.

Статья поступила в редакцию 04.12.09.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты 08-02-12081, 09-07-00331), АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (2009-2010), проект №2.1.3896, ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009-2013), проект П 1740, Фонда содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере (программа «У.М.Н.И.К.» – 2009, проект 6469р/9099).

V. A. Ivanov, N. V. Ryabova,
I. E. Tsarev, A. V. Korkin

AUTOMATIC DETERMINATION OF THE SIGNAL-TO-NOISE RATIO WHEN MEASURING THE SCATTERING FUNCTION OF NARROW-BAND DECAMETER RADIO CHANNELS

The algorithm of the discharge of a noise component and a signal component when measuring the scattering function of a narrow-band decameter radio channel is suggested allowing adapting decameter systems of data communication to the parameters of the signal propagation medium comparing channel parameters with the characteristic surface of the modem. Results of the analyses of algorithm working efficiency at different states of the propagation medium (ionosphere) are presented.

Key words: scattering function of a decameter radio channel, adaptation of decameter radio systems, sounding of narrow-band decameter radio channels.

ИВАНОВ Владимир Алексеевич – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности МарГТУ, заслуженный деятель науки, академик Международной академии технологической кибернетики и Нью-Йоркской АН. Область научных интересов – распространение в ионосфере широкополосных радиосигналов, разработка новых принципов диагностики ионосферы и ионосферных каналов КВ-связи. Автор более 250 публикаций. E-mail: vai@marstu.net.

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 более 130 публикаций, в том числе авторской монографии, монографий в соавторстве, учебного пособия с грифом Министерства образования РФ. E-mail: krts@marstu.net.

ЦАРЕВ Иван Евгеньевич – старший преподаватель кафедры радиотехники и связи МарГТУ. Область научных интересов – моделирование систем радиосвязи декаметрового диапазона, зондирование ионосферных радиоканалов, цифровая обработка сигналов. Автор 21 публикации. E-mail: krts@marstu.net.

КОРКИН Александр Владимирович – студент радиотехнического факультета МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка сигналов. E-mail: krts@marstu.net.

УДК 621.391.25

Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова, А. Ю. Чернышев

ФОРМИРОВАНИЕ И ВЗАИМНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОРОЖДАЮЩИХ И ПРОВЕРОЧНЫХ МАТРИЦ ЛИНЕЙНЫХ БЛОКОВЫХ КОДОВ

Определены основные известные способы получения алфавитов линейных блоковых кодов, их порождающих и проверочных матриц. Показана возможность и описан формальный механизм систематизации кода и обратного внутривблочного перемежения при помощи матриц перестановок. Представлен функционально полный комплекс алгоритмов формирования, систематизации и взаимного преобразования кодовых матриц. Приведены результаты апробации и исследования предложенных алгоритмов.

Ключевые слова: линейный блоковый код, алфавит кода, порождающая матрица кода, проверочная матрица кода, систематический код, каноническая матрица.

Введение. Двоичные линейные блоковые коды, широко применяемые в информационных и телекоммуникационных системах, можно достаточно полно описать при помощи алфавита кода (массива или матрицы кодовых слов), порождающей и/или проверочной матрицы кода [1]. Любой из этих матриц, связанных между собой, достаточно для описания кода и оценки его корректирующих свойств. Но наиболее удобными, как отмечается во множестве публикаций, являются порождающие матрицы. На их основе достаточно просто вычисляются алфавиты кодов [1] и строятся проверочные матрицы [2]. Кроме того, в отличие от алфавитов кодов порождающие и проверочные матрицы более компактны и понятны.

В то же время полный комплекс формально определенных процедур преобразования кодовых матриц известен только для так называемых систематических кодов, описываемых каноническими порождающими матрицами [1]. В работе [2] также предложен и исследован обобщенный алгоритм формирования проверочных матриц по произвольным порождающим. Практический интерес также представляют процедуры (алгоритмы) формирования порождающих матриц на основании проверочных, формирования порождающих матриц по кодовым алфавитам, систематизации кодовых алфавитов и порождающих матриц. Эти процедуры, будучи формально определенными, актуальны на стадиях формирования и применения двоичных линейных блоковых кодов.

Целью данной работы является синтез формализуемых алгоритмов перечисленных выше преобразований и их анализ.

Общая структура алфавитов кодов, порождающих и проверочных матриц

Процедура кодирования при помощи произвольного двоичного линейного блокового кода (ЛБК), обозначаемого (N, K) , описывается выражением

$$\mathbf{x} = \mathbf{b} \otimes \mathbf{G}, \quad (1)$$

где $\mathbf{x} = x_n : x_n \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}$ – выходное кодовое слово длиной N ; $\mathbf{b} = b_k : b_k \in \{0,1\}, k \in \{1, \dots, K\}$ – входное информационное слово длиной K ; $\mathbf{G} = g_{kn} : g_{kn} \in \{0,1\}, k \in \{1, \dots, K\}, n \in \{1, \dots, N\}$ – порождающая матрица двоичного ЛБК размерами $K \times N$; \otimes – операция векторного произведения в двоичном конечном числовом пространстве $GF(2)$, определяемая выражением

$$x_n = \left(\sum_{k=1}^K b_k \cdot g_{kn} \right) \text{ mod } 2, n = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Совокупность кодовых слов \mathbf{x} , соответствующих всем возможным информационным словам \mathbf{b} и вычисляемых в соответствии с (1), образует полный алфавит кода \mathbf{X} .

Порождающая матрица \mathbf{G} в общем случае имеет вид

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} & \dots & g_{1N} \\ g_{21} & g_{22} & \dots & g_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ g_{K1} & g_{K2} & \dots & g_{KN} \end{bmatrix}.$$

На практике чаще всего применяются, а в литературе соответственно чаще всего описываются систематические коды, порождающие матрицы которых имеют каноническую форму записи

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \dots & 0 & p_{1,K+1} & p_{1,K+2} & \dots & p_{1,N} \\ 0 & 1 & \dots & 0 & p_{2,K+1} & p_{2,K+2} & \dots & p_{2,N} \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & p_{K,K+1} & p_{K,K+2} & \dots & p_{K,N} \end{bmatrix} = \mathbf{[I:P]} \quad (3a)$$

или

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} p_{1,1} & p_{1,2} & \dots & p_{1,N-K} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \dots & p_{2,N-K} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \dots & \dots \\ p_{K,1} & p_{K,2} & \dots & p_{K,N-K} & 0 & 0 & \dots & 1 \end{bmatrix} = \mathbf{[P:I]} \quad (3б)$$

Элементы квадратной единичной подматрицы \mathbf{I} обеспечивают прямое транспонирование элементов информационного слова \mathbf{b} в кодовое слово \mathbf{x} , а элементы подматрицы \mathbf{P} определяют порядок формирования проверочных символов кодовых слов на основе информационных символов. Таким образом, произвольное кодовое слово систематического кода имеет вид $\mathbf{x}=(\mathbf{b:p})$ или $\mathbf{x}=(\mathbf{p:b})$, а полный алфавит соответственно можно записать в виде совокупности подматриц $\mathbf{X}=(\mathbf{B:Q})$ или $\mathbf{X}=(\mathbf{Q:B})$, где \mathbf{B} – алфавит информационных слов объемом $2^K \times K$, а \mathbf{Q} – подматрица проверочных символов размерами $2^K \times (N-K)$.

Проверочные матрицы систематических двоичных ЛБК, соответствующие выражениям (3а и 3б), также имеют каноническую форму записи

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} p_{1,K+1} & p_{1,K+2} & \cdots & p_{1,N} \\ p_{2,K+1} & p_{2,K+2} & \cdots & p_{2,N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{K,K+1} & p_{K,K+2} & \cdots & p_{K,N} \\ 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{P} \\ \mathbf{I} \end{pmatrix} \quad (4a)$$

или

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 \\ p_{1,1} & p_{1,2} & \cdots & p_{1,N-K} \\ p_{2,1} & p_{2,2} & \cdots & p_{2,N-K} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ p_{K,1} & p_{K,2} & \cdots & p_{K,N-K} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{P} \end{pmatrix}. \quad (4b)$$

Обозначения элементов подматриц \mathbf{P} в выражениях (4а, 4б) полностью соответствуют обозначениям тех же элементов в выражениях (3а, 3б). Это позволяет упростить процедуру взаимного преобразования матриц. Следует также отметить, что в выражениях (4а, 4б) использована нетрадиционная форма представления проверочных матриц, она соответствует результату транспонирования классически определяемых в литературе проверочных матриц. Однако приведенная форма более удобна с точки зрения описания процедуры вычисления синдромов при декодировании

$$\mathbf{s} = \mathbf{y} \otimes \mathbf{H}, \quad (5)$$

где $\mathbf{s} = \{s_m : s_m \in \{0,1\}, m \in \{1, \dots, N-K\}\}$ – синдром (вектор признаков ошибки) длиной $N-K$; $\mathbf{y} = \{y_n : y_n \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}\}$ – принятое кодовое слово длиной N ; $\mathbf{H} = \{h_{nm} : h_{nm} \in \{0,1\}, n \in \{1, \dots, N\}, m \in \{1, \dots, N-K\}\}$ – проверочная матрица двоичного ЛБК размерами $N \times (N-K)$.

Механизмы формирования и формального описания двоичных ЛБК

При формировании двоичных ЛБК может использоваться три отличных сценария в зависимости от исходной матрицы.

Первый способ основан на использовании в качестве исходной порождающей матрицы кода \mathbf{G} , которая составляется по определенным критериям. На втором этапе в соответствии с (1) формируется алфавит кода \mathbf{X} , а на третьем – проверочная матрица \mathbf{H} . Данный механизм является наиболее универсальным и может, например, использоваться для синтеза кодов с заданными свойствами.

Второй способ предполагает применение в качестве исходной проверочной матрицы \mathbf{H} , также составляемой по определенным правилам. На втором этапе по матрице \mathbf{H} определяется порождающая матрица \mathbf{G} , а затем на основании матрицы \mathbf{G} в соответствии с (1) вычисляются элементы алфавита \mathbf{X} . Такой механизм, в частности, использован при формировании кодов Хэмминга [1].

В основе третьего способа лежит получаемый определенным образом алфавит кода \mathbf{X} . По алфавиту на втором этапе восстанавливается порождающая матрица \mathbf{G} , а затем по ней определяется проверочная матрица \mathbf{H} . Таким образом, например, традиционно формируются коды Адамара [3].

Для реализации описанных механизмов полного формирования кодов требуются следующие явно формализуемые процедуры:

- получения проверочных матриц на основе порождающих матриц для произвольных, в том числе несистематических, ЛБК;
- получения порождающих матриц на основе проверочных матриц для произвольных, в том числе несистематических, ЛБК;
- формирования порождающих матриц на основе алфавита ЛБК.

Поскольку в той или иной явной форме перечисленные процедуры известны для систематических кодов, также представляют интерес алгоритмы систематизации и обратного внутриблочного перемежения (десистематизации) ЛБК относительно алфавитов кодов, порождающих и проверочных матриц.

Систематизация и десистематизация ЛБК

Любой ЛБК обладает следующим структурным свойством: каждое кодовое слово такого кода включает в себя все элементы исходного информационного слова и образуемые на их основе проверочные символы. Исходя из этого, можно утверждать, что любой ЛБК может быть приведен к систематической форме. И наоборот, систематический ЛБК может быть приведен к иному виду за счет внутриблочных перестановок [4]. В конечном итоге систематизация и десистематизация ЛБК сводятся к перестановке столбцов алфавита кода и его порождающей матрицы и строк проверочной матрицы (или столбцов в традиционной форме ее представления). Десистематизацию кода можно описать системой выражений:

$$\begin{aligned}\mathbf{G} &= \mathbf{G}^S \times \mathbf{S}; \\ \mathbf{X} &= \mathbf{X}^S \times \mathbf{S}; \\ \mathbf{H} &= \left(\mathbf{H}^S \right)^T \times \mathbf{S}^T,\end{aligned}\quad (6)$$

где \mathbf{X} , \mathbf{G} , \mathbf{H} – алфавит, порождающая и проверочная матрицы несистематического кода; \mathbf{X}^S , \mathbf{G}^S , \mathbf{H}^S – алфавит, порождающая и проверочная матрицы систематического кода; \mathbf{S} – матрица перестановок размерами $N \times N$. Матрица перестановок должна удовлетворять следующим условиям:

- каждая строка и каждый столбец имеют единичный вес Хэмминга;
- единичный элемент в n -й позиции k -й строки означает, что k -й столбец исходной матрицы должен стать n -м в результирующей матрице.

Процедура систематизации описывается аналогичной системой выражений:

$$\begin{aligned}\mathbf{G}^S &= \mathbf{G} \times \mathbf{S}^S; \\ \mathbf{X}^S &= \mathbf{X} \times \mathbf{S}^S; \\ \mathbf{H}^S &= \left(\mathbf{H} \right)^T \times \mathbf{S}^S \right)^T,\end{aligned}\quad (7)$$

где \mathbf{S}^S – матрица обратных перестановок (матрица систематизации), удовлетворяющая тем же условиям.

Очевидно, что последовательное выполнение операций (6) и (7) над одним и тем же кодом должно привести к исходной матрице, например, для порождающих матриц должно выполняться равенство

$$\mathbf{G} \times \mathbf{S}^S \times \mathbf{S} = \mathbf{G}.$$

Но это равенство выполняется тогда и только тогда, если

$$\mathbf{S}^S \times \mathbf{S} = \mathbf{I}.$$

Это условие можно рассматривать, с одной стороны, как третье требование к матрицам перестановок, а с другой – как механизм взаимного преобразования матриц систематизации и обратных перестановок. Учитывая, что веса Хэмминга всех строк и столбцов матриц \mathbf{S} и \mathbf{S}^S равны 1, их взаимосвязь можно описать выражениями

$$\mathbf{S}^S = \mathbf{S}^{-1} = \mathbf{S}^T; \mathbf{S} = \left(\mathbf{S}^S \right)^{-1} = \left(\mathbf{S}^S \right)^T. \quad (8)$$

Например, порождающая и проверочная матрицы систематического ЛБК (7, 3)

$$\mathbf{G}^S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \text{ и } \mathbf{H}^S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

при помощи матрицы перестановок

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

в соответствии с (6) приводятся к виду

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 0 & p_{11} & 1 & p_{12} & p_{13} & 0 & p_{14} \\ 1 & p_{21} & 0 & p_{22} & p_{23} & 0 & p_{24} \\ 0 & p_{31} & 0 & p_{32} & p_{33} & 1 & p_{34} \end{bmatrix} \text{ и } \mathbf{H} = \begin{bmatrix} p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где p_{km} – элементы подматрицы формирования проверочных символов

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{13} & p_{14} \\ p_{21} & p_{22} & p_{23} & p_{24} \\ p_{31} & p_{32} & p_{33} & p_{34} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Взаимные преобразования порождающих и проверочных матриц

Взаимная связь порождающей матрицы и соответствующей ей проверочной матрицы, ориентированной на синдромное декодирование, определяется условием абсолютного нулевого произведения этих матриц, при котором

$$\mathbf{G} \times \mathbf{H} = \mathbf{0}, \quad (9)$$

т.е. образуется нулевая матрица размерами $K \times (N-K)$. В [2] показано, что (9) выполняется только при взаимном соответствии структур матриц \mathbf{G} и \mathbf{H} . На основании этого составлен и исследован формальный алгоритм получения проверочных матриц произвольных ЛБК по их порождающим матрицам. Этот алгоритм сводится к следующей последовательности действий:

Шаг 1. В порождающей матрице \mathbf{G} выделить подматрицу формирования проверочных символов \mathbf{P} (столбцы подматрицы \mathbf{P} имеют веса Хэмминга больше 1) и последовательно проиндексировать ее элементы.

Шаг 2. Присвоить $s=1$. Считать первый столбец матрицы \mathbf{G} текущим или i -ым.

Шаг 3. Определить вес Хэмминга h_i текущего столбца матрицы \mathbf{G} .

Шаг 4. Если $h_i=1$, то:

а) определить номер строки q , в которой находится единичный элемент текущего столбца;

б) в i -ю строку матрицы \mathbf{H} вставить элементы q -й строки подматрицы \mathbf{P} .

Шаг 5. Если $h_i \neq 1$ ($h_i > 1$), то заполнить i -ю строку матрицы \mathbf{H} нулевыми элементами, за исключением s -го элемента, который сделать единичным. Увеличить переменную s на 1.

Шаг 6. Перейти к следующему столбцу, $i=i+1$ (**шаг 3**).

Аналогичным образом можно получить алгоритм формирования порождающих матриц на основе проверочных. С учетом необходимых изменений алгоритм имеет следующий вид:

Шаг 1. В матрице \mathbf{H} выделить подматрицу \mathbf{P} и последовательно проиндексировать ее элементы.

Шаг 2. Присвоить $s=1$. Считать первую строку матрицы \mathbf{H} текущей или i -й.

Шаг 3. Определить вес Хэмминга h_i текущей строки матрицы \mathbf{H} .

Шаг 4. Если $h_i=1$, то:

а) определить номер столбца q , в котором находится единичный элемент текущей строки;

б) в i -й столбец матрицы \mathbf{G} вставить элементы q -го столбца подматрицы \mathbf{P} .

Шаг 5. Если $h_i \neq 1$ ($h_i > 1$), то заполнить i -й столбец матрицы \mathbf{G} нулевыми элементами, за исключением s -го элемента, который сделать единичным. Увеличить переменную s на 1.

Шаг 6. Перейти к следующей строке, $i=i+1$ (**шаг 3**).

Результаты тестирования программных реализаций рассмотренных алгоритмов подтверждают их состоятельность и практическую применимость. Показательным в данной ситуации является и ранее рассмотренный пример с матрицами \mathbf{G} и \mathbf{H} кода (7, 3).

Формирование порождающей матрицы на основе алфавита кода

Известно, что строками порождающих матриц двоичных ЛБК являются кодовые слова (КС), информационные символы которых, за исключением единственного единичного символа, являются нулевыми [1, 3]. Также установлено, что изменение ЛБК происходит только при перестановке столбцов порождающей матрицы, причем не для всех кодов. При перестановке же строк порождающей матрицы код остается неизменным.

При априорной неизвестности положения информационных символов отбор базовых КС и, следовательно, получение порождающей матрицы кода затруднены. Проведенный анализ показал, что данная процедура наиболее просто реализуется для систематических кодов. Следовательно, основой методики отбора базовых КС должна являться систематизация кода, т.е. приведение алфавита кода к систематической форме.

В канонической порождающей матрице систематического кода (N, K) четко выделяется единичная подматрица размерами $K \times K$. Соответствующий кодовый алфавит имеет вид упорядоченной матрицы размерами $2^K \times N$, начальные K столбцов которой характеризуются частотами, имеющими значения $\nu_k = 2^k - 1$, $k = 1..K$. Под частотью в данном случае понимается количество изменений состояний, а упорядочение осуществляется по абсолютным весам K -разрядных информационных блоков КС с 0 по $2^k - 1$. Зная проведенные при систематизации перестановки столбцов, т.е. фактически структуру матрицы \mathbf{S}^S , можно затем по канонической порождающей матрице в соответствии с (6) восстановить порождающую матрицу исходного кода.

Таким образом, алгоритм формирования порождающей матрицы по алфавиту кода содержит следующие этапы:

- систематизация алфавита кода с одновременным формированием матрицы систематизации \mathbf{S}^S ;
- отбор базисных кодовых слов и составление порождающей матрицы систематического кода \mathbf{G}^S ;
- вычисление матрицы обратных перестановок \mathbf{S} и восстановление порождающей матрицы \mathbf{G} исходного кода.

Полный алгоритм формирования порождающей матрицы на основе систематизации кода и обратной перестановки столбцов матрицы (см. выражения (6) и (8)) имеет следующую структуру:

1. Произвести сортировку алфавита на основании весовых коэффициентов слов, вычисляемых по первым K столбцам по формуле

$$hx_m = \sum_{k=1}^K x_{mk} \cdot 2^{k-1}.$$

2. Определить частоты всех столбцов отсортированного массива кодовых слов.
3. Если частоты первых K столбцов равны $2^k - 1$ для всех k с 1 по K , то перейти к шагу 7.
4. Если частоты некоторых из первых K столбцов совпадают и среди $N - K$ оставшихся столбцов имеются столбцы с недостающими значениями частот, осуществить перестановку соответствующих столбцов, зафиксировав ее в матрице перестановок \mathbf{S}^S , и перейти к шагу 7.
5. Если частоты некоторых из первых K столбцов совпадают и среди $N - K$ оставшихся столбцов нет столбцов с недостающими значениями частот, положить $M = 1$,

осуществить перестановку одного из столбцов с равными частотами и столбца с номером $K+M$, зафиксировав ее в матрице перестановок \mathbf{S}^S .

6. Повторить операции пп. 1–5, увеличивая каждый раз M на единицу, пока не будут достигнуты условия систематического кода или исчерпаны все возможные перестановки.

7. В полученном систематизированном алфавите выделить кодовые слова с весовыми коэффициентами, равными $2k-1$, $k=1..K$, и объединить их в каноническую порождающую матрицу \mathbf{G}^S .

8. Восстановить порождающую матрицу исходного (несистематического) кода \mathbf{G} путем произведения матриц \mathbf{G}^S и матриц $\mathbf{S}=(\mathbf{S}^S)^T$.

Действие данного алгоритма можно рассмотреть на примере несистематического кода с алфавитом

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

Он приводится к систематической форме

$$\mathbf{X}^S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

при помощи матрицы

$$\mathbf{S}^S = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

в результате перестановки столбцов и упорядочения строк. Выборка из 5, 3 и 2 строк матрицы \mathbf{X}^S образует каноническую порождающую матрицу

$$\mathbf{G}^S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}.$$

В результате ее умножения на матрицу обратных перестановок

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

происходит восстановление порождающей матрицы исходного кода \mathbf{G} .

Результаты исследования алгоритма формирования порождающей матрицы

Для полной функциональной проверки и исследования свойств полученного алгоритма была разработана специализированная прикладная программа, в которой реализованы автоматическое и пошаговое выполнение алгоритма. В качестве тестовых ЛБК были использованы коды Адамара (8, 4), (16, 5) и (32, 6). Результаты тестов полностью подтвердили состоятельность и эффективность применения алгоритма.

В процессе исследования алгоритма также установлено, что для кода (8, 4) существует восемь элементарных (одиначных) перестановок столбцов, приводящих к систематизации кода. Для систематизации кода (16, 5) достаточно также одной перестановки столбцов, при этом существует шестнадцать возможных элементарных перестановок. Для систематизации кода (32, 6) требуется уже не менее двух перестановок, и существует девяносто шесть парных комбинаций перестановок. Полученные результаты свидетельствуют о том, что один и тот же линейный блочный код может быть описан несколькими различными порождающими (и соответствующими им проверочными) матрицами.

В процессе исследования алгоритма предварительной систематизации кода замечено интересное свойство ЛБК, заключающееся в том, что в каждом столбце кодового алфавита из 2^K символов половина, т.е. 2^{K-1} , являются нулевыми и столько же единичными. Это даёт возможность выполнять упорядочение кода по произвольным K столбцам матрицы кодовых слов и напрямую получать порождающие матрицы несистематических кодов. Данное свойство, установленное для кодов Адамара, в полной мере присуще также и остальным квазисовершенным ЛБК, у которых веса Хэмминга всех строк порождающих матриц одинаковы. В частности, оно выявлено при анализе простейших кодов с проверкой четности ($K+1$, K) и наиболее сложных кодов (2^{K-1} , K) на основе М-последовательностей.

Заключение. В ходе работы получены следующие результаты.

1. Получены условия систематичности кода, взаимной связи порождающей и проверочной матриц, структуры и взаимной связи матриц перестановок (систематизации и обратного перемежения).

2. Синтезированы и экспериментально проверены алгоритмы:
 - формирования проверочных матриц произвольных линейных блочных кодов на основе их порождающих матриц;
 - формирования порождающих матриц произвольных линейных блочных кодов на основе их проверочных матриц;
 - систематизации кода (алфавита кодовых слов);
 - формирования порождающих матриц по алфавиту кодовых слов.
3. Установлено, что один и тот же линейный блочный код (с фиксированным кодовым алфавитом) может иметь несколько порождающих матриц, отличающихся позициями размещения информационных символов в кодовых словах и правилами формирования проверочных символов.

Список литературы

1. Золотарев, В. В. Помехоустойчивое кодирование: методы и алгоритмы: справочник / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 126 с.
2. Охотникова, Н. М. Обобщенный алгоритм формирования проверочных матриц линейных блочных кодов / Н. М. Охотникова, А. Ю. Чернышев; Марийск. госуд. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2008. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 18.02.08 №133-В2008.
3. Петухова, Е. В. Непосредственное формирование порождающих матриц и практическое применение кодов Адамара / Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова, А. Ю. Чернышев // Вестник МарГТУ. Сер. «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2008. – №2. – С. 42-47.
4. Математическая модель линейного помехоустойчивого кодирования с перемежением символов выходного кода / А. Ю. Чернышев, Н. В. Орлова // Качество подготовки студентов в негосударственном вузе: сб. материалов респ. науч.-практ. конф. – М.–Йошкар-Ола: МФ МОСУ, 2006. – С. 99-101.

Статья поступила в редакцию 01.07.09.

E. V. Petuhova, Y. V. Sushentsova, A. Y. Chernyshev

FORMATION AND RECIPROCAL TRANSFORMATIONS OF GENERATOR AND CHECK MATRICES OF LINEAR BLOCK CODES

The main well-known ways of receiving alphabets of linear block codes, their generator and check matrices are determined. The possibility is shown and the formal mechanism of the systematization of the code and the reverse intrablock alternation with the help of rearrangement matrices is described. Functionally full complex of algorithms of formation, systematization and reciprocal transformation of code matrices is presented. Results of approbation and investigation of suggested algorithms are also presented.

Key words: *linear block code, alphabet of the code, generator matrix of the code, check matrix of the code, systematic code, canonical matrix.*

ПЕТУХОВА Елена Витальевна – студентка радиотехнического факультета МарГТУ. Область научных интересов – защита информации в каналах связи, помехоустойчивое кодирование. Автор двух публикаций. E-mail: krts@marstu.net

СУШЕНЦОВА Юлия Владимировна – студентка радиотехнического факультета МарГТУ. Область научных интересов – защита информации в каналах связи, помехоустойчивое кодирование. Автор двух публикаций. E-mail: krts@marstu.net

ЧЕРНЫШЕВ Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи МарГТУ. Области научных интересов – формирование колебаний и сигналов, сверхширокополосные радиотехнические системы, системы передачи информации, защита информации в каналах связи. Автор 90 научных, научно-методических, учебно-методических работ. E-mail: krts@marstu.net

УДК 612.84.001.8.088

В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗРЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ СВЕТОВЫХ МЕЛЬКАНИЙ

Предложен способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий с использованием двух излучателей, позволяющий повысить точность измерений. Приведены результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: зрительная система, частота световых мельканий, разрешающая способность, точность измерений.

Введение. Зрительная система человека обладает определенной инерционностью. Между моментом воздействия света на сетчатку и моментом возникновения соответствующего зрительного ощущения проходит некоторое время, обозначаемое как время ощущения. В свою очередь, зрительные ощущения не исчезают с прекращением воздействия света на сетчатку, так как при световом воздействии расходуется некоторая доля светочувствительного вещества глаза. На его восстановление требуется некоторое время, происходят и остающиеся после воздействия света восстановительные процессы в зрительных центрах. Время между моментом прекращения воздействия света на сетчатку и моментом исчезновения соответствующего зрительного ощущения обозначается как время восстановления [1–3].

Следствием совместного действия времени ощущения и времени восстановления является критическая частота световых мельканий (КЧСМ), то есть частота мельканий света в секунду, при которой наступает субъективное ощущение слияния световых мельканий и зрительный анализатор воспринимает источник светящимся непрерывно.

Метод КЧСМ находит применение в офтальмологии для оценки функций сетчатки, диагностики глаукомы, катаракты, рассеянного склероза, воспаления и атрофии зрительного нерва и других заболеваний [4–8], в офтальмоэргономике для диагностики зрительного утомления [9–10], в физиологии и гигиене труда и спорта для диагностики работоспособности, умственного и физического утомления, исследования функционального состояния [11–17], в экспериментальной психологии для изучения свойств нервной системы [18–21].

Ранее отмечалось [22], что основным недостатком метода КЧСМ является его низкая точность, обусловленная отсутствием четкого перехода от видимости световых мельканий к их слиянию. Отсутствие такого перехода объясняется, очевидно, неразличением зрительной системой близких частот световых мельканий.

Цель работы – разработка способа определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий.

Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий. Разрешающую способность зрения по частоте световых мельканий в Гц в видимом диапазоне частот можно определить путем нахождения порога различения двух

ближайших частот как минимальной разности $\Delta F = F_2 - F_1$ между «верхней» F_2 и «нижней» F_1 частотами световых мельканий (рис. 1), которая вызывает у испытуемого ощущение их различения.

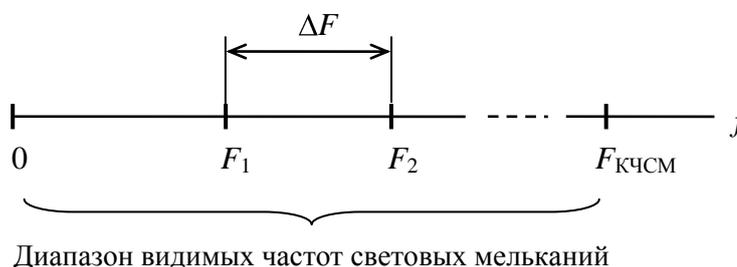


Рис. 1. Порог различения частот световых мельканий

Ранее для определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий авторами предложены способы, когда частоты световых мельканий предъявляются испытуемому с использованием одного излучателя (светодиода):

- с непрерывно изменяемой частотой световых мельканий, когда испытуемому предъявляют световые мелькания с начальной F_H частотой, затем частоту непрерывно увеличивают или уменьшают, пока испытуемый не определит субъективное изменение частоты световых мельканий и не зафиксирует конечное значение F_K частоты, значение разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий определяют как абсолютную разность между конечной и начальной частотами $\Delta F = |F_K - F_H|$ [23];

- с поочередным предъявлением начальной и инкрементной/декрементной частот световых мельканий, когда испытуемому предъявляют с заданным периодом световые мелькания с начальной F_H и инкрементной $F_{\text{и}}$ частотами на первом этапе и с начальной F_H и декрементной $F_{\text{д}}$ частотами на втором этапе, инкрементную и декрементную частоты изменяют, пока испытуемый не определит соответственно порог различения начальной и инкрементной частот $\Delta F_{\text{и}} = F_{\text{и}} - F_H$ и порог различения начальной и декрементной частот $\Delta F_{\text{д}} = F_H - F_{\text{д}}$, значение разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий определяют как среднее арифметическое значений порогов различения начальной и инкрементной и начальной и декрементной частот световых мельканий $\Delta F = (\Delta F_{\text{и}} + \Delta F_{\text{д}}) / 2$ [24];

- с поочередным предъявлением инкрементной и декрементной частот световых мельканий, когда испытуемому предъявляют с заданным периодом световые мелькания с инкрементной $F_{\text{и}}$ и декрементной $F_{\text{д}}$ частотами, которые вначале непрерывно, а на последнем этапе дискретно с шагом $0,1$ Гц изменяют, пока испытуемый не определит порог различения инкрементной и декрементной частот световых мельканий, значение разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий определяют как разность между инкрементной и декрементной частотами $\Delta F = \Delta F_{\text{д}} - \Delta F_{\text{и}}$ [25].

Для определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий предложено предъявлять испытуемому световые мелькания с заданной в видимом диапазоне частот начальной частотой F_H одновременно на двух светодиодах (рис. 2, интервал времени $0-T_1$).

Затем частоту световых мельканий первого светодиода не меняют, частоту световых мельканий второго светодиода непрерывно, со скоростью порядка $0,5$ Гц/с изменяют, увеличивая (рис. 2, а, интервал времени T_1-T_2) или уменьшая (рис. 2, б, интервал

времени T_1-T_2) ее, пока испытуемый не определит различие частот световых мельканий, излучаемых светодиодами (момент времени T_2).

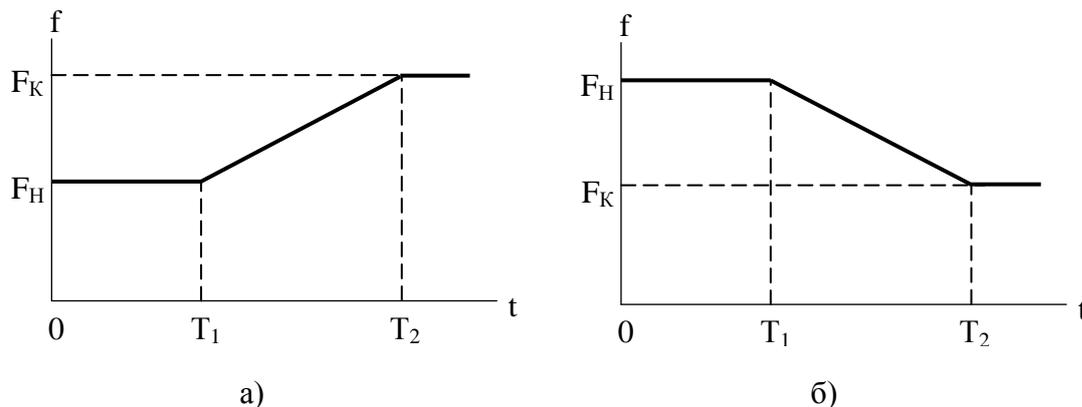


Рис. 2. Временная диаграмма изменения частот световых мельканий

В этот момент испытуемый фиксирует конечную частоту световых мельканий F_K второго светодиода. Величину разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий определяют как абсолютную разность между конечной и начальной частотами второго светодиода по формуле $\Delta F = |F_K - F_H|$ [26].

Результаты исследований и их обсуждение. В обследовании приняло участие 10 предварительно обученных испытуемых в возрасте от 19 до 23 лет с нормальным или скорректированным зрением, которые выполнили, в соответствии с рекомендациями [27], четыре серии по 10 измерений разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий на начальной частоте 15 Гц.

В первой серии измерений для 5 испытуемых начальная частота световых мельканий предъявлялась на одном светодиоде, затем увеличивалась, пока испытуемый не определял различие частот световых мельканий, во второй серии измерений начальная частота световых мельканий уменьшалась. В третьей и четвертой сериях измерений частоты световых мельканий предъявлялись с использованием двух светодиодов. Для других 5 испытуемых порядок выполнения серий измерений был обратным.

Измерения выполнялись бинокулярно в помещении, оборудованном в соответствии с требованиями СНиП 23-05-95 [28] в первой половине дня с 9 до 12 часов с перерывами от 25 до 30 минут на отдых между сериями измерений. Излучателями служили светодиоды желтого цвета диаметром 5 мм с силой света 3 мкд, размещаемые в районе ближней точки ясного видения. Формирование предъявляемых частот световых мельканий, их изменение и определение разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий выполнялось с использованием ПЭВМ Pentium III.

По результатам измерений вычислялись среднеарифметическое значение и среднеквадратическое отклонение значений разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий в каждой серии измерений. Анализ результатов вычислений показал, что различие между индивидуальными значениями среднеарифметических значений, полученное испытуемыми в четырех сериях измерений, статистически недостоверно. Уменьшение случайной составляющей погрешности измерений, определяемое по уменьшению среднеквадратического отклонения, при выполнении измерений с использованием двух светодиодов по сравнению с измерениями, выполненными с использованием одного светодиода, наблюдается для каждого испытуемого и составило по группе от 21 до 48%.

Ощущение, в том числе ощущение различия воспринимаемых частот световых мельканий, есть факт нашего сознания, и ни психология, ни физиология не выработали методов его количественной оценки [29]. Это связано с тем, что зрительная система не формирует внутри себя изображение, так как в ней отсутствует гомункулус, смотрящий на это изображение, а анализирует параметры элементов входного изображения [30]. По этой причине в случае предъявления частот световых мельканий с использованием одного светодиода испытуемый для определения, различаются или не различаются начальная и текущая предъявляемые частоты, обращается к кратковременной логико-смысловой памяти. В предложенном способе световые мелькания предъявляются испытуемому с использованием двух светодиодов, на первом светодиоде предъявляется начальная частота, на втором – инкрементная или декрементная. В этом случае испытуемый для определения, различаются или не различаются одновременно предъявляемые частоты, не обращается к кратковременной логико-смысловой памяти. В результате точность определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий увеличивается.

Выводы. Предложен способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий, позволяющий повысить точность измерений. По результатам экспериментальных исследований точность измерений с использованием двух светодиодов по сравнению с использованием одного светодиода повышается по группе из 10 испытуемых от 21 до 48%.

Список литературы

1. Кравков, С. В. Глаз и его работа. Психофизиология зрения, гигиена освещения / С. В. Кравков. – М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 531 с.
2. Семеновская, Е. Н. Электрофизиологические исследования в офтальмологии / Е. Н. Семеновская. – М.: Медгиз, 1963. – 279 с.
3. Вартамян, И. А. Физиология сенсорных систем: руководство / И. А. Вартамян. – СПб: Изд-во «Лань», 1999. – 224 с.
4. Многотомное руководство по глазным болезням: В 5 т. – Т. 1. – Кн. 1. – История офтальмологии. Анатомия и физиология органа зрения. Оптическая система глаза и рефракция. – М.: Медгиз, 1962. – 519 с.
5. Волкова, И. В. Определение световой чувствительности и КЧСМ при исследовании центрального поля зрения на глаукоанализаторе / И. В. Волкова, В. А. Захаров, И. Н. Чуркина // Глаукома (диагностика, клиника и лечение): сб. науч. трудов. – Л.: 1-й Ленингр. мед. ин-т, 1988. – С. 20-26.
6. Матюшко, Н. Г. Определение критической частоты слияния световых мельканий у больных рассеянным склерозом / Н. Г. Матюшко, С. В. Скицюк // Врачебное дело. – 1990. – № 2. – С. 92-93.
7. Вервельская, В. М. Особенности частотно-критической и частотно-контрастной чувствительности глаза на цвета при атрофии зрительного нерва / В. М. Вервельская, О. А. Лебенкова // Актуальные вопросы социальной офтальмологии: сб. науч. трудов. – М.: ЦИЭТИН, 1988. – Вып. 2. – С. 43-47.
8. Шамшинова, А. М. Функциональные методы исследования в офтальмологии / А.М. Шамшинова, В.В. Волков. – М.: Медицина, 1999. – 416 с.
9. Сомов, Е. Е. Методы офтальмоэргономики / Е. Е. Сомов. – Л.: Наука, 1989. – 157 с.
10. Колбанов, В. В. Функциональная подвижность зрительного анализатора у операторов видеомонтажа / В. В. Колбанов, Е. Б. Степанян, Е. Ф. Аллакаев и др. // Физиология человека. – 1989. – Т. 15. – № 5. – С. 168-170.
11. Вожжова, А. И. Методики изучения функций анализаторов при физиолого-гигиенических исследованиях / А. И. Вожжова. – Л.: Медицина, 1973. – 224 с.
12. Косилов, С. А. Работоспособность человека и пути ее повышения / С. А. Косилов, Л. А. Леонова. – М.: Медицина, 1974. – 240 с.
13. Смирнов, К. М. Особенности труда дежурного персонала тепловой электростанции в ночную смену / К. М. Смирнов, Р. Х. Ахметшин, А. А. Кольцов и др. // Физиология человека. – 1989. – Т. 15. – № 6. – С. 140-142.
14. Никандрова, Л. Р. Физиолого-гигиеническая оценка труда операторов службы «02» / Л. Р. Никандрова, Л. Я. Зыбковец, С. А. Рябов и др. // Медицина труда и промышленная экология. – 1997. – № 10. – С. 44-47.

15. Владимирский, Б. М. Метод обнаружения изменений функционального состояния человека-оператора / Б. М. Владимирский, Л. А. Власкина // Физиология человека. – 1987. – Т. 13. – № 5. – С. 863-865.
16. Петухов, Б. Н. Утомление и адаптационные возможности организма в процессе труда / Б. Н. Петухов, Н. С. Ударова, О. А. Лихачева // Физиология человека. – 1982. – Т. 8. – № 3. – С. 457-462.
17. Новиков, В. С. Психифизиологическая оценка острого физического утомления / В. С. Новиков, А. А. Благинин, Е. Б. Шустов и др. // Физиология человека. – 1995. – Т. 21. – № 2. – С. 24-29.
18. Русалов, В. М. Биологические основы индивидуально-психологических различий / В. М. Русалов. – М.: Наука, 1979. – 352 с.
19. Стрелков, В. Б. О соотношении психодинамики вербальной мнемической функции с силой и лабильностью нервных процессов / В. Б. Стрелков, Г. А. Аминев // Физиология человека. – 1985. – Т. 11. – № 3. – С. 523-525.
20. Кадилов, М. Х. Проявление общих свойств нервной системы в трудовой деятельности оператора перфорации / М. Х. Кадилов // Физиология человека. – 1989. – Т. 15. – № 5. – С. 102-107.
21. Жужгин, С. М. Лабильность зрительного анализатора как показатель функционального состояния человека / С. М. Жужгин, Т. М. Семешина // Физиология человека. – 1991. – Т. 17. – № 6. – С. 147-150.
22. Петухов, И. В. Точность оценки критической частоты световых мельканий и времени восстановления зрительного анализатора / И. В. Петухов, В. В. Роженцов // Биомедицинская электроника. – 2008. – № 5. – С. 24-28.
23. Патент 2195153 РФ, А61В 3/00, 5/16. Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий / В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина. – Опубл. 27.12.2002, Бюл. № 36.
24. Патент 2209027 РФ, А61В 3/00. Способ определения полосы пропускания пространственно-частотного канала зрительной системы / В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина. – Опубл. 27.07.2003, Бюл. № 21.
25. Патент 2209029 РФ, А61В 5/00. Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий / В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина. – Опубл. 27.07.2003, Бюл. № 21.
26. Патент 2357647 РФ, А61В 3/00, А61В 5/16, А61F 9/00. Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий / Роженцов В. В. – Опубл. 10.06.2009, Бюл. № 16.
27. Шайтор, Э. П. Описание стандартной методики измерения критической частоты слияния мельканий / Э. П. Шайтор, А. И. Шабанов, В. М. Ухин // Физиология человека. – 1975. – Т. 1. – № 3. – С. 570-572.
28. СНиП 23–05–95. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы и правила Российской Федерации. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 30 с.
29. Луизов, А. В. Глаз и свет / А. В. Луизов. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 144 с.
30. Мазуров, А. И. Зрительная система как конечное звено систем медицинской интроскопии / А. И. Мазуров // Медицинская техника. – 2006. – № 2. – С. 15-18.

Статья поступила в редакцию 26.11.09.

V. V. Rozhentsov, T. A. Lezhnina

THE METHOD OF DETERMINING THE EYESIGHT RESOLUTION BY THE LIGHT FLICKER FREQUENCY

The method of determining the eyesight resolution by the light flicker frequency using two sources of light and allowing raising of measurements accuracy is proposed. Results of the experimental investigations are presented.

Key words: visual system, light flicker frequency, resolution, measurements accuracy.

РОЖЕНЦОВ Валерий Витальевич – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных средств МарГТУ. Область научных интересов – методы и средства исследования функционального состояния человека, адаптации к внешним воздействиям. Автор 269 публикаций.

E-mail: VRozhentsov@mail.ru

ЛЕЖНИНА Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных средств МарГТУ. Область научных интересов – методы и программно-технические средства исследования временных параметров зрительной системы человека. Автор 75 публикаций.

E-mail: LezhninaTA@mail.ru

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 621.391.266

А. А. Роженцов, А. А. Баев, К. В. Морозовский

ОБРАБОТКА 3D ИЗОБРАЖЕНИЙ НА БАЗЕ КВАТЕРНИОННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ФУРЬЕ

Рассмотрены подходы к обработке пространственных изображений и векторных полей на основе дискретного кватернионного преобразования Фурье. Показана возможность выполнения низкочастотной и высокочастотной фильтрации изображений, выделения границ однородных фрагментов векторных полей. Предложен подход к аппроксимации пространственных изображений и векторных полей, заданных на нерегулярной сетчатке. Разработана методика расчета полей нормалей на основе полученных функциональных описаний.

Ключевые слова: *кватернионный анализ, дискретное кватернионное преобразование Фурье, фильтрации векторных полей, аппроксимация векторных полей, нерегулярная сетчатка, аппроксимация поверхности.*

Введение. При обработке пространственных изображений в ряде случаев возникает необходимость фильтрации векторных полей, например, задающих нормали в отдельных точках поверхности. В зависимости от решаемых задач может выполняться низкочастотная фильтрация, например, для борьбы с шумом, высокочастотная – для выделения границ и сегментации изображений, полосовая и т.п.

Для обработки монохромных изображений в подобных случаях широко применяется обработка в частотной области, базирующаяся на вычислении спектра Фурье изображения и выполнении определенных преобразований в частотной области. Обработка цветных изображений в этом плане представляет определенную сложность, т.к. в каждом цветовом канале обработку приходится выполнять независимо. Для учета взаимного влияния цветовых каналов и использования единого аппарата анализа данных в них, для обработки цветных изображений было предложено использовать кватернионное преобразование Фурье [1].

Близкие задачи возникают при фильтрации пространственных изображений и связанных с ними векторных полей. Для них характерно, что каждый отсчет изображения

или поля является не одномерной, а многомерной (трех- или четырехмерной) величиной, которая может задаваться в виде кватерниона. В связи с этим для обработки подобных объектов также может быть использован аппарат кватернионного преобразования Фурье.

Целью данной работы является разработка методики обработки изображений пространственных объектов и векторных полей на базе кватернионного преобразования Фурье. Как показано в ряде работ [2,3], отсчеты пространственных объектов и трехмерных векторных полей могут задаваться в виде векторных кватернионов, поэтому для их обработки в полной мере может использоваться указанный математический аппарат. В работе решаются **задачи** спектрального анализа кватернионных сигналов, их фильтрации, сегментации пространственных изображений, заданных векторными полями нормалей, обработки изображений, заданной на нерегулярной сетчатке.

1. Дискретное кватернионное преобразование Фурье

Рассмотрим вопросы спектрального анализа векторных полей или изображений, заданных на прямоугольной сетчатке, отсчеты которых заданы в виде кватернионов:

$$Q = \sum_{x,y=0}^{N-1,0..M-1} q_{x,y} = q_{0,x,y} + iq_{1,x,y} + jq_{2,x,y} + kq_{3,x,y} \sum_{x,y=0}^{N-1,0..M-1},$$

где M – размерность изображения по вертикали, N – размерность изображения по горизонтали, i, j, k – мнимые единицы, связанные правилами умножения кватернионов. Компоненты q_1, q_2, q_3 могут задавать проекции векторного поля на оси координат x, y, z , либо заданные параметрически отсчеты трехмерной поверхности. Компонента q_0 , как правило, равна нулю.

В дискретном случае кватернионное преобразование Фурье запишется в следующем виде:

$$\rho_{m,n} = \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} \exp\left\{-j \frac{2\pi}{M} ym\right\} q_{y,x} \exp\left\{-i \frac{2\pi}{N} xn\right\}, \quad m = 0,1,\dots,M-1, \quad n = 0,1,\dots,N-1, \quad (1)$$

где $\rho_{m,n}$ – компоненты спектра, $q_{y,x}$ – отсчеты изображения или векторного поля, представленные в виде кватернионов.

Обратное дискретное кватернионное преобразование Фурье записывается в виде:

$$q_{y,x} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} ym\right\} \rho_{m,n} \exp\left\{i \frac{2\pi}{N} xn\right\}, \quad y = 0,1,\dots,M-1, \quad x = 0,1,\dots,N-1. \quad (2)$$

В литературе [4] рассматривается одна из разновидностей кватернионного преобразования Фурье – правостороннее кватернионное преобразование Фурье. Для него прямое и обратное преобразование записывается в виде:

$$\rho_{m,n} = \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} q_{y,x} \exp\left\{-i \frac{2\pi}{N} xn\right\} \exp\left\{-j \frac{2\pi}{M} ym\right\}, \quad m = 0,1,\dots,M-1, \quad n = 0,1,\dots,N-1, \quad (3)$$

$$q_{y,x} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \rho_{m,n} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} ym\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{N} xn\right\}, \quad y = 0,1,\dots,M-1, \quad x = 0,1,\dots,N-1. \quad (4)$$

По аналогии может быть введено и левостороннее кватернионное преобразование Фурье:

$$\rho_{m,n} = \sum_{y=0}^{M-1} \sum_{x=0}^{N-1} \exp\left\{-i \frac{2\pi}{N} xn\right\} \exp\left\{-j \frac{2\pi}{M} ym\right\} q_{y,x}, \quad m = 0,1,\dots,M-1, \quad n = 0,1,\dots,N-1, \quad (5)$$

$$q_{y,x} = \frac{1}{MN} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} ym\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{N} xn\right\} \rho_{m,n}, \quad y = 0,1,\dots,M-1, \quad x = 0,1,\dots,N-1. \quad (6)$$

Последнее представление наиболее удобно, поскольку позволяет, как будет показано далее, решать задачи обработки кватернионных сигналов, заданных на нерегулярной сетчатке, и в дальнейшем будет использоваться именно такой вид преобразования.

Рассмотрим возможность применения дискретного кватернионного преобразования для решения типовых задач обработки трехмерных изображений.

2. Низкочастотная фильтрация векторных полей

При низкочастотной фильтрации производится подавление высших гармоник в кватернионном спектре сигнала. В этом случае обратное кватернионное преобразование Фурье вычисляется согласно соотношению:

$$q_{y,x} = \frac{1}{MN} \left[\sum_{m=0}^{M_0-1} \sum_{n=0}^{N_0-1} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} ym\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{N} xn\right\} \rho_{m,n} + \sum_{m=M-M_0-1}^{M-1} \sum_{n=N-N_0-1}^{N-1} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} ym\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{N} xn\right\} \rho_{m,n} + \sum_{m=0}^{M_0-1} \sum_{n=N-N_0-1}^{N-1} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} ym\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{N} xn\right\} \rho_{m,n} + \sum_{m=M-M_0-1}^{M-1} \sum_{n=0}^{N_0-1} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} ym\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{N} xn\right\} \rho_{m,n} \right], \quad (7)$$

где M_0, N_0 – количество низших гармоник, попадающих в окно прозрачности фильтра.

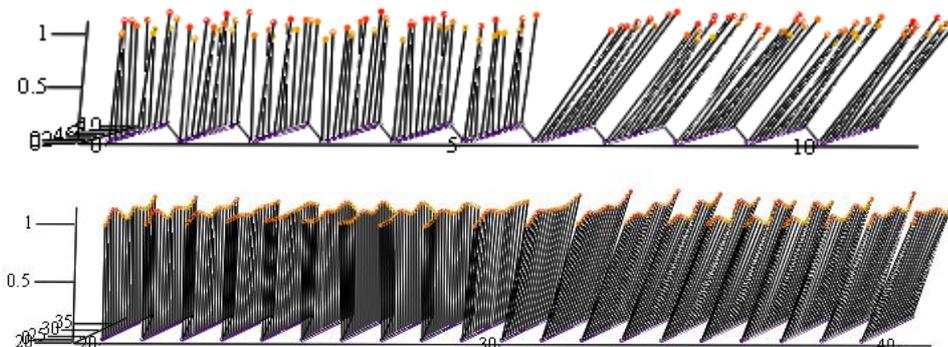


Рис. 1. Пример низкочастотной фильтрации векторного поля на базе кватернионного преобразования Фурье

На рис. 1 приведен пример результата низкочастотной фильтрации векторного поля. Видно, что в результате фильтрации произошло значительное сглаживание флуктуационных шумов.

3. Высокочастотная фильтрация векторных полей

При высокочастотной фильтрации производится подавление низших гармоник в кватернионном спектре сигнала. В этом случае обратное кватернионное преобразование Фурье вычисляется согласно соотношению:

$$q_{y,x} = \frac{1}{MN} \left[\sum_{m=M_0}^{M-M_0-1} \sum_{n=N_0}^{N-N_0-1} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} ym\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{N} xn\right\} \rho_{m,n} \right], \quad (8)$$

где M_0 , N_0 – количество низших гармоник, не попадающих в окно прозрачности фильтра.

Для выделения границ однородных фрагментов векторного поля необходимо вычислять градиент функции:

$$\nabla q_{y,x} = i \frac{\partial q_{y,x}}{\partial x} + j \frac{\partial q_{y,x}}{\partial y}.$$

На рис. 2 приведен пример исходного векторного поля и модуль градиента функции, задающей это поле. Из рисунка видно, что на границе однородных фрагментов поля наблюдается максимум функции $|\nabla q_{y,x}|$, что позволяет выделять однородные фрагменты векторного поля.

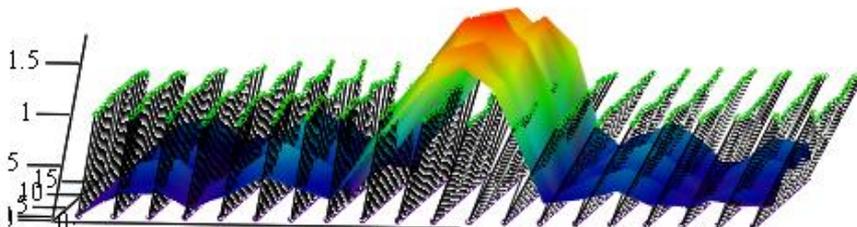


Рис. 2. Векторное поле и модуль его градиента

Из рисунка видно, что в результате высокочастотной фильтрации произошло подчеркивание неоднородностей векторного поля на границе плоскостей, имеющих различные параметры. Это позволяет выполнить их выделение и независимую от остальных объектов дальнейшую обработку.

4. Аппроксимация векторных полей, заданных на нерегулярной сетчатке

Задача аппроксимации векторных полей решается в случае, когда исходное векторное поле задано на нерегулярной сетчатке. Это часто встречающийся на практике случай, поскольку при сканировании трехмерных объектов возможно выпадение отдельных фрагментов изображения, зачастую необходим переход от полярной к декартовой системе координат и т.п. При этом точки поверхности изображения не попадают в узлы сетчатки. В результате применение разного рода пространственных фильтров сопряже-

но со значительными трудностями, связанными с формированием апертуры фильтра. Так, при низкочастотной фильтрации, связанной с усреднением координат точек, приходится формировать строб и определять принадлежность каждой точки поверхности этому стробу. Формирование высокочастотного фильтра, необходимого для выделения границ трехмерных объектов, сопряжено с еще большими сложностями, поскольку строб такого фильтра может содержать несколько подстробов.

В связи с этим актуальной является задача разработки методики аппроксимации поверхностей 3D объектов и векторных полей, заданных на нерегулярной сетчатке.

Предлагаемый подход базируется на вычислении коэффициентов Фурье по отсчетам функции, заданной на нерегулярной сетчатке. Непосредственное вычисление этих коэффициентов по известным формулам для прямого преобразования Фурье не представляется возможным из-за неортогональности базисных функций, когда их отсчеты берутся в произвольных точках. Решение в данном случае может быть основано на использовании метода наименьших квадратов. При этом весовые коэффициенты базисных функций определяются из соотношений:

$$\begin{aligned} \rho &= \mathbf{A}'^{-1} \mathbf{B}, \\ \mathbf{A}' &= \overline{\mathbf{A}}^T \mathbf{A}, \\ \mathbf{B} &= \overline{\mathbf{A}}^T \mathbf{Q}, \end{aligned} \quad (9)$$

где \mathbf{A} – матрица значений отсчетов базисных функций в точках, соответствующих положениям отсчетов сигнала, \mathbf{Q} – вектор отсчетов обрабатываемого сигнала. В случае левостороннего кватернионного преобразования Фурье матрица \mathbf{A} формируется следующим образом:

$$\begin{aligned} A_{n,l+mL} &= \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} m y_{q_n}\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{L} l x_{q_n}\right\}, \quad l = -L/2, -L/2 - 1, \dots, L/2 - 1, \\ m &= -M/2, -M/2 - 1, \dots, M/2 - 1, \quad n = 0, 1, \dots, N - 1. \end{aligned}$$

L – размерность аппроксимированного изображения по горизонтали, M – размерность аппроксимированного изображения по вертикали, x_{q_n} и y_{q_n} – координаты точки на плоскости, в которой расположен вектор q_n .

Аппроксимированные отсчеты функции в точке с произвольными координатами x , y могут быть найдены из соотношения:

$$p_{x,y} = \sum_{l=0}^{L-1} \sum_{m=0}^{M-1} \exp\left\{j \frac{2\pi}{M} m y_{q_n}\right\} \exp\left\{i \frac{2\pi}{L} l x_{q_n}\right\} \rho_{l+mX}, \quad x \in \left[-L/2, L/2 \right], \quad y \in \left[-M/2, M/2 \right]. \quad (10)$$

На рис. 3 приведен пример компонент исходного векторного поля, содержащего 100 отсчетов, заданных на нерегулярной сетчатке, соответствующий ему амплитудный спектр, результат аппроксимации компонент векторного поля, заданный на регулярной сетчатке размерностью 100*100 элементов.

Как видно из рисунка, предложенный подход обеспечивает возможность спектрального анализа кватернионных сигналов, расположенных на нерегулярной сетчатке и аппроксимации отсчетов этих сигналов.

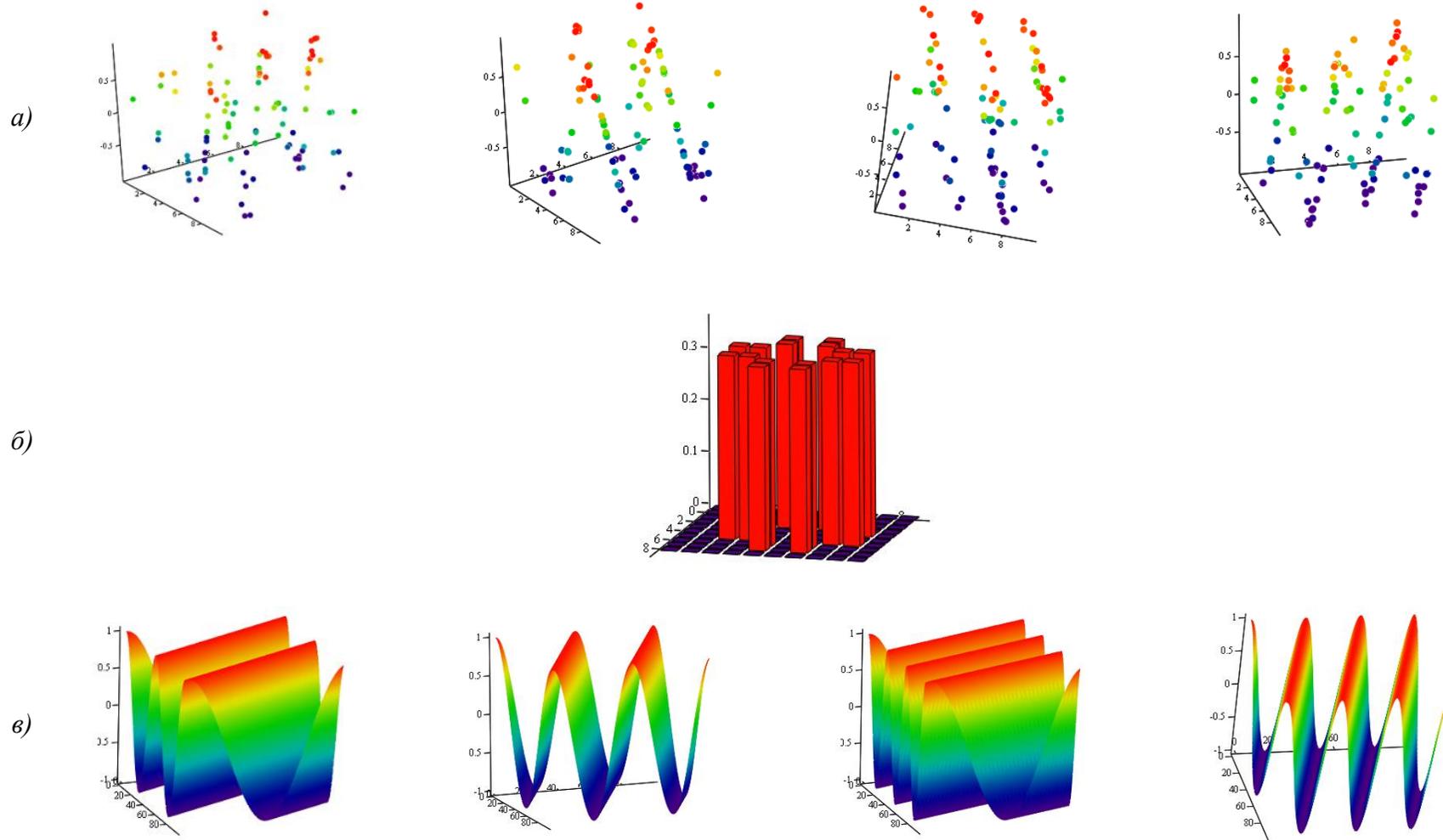


Рис. 3. Аппроксимация векторных полей: а) компоненты исходного векторного поля, содержащего 100 отсчетов, заданных на нерегулярной сетчатке; б) амплитудный спектр, соответствующий точечному полю; в) результат аппроксимации поверхности, заданный на регулярной сетчатке размером 100*100 элементов

На рис. 4 приведены примеры аппроксимации точечного поля, задающего две плоскости, расположенные под углом $5,7^\circ$, и поля нормалей, соответствующих этой сцене.

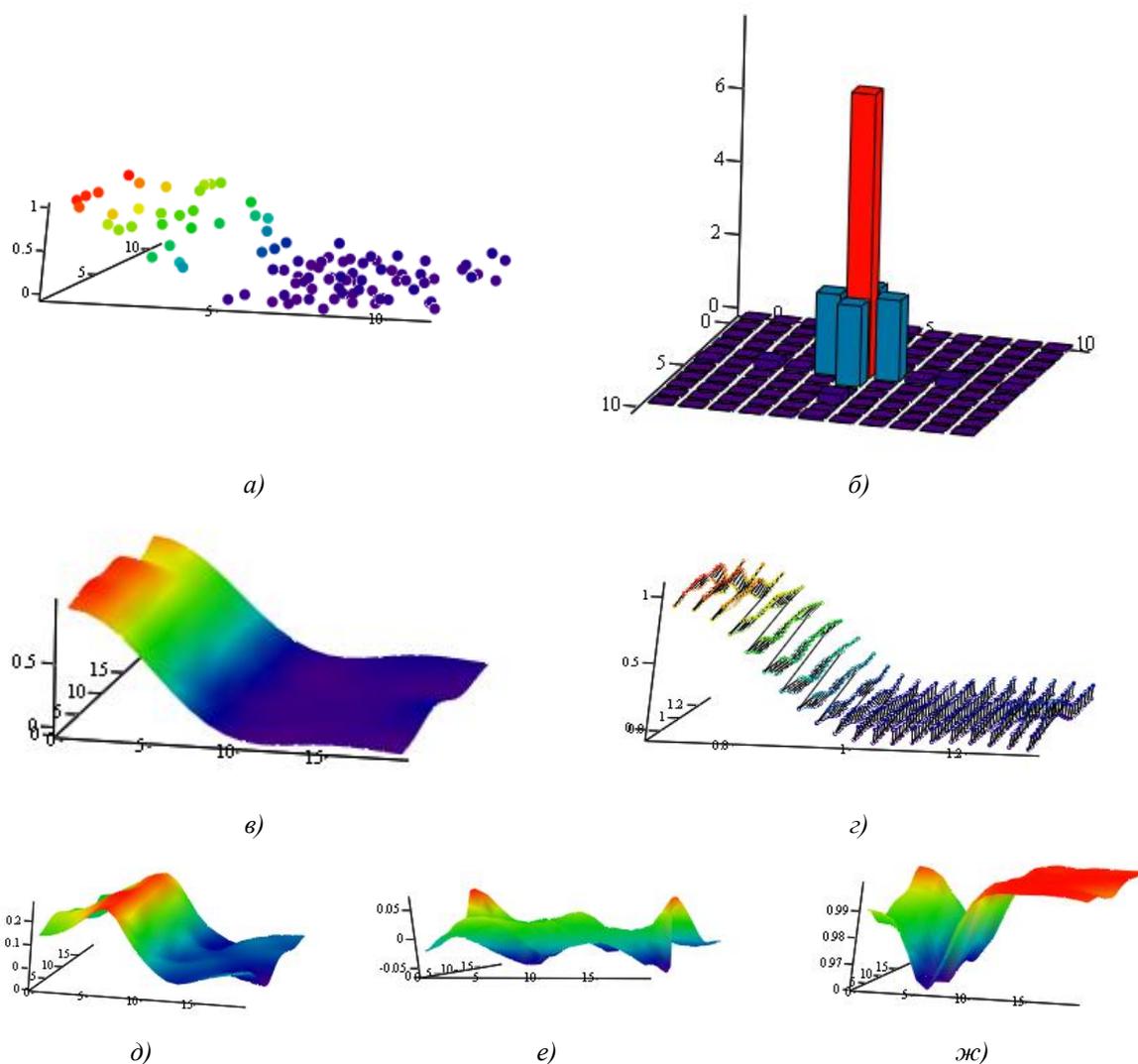


Рис. 4. Формирование векторного поля нормалей по точечной сцене, заданной нерегулярными отсчетами: а) исходная точечная сцена (100 точек); б) амплитудный спектр; в) аппроксимированная поверхность; г) векторное поле; д), е), ж) компоненты x , y , z векторного поля

Из рисунка видно, что в результате аппроксимации по 11 гармоникам произошло сглаживание флуктуационных шумов. Полученные результаты могут использоваться для построения поля нормалей непосредственно по аппроксимированной поверхности без использования алгоритмов, основанных на формировании множества ближайших точек [5].

Заключение. В работе рассмотрены подходы к обработке пространственных изображений и векторных полей на основе дискретного кватернионного преобразования Фурье. Показана возможность выполнения низкочастотной и высокочастотной фильтрации изображений, выделения границ однородных фрагментов векторных полей. Предложен подход к аппроксимации пространственных изображений и векторных полей, заданных на нерегулярной сетчатке. Разработана методика формирования полей

нормалей к трехмерным поверхностям на основе полученных функциональных описаний, не требующая перебора точек в исходном изображении.

Список литературы

1. *Felsberg, M.* Fast Algorithms of Hypercomplex Fourier Transforms / M. Felsberg, Th. Bulov, G. Sommer, V. M. Chernov // G. Sommer (Eds) Geometric Computing with Clifford Algebras. – Springer Verlag, 2000. – P.231–254.
2. *Кантор, И. А.* Гиперкомплексные числа / И. А. Кантор, А. С. Солодовников. – М.: Наука, 1973. – 145 с.
3. *Фурман, Я. А.* Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кривецкий, А. А. Роженцов и др.; Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Физматлит, 2004. – 456 с.
4. *Hitzer, E.* Quaternion Fourier Transform on Quaternion Fields and Generalizations, Adv. in App. Cliff. Alg., 17. – 2007. – Pp. 497–517.
5. *Фурман, Я. А.* Проволочная модель пространственного группового точечного объекта / Я. А. Фурман, К. Б. Рябинин, М. И. Красильников // Автометрия. – 2008. – №3. – С. 3–16.

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

Статья поступила в редакцию 23.11.09.

A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev, K. V. Morozovskiy

PROCESSING OF 3D IMAGES ON THE BASIS OF QUATERNION INVERSE FOURIER TRANSFORMATION

Approaches to the processing of spatial images and vector fields on the basis of the discrete quaternion inverse Fourier transformation are examined. The possibility of fulfillment of low frequency and high frequency filtration of images, marking limits of homogeneous fragments of vector fields is demonstrated. The approach to approximation of spatial images and vector fields set on an irregular retina is suggested. The methods of the calculation of the fields of normals on the basis of received functional descriptions are elaborated.

Key words: *quaternion analyses, discrete quaternion inverse Fourier transformation, filtration of vector fields, approximation of vector fields, irregular retina, approximation of the surface.*

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

E-mail: krtmbs@marstu.net

БАЕВ Алексей Александрович – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор 15 публикаций.

E-mail: krtmbs@marstu.net

МОРОЗОВСКИЙ Кирилл Валерьевич – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов.

E-mail: krtmbs@marstu.net

УДК 621.391.266

Р. Г. Хафизов, Д. Г. Хафизов, С. А. Охотников

ПРИМЕНЕНИЕ СТЕРЕОГРАФИЧЕСКОЙ ПРОЕКЦИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ РАСПОЗНАВАНИЯ КОНТУРОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Представлен подход к улучшению качества распознавания контуров изображений, основанный на применении стереографической проекции. Получены характеристики распознавания контуров, заданных на комплексной и расширенной комплексной плоскости.

Ключевые слова: *распознавание контуров изображений, сфера Римана, стереографическая проекция, функции комплексного переменного, векторный кватернион.*

Введение. В работах [1, 2] рассмотрены подходы к обработке изображений, основанные на обработке контуров изображений, которые содержат информацию о форме объекта, его масштабе и угловом положении. Контуров изображений полностью характеризуют их форму и позволяют создать простые аналитические описания, инвариантные к переносу, повороту и масштабированию изображений. Рассмотрение контуров изображений как комплекснозначных сигналов и представление их в линейном комплекснозначном пространстве позволяет получить меру близости двух контуров в виде их скалярного произведения, инвариантную к преобразованиям переноса, поворота и масштабирования. Особый интерес вызывает вопрос применения в качестве базы теории комплексной переменной для обработки и анализа контуров изображений. Теория аналитических функций комплексного переменного представляет множество полезных математических моделей. Многие математические теоремы упрощаются, если рассматривать действительные переменные как частный случай комплексных переменных.

Для случая дискретных изображений контур задается на плоскости S точками, соединенными векторами $\gamma_{(n)}$, $n = 0, 1, \dots, s-1$. Каждой точке сопоставляется комплексная координата $\gamma_1 + i\gamma_2$. Таким образом, если для любого натурального числа $n = 0, 1, \dots, s-1$ указано комплексное число $\gamma_{(n)} = \gamma_1_{(n)} + i\gamma_2_{(n)}$, т. е. задана последовательность:

$$G = \{\gamma_{(0)}, \gamma_{(1)}, \dots, \gamma_{(s-1)}\} = \{\gamma_1_{(0)} + i\gamma_2_{(0)}, \gamma_1_{(1)} + i\gamma_2_{(1)}, \dots, \gamma_1_{(s-1)} + i\gamma_2_{(s-1)}\},$$

то в этом случае мы имеем дело с комплексной дискретной переменной, заданной на плоскости S комплексного дискретного переменного γ (рис. 1).

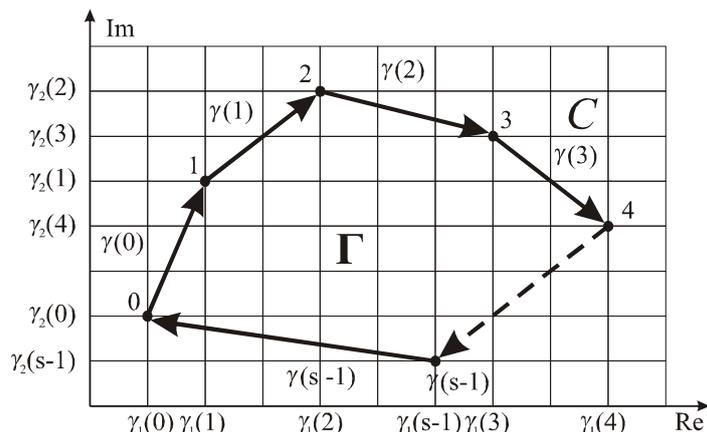


Рис. 1. Контур Γ на плоскости C комплексного переменного γ

Представление контуров изображений в виде функций комплексной переменных позволяет привлечь для их анализа и обработки теорию функции комплексной переменной. Так, например, процесс формирования наблюдаемого контура Γ^C путем растяжения исходного контура Γ в |μ| раз, поворотом на угол Δφ и сдвигом начальной точки на d ЭВ [1], т.е.

$$\Gamma^C = \left\{ \mu \gamma + d \right\} \exp i \left\{ \arg \mu + \Delta \varphi \right\} \Big|_{\gamma \in \Gamma}$$

может быть описан как частный случай дробно-линейного отображения вида

$$v = \frac{a\gamma + b}{c\gamma + d}, \quad \Delta = ad - bc \neq 0.$$

Данное дробно-линейное отображение устанавливает взаимно однозначное соответствие между точками γ-плоскости и точками v-плоскости. Отображение v = aγ + b, где a = a₁ + ia₂ и b = b₁ + ib₂, – произвольные комплексные числа, соответствует вращению на угол arg a, растяжению в |a| раз и параллельному сдвигу на вектор b.

Целью данной работы является анализ возможности применения стереографической проекции для решения задач распознавания контуров изображений.

1. Расширенная плоскость комплексного переменного

Плоскость комплексного переменного C может быть дополнена одной несобственной бесконечно удаленной точкой. В этом случае плоскость C называется расширенной плоскостью комплексного переменного C̄ [3]. Подобное расширение позволяет изображать комплексные числа точками на сфере.

Пусть S – сфера радиуса R, касающаяся комплексной плоскости C в точке γ = 0, и P – точка сферы, диаметрально противоположная точке 0 (рис. 2). Каждой точке γ ∈ C взаимно однозначно можно поставить в соответствие точку q ∈ S, являющуюся точкой пересечения сферы S с отрезком Pγ. Данное соответствие называется стереографической проекцией, S комплексной сферой (или сферой Римана) [3].

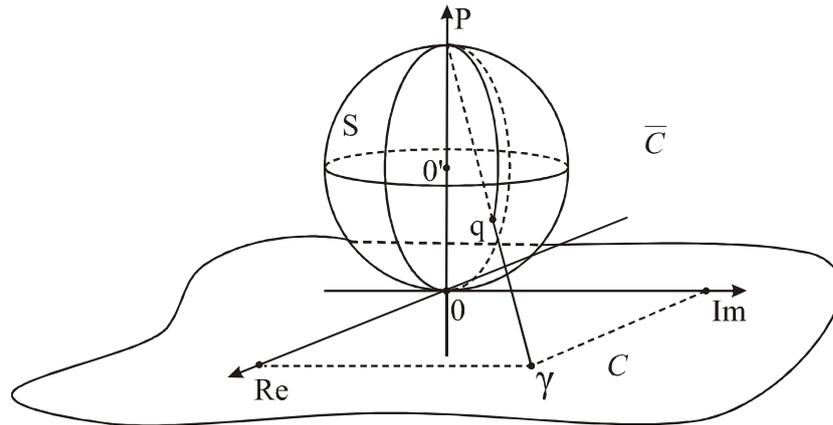


Рис. 2. Расширенная плоскость комплексного переменного

Комплексное число $\gamma = \gamma_1 + i\gamma_2$ изображается на плоскости C точкой γ с координатами γ_1 и γ_2 , а на сфере S – точкой q с координатами q_1, q_2, q_3 . Для описания положения точки q в пространстве может быть использован векторный кватернион

$$q = q_1i + q_2j + q_3k,$$

где i, j и k – мнимые единицы. Совокупность кватернионов $q \in \mathbb{H}_s, n = 0, 1, \dots, s-1$ образует кватернионный сигнал $Q = \{q_n\}_{n=0}^{s-1}$ [2].

Пространственный дискретный контур $D = \{d_n\}_{n=0}^{s-1}$ определяется как первая разность векторов, задаваемых мнимыми кватернионами КТС $Q = \{q_n\}_{n=0}^{s-1}$ [2]:

$$D = \{d_n\}_{n=0}^{s-1} = \Delta q \{q_n\}_{n=0}^{s-1},$$

где

$$\begin{aligned} \Delta q &= q \{q_{n+1}\} - q \{q_n\} \\ &= \{i_{n+1}\} q_1 \{j\} + \{i_{n+1}\} q_2 \{j\} + \{i_{n+1}\} q_3 \{k\}. \end{aligned}$$

Центр сферы S лежит в точке с координатами $\{0, 0, R\}$. Координаты q_1, q_2 и q_3 точки q на сфере должны удовлетворять уравнению сферы:

$$q_1^2 + q_2^2 + \{q_3 - R\}^2 = R^2 \text{ или } q_1^2 + q_2^2 = q_3 \{R - q_3\}.$$

Три точки $\{0, 0, R\}, \{q_1, q_2, q_3\}$ и $\{\gamma_1, \gamma_2, 0\}$ лежат на одной и той же прямой линии, а их координаты удовлетворяют соотношениям [3]:

$$\frac{q_1 - 0}{\gamma_1 - 0} = \frac{q_2 - 0}{\gamma_2 - 0} = \frac{q_3 - 2R}{0 - 2R}.$$

Из данных равенств выражаются координаты γ_1 и γ_2 точки γ на плоскости C через координаты q_1, q_2, q_3 точки q на расширенной плоскости \bar{C} :

$$\gamma_1 = \frac{2Rq_1}{2R - q_3}; \quad \gamma_2 = \frac{2Rq_2}{2R - q_3}. \tag{1}$$

Для получения обратных формул учитывают, что

$$\gamma_1^2 + \gamma_2^2 = \frac{q_1^2 + q_2^2}{\{R - q_3\}} = \frac{q_3}{2R - q_3},$$

откуда находят

$$q_3 = \frac{2R(\gamma_1^2 + \gamma_2^2)}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 4R^2} \tag{2}$$

Из формул (1), с учетом выражения для координаты q_3 , определяются координаты q_1 и q_2 :

$$q_1 = \frac{4R^2\gamma_1}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 4R^2}, \quad q_2 = \frac{4R^2\gamma_2}{\gamma_1^2 + \gamma_2^2 + 4R^2} \tag{3}$$

Формулы (2) и (3) дают выражение для координат точек q сферы S через координаты точек γ комплексной плоскости C .

При стереографической проекции прямые и окружности на C переходят в окружности на S , углы между пересекающимися кривыми сохраняются. На рис. 3,а представлен пример контура $\Gamma = \{4+3i; 3-5i; -7+2i\}$, заданного на комплексной плоскости C комплексного переменного γ , а на рис. 3,б – стереографическая проекция этого контура на сферу S при $R=1$: $Q = \{0,556i+1,111j+0,222k; -0,14i-0,982j+0,456k; -1,415i-0,129j-0,678k\}$.

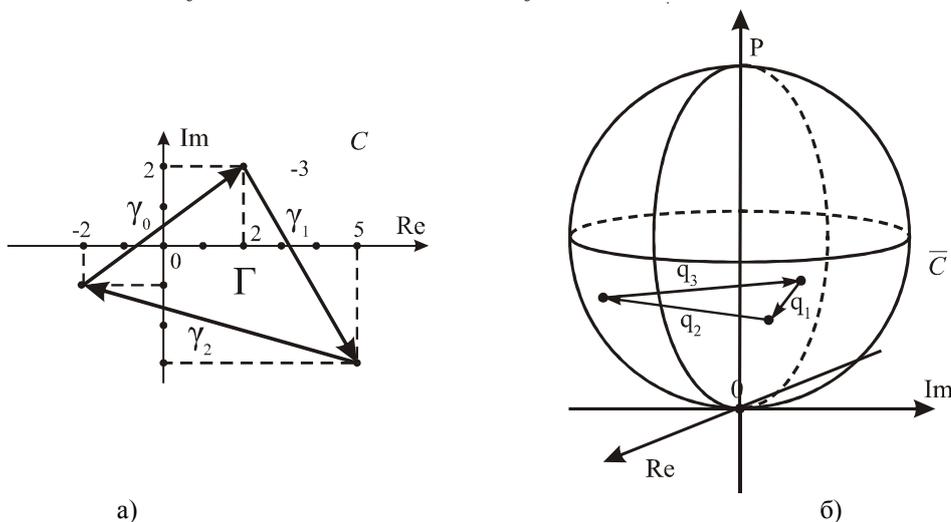


Рис. 3. Контур $\Gamma = \{4+3i; 3-5i; -7+2i\}$, заданный на плоскости C (а), и его стереографическая проекция (б)

2. Распознавание контуров изображений, заданных на расширенной комплексной плоскости комплексного переменного

Рассмотрим на примере двух классов задачу распознавания зашумленных контуров. Пусть $\Gamma_{C1} = \{ \dots \}$ и $\Gamma_{C2} = \{ \dots \}$ – эталонные контуры соответственно классов A_1 и A_2 . В том случае, когда решается задача распознавания контуров, заданных в пространстве C , на устройство распознавания подается либо зашумленный контур первого класса $N_{C1} = \Gamma_{C1} + Z$, либо второго класса $N_{C2} = \Gamma_{C2} + Z$, где Z – шумовой контур. Задача распознавания состоит в обоснованном отнесении зашумленного контура N к одному из классов A_1 или A_2 .

В работе [1] показано, что для принятия решения необходимо сформировать безусловное отношение правдоподобия и сравнить его с пороговым значением. Функции правдоподобия контуров N_C и N_{e_C} имеют соответственно вид:

$$\Lambda_C(N) \cong c \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [\|N\|^2 + \|\Gamma_C\|^2 - 2\operatorname{Re}(N, \Gamma_C)]\right\},$$

$$\Lambda_C(N) \cong c \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [\|N\|^2 + \|\Gamma_{e_C}\|^2 - 2\operatorname{Re}(N, \Gamma_{e_C})]\right\}.$$

Логарифм безусловного отношения правдоподобия будет иметь вид

$$\ln L(N) \cong -\frac{1}{2\sigma^2} [\|\Gamma_C\|^2 - \|\Gamma_{e_C}\|^2 - 2[\operatorname{Re}(N, \Gamma_C) - \operatorname{Re}(N, \Gamma_{e_C})]]$$

Правило принятия решения в пользу класса A_1 записывается как:

$$\operatorname{Re}(N, \Gamma_C) - \operatorname{Re}(N, \Gamma_{e_C}) \geq \sigma^2 \ln \Lambda + 0,5[\|\Gamma_C\|^2 - \|\Gamma_{e_C}\|^2].$$

Таким образом, для принятия решения о классе распознаваемого контура необходимо сформировать разность реальных частей скалярных произведений распознаваемого контура N с каждым из эталонных контуров и сравнить её с пороговой величиной.

При распознавании зашумленных контуров с применением стереографической проекции на устройство распознавания подается не сам контур N_C или N_{e_C} , а его стереографическая проекция P_C или P_{e_C} соответственно. Функции правдоподобия проекций P_C и P_{e_C} :

$$\Lambda_C(P) \cong c \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [\|P\|^2 + \|Q_C\|^2 - 2\operatorname{Re}(P, Q_C)]\right\},$$

$$\Lambda_C(P) \cong c \exp\left\{-\frac{1}{2\sigma^2} [\|P\|^2 + \|Q_{e_C}\|^2 - 2\operatorname{Re}(P, Q_{e_C})]\right\},$$

где Q_C и Q_{e_C} – стереографические проекции эталонных контуров Γ_C и Γ_{e_C} соответственно. Логарифм безусловного отношения правдоподобия будет иметь вид

$$\ln L(P) \cong -\frac{1}{2\sigma^2} [\|Q_C\|^2 - \|Q_{e_C}\|^2 - 2[\operatorname{Re}(P, Q_C) - \operatorname{Re}(P, Q_{e_C})]]$$

На рис. 4 представлены характеристики распознавания зашумленного контура с размерностью $s = 5$ для случая его представления на комплексной плоскости C и расширенной комплексной плоскости \bar{C} . Объем алфавита составил $M = 4$.

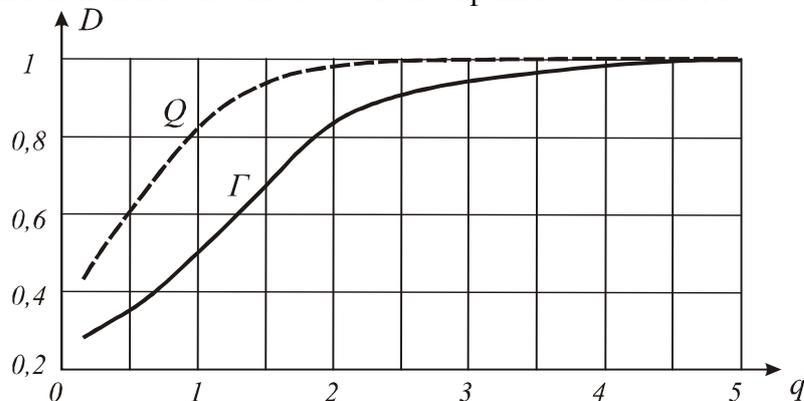


Рис. 4. Зависимость вероятности правильного распознавания от отношения сигнал/шум в контуре

Таким образом, применение стереографической проекции позволяет повысить качество распознавания контуров изображений. Увеличение вероятности распознавания D при фиксированном значении отношения сигнал/шум q для стереографической проекции зашумленных контуров происходит вследствие уменьшения дисперсии шума в кватернионном сигнале, что, в свою очередь, является результатом проекционных искажений. Очевидно, что уровень проекционных искажений зависит от величины радиуса R сферы S , а также от расположения контура на плоскости C относительно начала координат.

На рис. 5 представлены зависимости оценки дисперсии координат q_1, q_2, q_3 точек $q \in \tilde{C}$, $n=0,1,\dots,s-1$ на сфере S от положения точек $\gamma \in \tilde{C}$, $n=0,1,\dots,s-1$ на плоскости C . Среднеквадратическое отклонение точек $\gamma \in \tilde{C}$ на плоскости C при этом составило $\sigma = 1$.

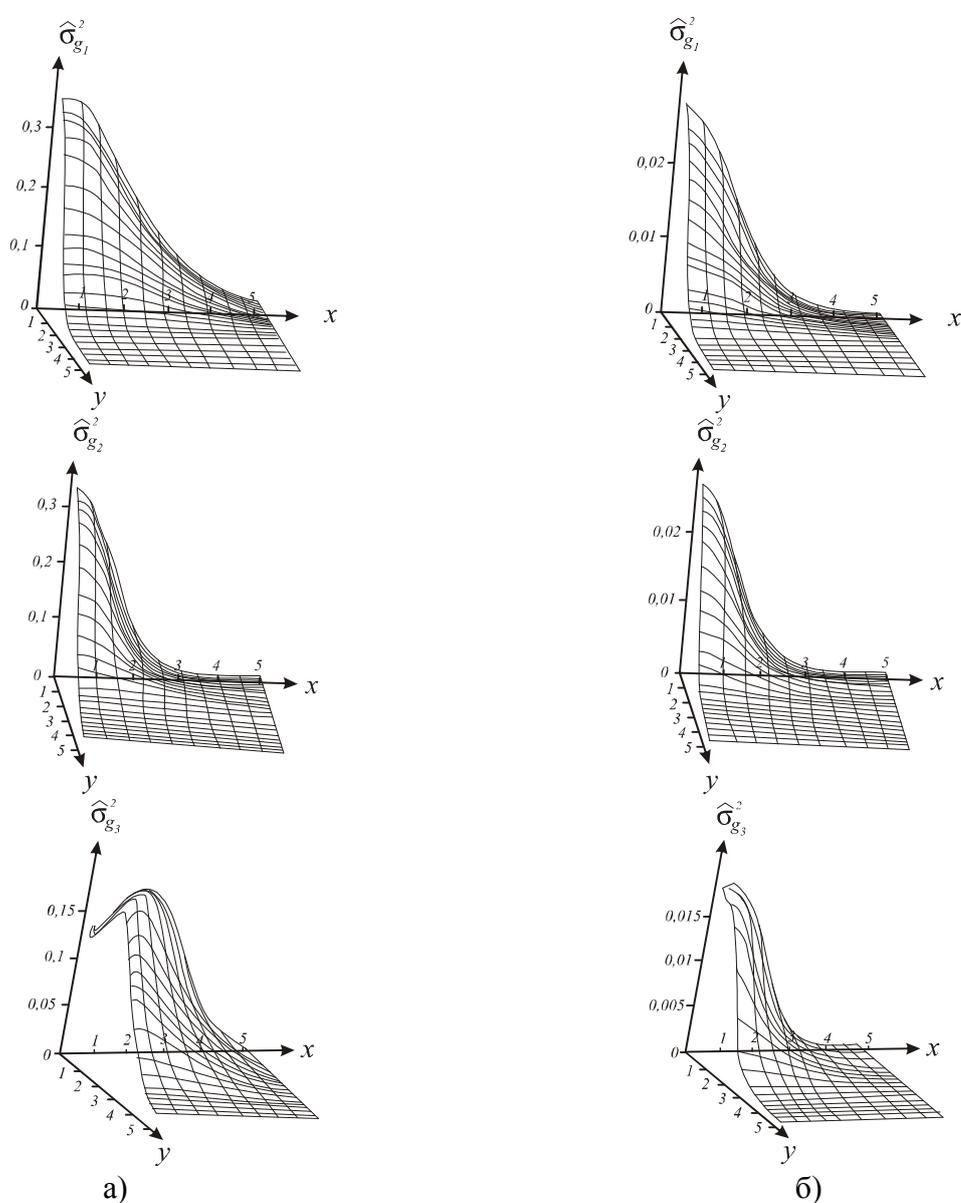


Рис. 5. Оценка дисперсий координат точек сферы при радиусе:
а – $R=1$, б – $R=0,3$

Таким образом, варьируя величиной радиуса R сферы S и положением контуров относительно начала систем координат, можно влиять на величину вероятности правильного распознавания контуров.

Заключение. В работе представлен подход к улучшению качества распознавания контуров изображений, основанный на применении стереографической проекции. Элементы контура изображений при этом рассматриваются как комплексная дискретная переменная, заданная на комплексной плоскости. Показано, что применение стереографической проекции точек комплексной плоскости C на сферу S позволяет увеличить вероятность правильного распознавания контуров изображений. Приведены результаты экспериментальных исследований зависимости дисперсии координат точек $q \in \mathbb{C}$ на сфере S от положения точек $\gamma \in \mathbb{C}$ на плоскости C .

Список литературы

1. Введение в контурный анализ и его приложение к обработке изображений и сигналов / Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002.
2. Комплекснозначные и гиперкомплекснозначные системы в задачах обработки многомерных сигналов/ Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.
3. Привалов, И. И. Введение в теорию функций комплексного переменного / И. И. Привалов. – М: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 432 с.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 08-01-12000офи).

Статья поступила в редакцию 18.11.09.

R. G. Hafizov, D. G. Hafizov, S. A. Ohotnikov

APPLICATION OF STEREOGRAPHIC PROJECTION FOR SOLVING PROBLEMS OF RECOGNITION OF IMAGE CONTOURS

The approach to the improvement of quality of recognition of image contours, based on the application of the stereographic projection is presented. Characteristics of recognition of contours set on the complex and expanded complex plane are received.

Key words: *recognition of image contours, Riemannian sphere, stereographic projection, complex variable function, vectorial quaternion.*

ХАФИЗОВ Ринат Гафиятуллович – кандидат технических наук, профессор кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор 60 публикаций.

E-mail: krtmbs@marstu.net.

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

E-mail: krtmbs@marstu.net.

ОХОТНИКОВ Сергей Аркадьевич – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор четырех публикаций.

E-mail: krtmbs@marstu.net.

УДК 004.93

Р. В. Ерусланов

КЛАВИАТУРНАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ НА БАЗЕ МЕТОДА МНОГОСВЯЗНОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Рассмотрены известные подходы к задаче идентификации пользователя по его клавиатурному почерку. Исследован метод многосвязного представления событий при работе с клавиатурой. Разработано теоретическое обоснование для экспериментальной проверки эффективности данного метода. Приведены результаты эксперимента и даны рекомендации по его использованию при решении задач клавиатурной идентификации пользователя.

Ключевые слова: *клавиатурная идентификация пользователя, метод многосвязного представления, клавиатурный почерк.*

Введение. Развитие информационных технологий привело к проблеме информационной безопасности: задачи обеспечения целостности, конфиденциальности и доступности информации для адресата. Эффективное решение этой проблемы может быть достигнуто созданием комплексной системы защиты информации. Одним из ключевых элементов комплексной системы является подсистема управления доступом, которая предоставляет средства идентификации операторов. Биометрические технологии идентификации получают всё более широкое распространение за счёт следующих преимуществ: биометрические характеристики человека неотъемлемы от человека, их нельзя потерять или передать другим лицам, либо подделать [1].

Биометрия технологически позволяет существенно усилить процедуру идентификации человека в системах безопасности информационных систем. В настоящее время используется и разрабатывается ряд технологий идентификации пользователя, которые условно можно разделить на два класса: с использованием статических (изображения радужной оболочки глаза или кончика кожи пальцев, 2D или 3D геометрии кисти руки и лица, изображение кровеносных сосудов глаза и др.) и динамических биометрических образов (голос, рукописный или клавиатурный почерк) [2].

В области разработок биометрических систем наиболее перспективными на сегодняшний день являются системы аутентификации на базе клавиатурного почерка. Исследования [3] показали, что клавиатурный почерк конкретного пользователя обладает достаточно высокой стабильностью. Это позволяет с большой достоверностью идентифицировать пользователя, работающего с клавиатурой. Системы идентификации личности на основе клавиатурного почерка основываются на принципах анализа особенностей динамики работы на клавиатуре или движения.

Цель данной работы состоит в следующем:

- исследовать метод многосвязного представления событий клавиатуры;
- дать теоретическое обоснование для экспериментальной проверки эффективности метода;
- на основе приведенных результатов дать рекомендации по его использованию.

1. Анализ существующих подходов к клавиатурной идентификации пользователя

К настоящему моменту сложилось четыре основных математических подхода к решению задачи распознавания клавиатурного почерка:

- статистический;
- вероятностно-статистический;
- на базе теории распознавания образов и нечеткой логики [5, 6];
- на основе нейросетевых алгоритмов [7].

Все подходы базируются на следующем описании клавиатурного почерка: основные характеристики почерка – это значения времён удержаний и пауз между удержаниями клавиш. В общем виде процесс набора текста на клавиатуре может быть представлен в виде функции

$$\mathfrak{R}(t) = \gamma(t) + \theta(t) + \lambda(t),$$

где $\gamma(t)$ – составляющая, характеризующая подсознательные процессы мышления при наборе текста,

$\theta(t)$ – составляющая сознательных процессов мышления,

$\lambda(t)$ – механические характеристики клавиатуры, влияющие на процесс набора текста.

Статистический подход основывается на усреднении статистических данных, собранных в виде вычисляемых параметров особенностей динамики, и получении биометрического эталона, характеризующего регистрируемого пользователя. Аутентификация заключается в повторном вводе ключевой фразы и сравнении полученных данных с помощью какого-либо критерия меры близости к биометрическому эталону. Обычно такой подход используют при аутентификации по парольной фразе. Подход имеет множество недостатков: плохо учитывает особенности почерка в динамике, сильно зависит от психофизического состояния человека. Это приводит к неоднозначным результатам идентификации в период «утро – день».

Вероятностно-статистический подход основан на теории вероятности и математической статистике. Отличие данного подхода от предыдущего заключается в том, что времена нажатия и отпускания клавиш при наборе текста на клавиатуре рассматриваются как вероятностные события. Предполагается, что значения времен удержания и пауз между удержаниями клавиш распределены по закону, который приближенно можно считать нормальным законом распределения.

Алгоритмы распознавания образов и нечёткой логики большей частью базируются на решающем правиле Байеса и его модификациях.

Применение нейронных сетей не получило широкого применения в системах распознавания клавиатурного почерка, по сравнению с предыдущими подходами. Это связано с проблемой обучения нейронных сетей: значение времени обучения заранее не известно и достаточно велико; возможны случаи, когда сеть вообще не будет обучена (паралич сети). Другой недостаток использования нейронных сетей связан с необходимостью переобучения сети при регистрации нового пользователя в системе. Существующие системы распознавания клавиатурного почерка используют классические типы нейронных сетей, например, многослойные сети с алгоритмом обучения методом обратного распространения ошибки.

Значения времен удержаний и пауз между удержаниями одних и тех же клавиш в разных комбинациях принимают различные значения. Значения событий клавиши распределены по нормальному закону и обладают несколькими центрами распределения (классами, группами) [8].

2. Метод многосвязного представления событий при пользовании клавиатурой

Среди рассмотренных подходов к решению задачи идентификации пользователя следует отметить предложенный в работе [4] метод многосвязного представления динамики процесса работы на клавиатуре. Он даёт возможность достаточно полно выявить и представить характерные особенности клавиатурного почерка на основе устойчивости последовательностей событий при работе с клавиатурой. Рост устойчивости достигается за счёт усложнения математической модели путём учёта статистической связи между соседними событиями.

Цель данной работы заключалась в получении многосвязной модели клавиатурного почерка и экспериментального исследования эффективности такой модели. Сформулируем основные принципы получения многосвязной модели клавиатурного почерка.

Метод многосвязного представления клавиатурного почерка основывается на следующих положениях:

- набираемый пользователем текст – упорядоченное множество событий клавиатуры. Каждому событию клавиатуры исходной выборки в соответствие ставится код события C_i ;
- разделение исходного множества \mathcal{X} на подмножества $A_i, i \in [1, N]$ последовательностей событий клавиатуры, согласно установленным критериям;
- в соответствии с этими критериями все события C_i разбиваются на классы $\omega_{C_i}^j$; связи между событиями клавиатуры исходной статистики определяют взаимосвязи между полученными классами событий клавиш $\omega_{C_i}^j$;
- элементы класса $\omega_{C_i}^j$ распределены по закону, не противоречащему нормальному закону распределения вероятностей. Классы $\omega_{C_i}^j$ характеризуются центром распределения и среднеквадратичным отклонением. Связь между классами образуется на основе существующих связей между элементами классов и характеризуется мощностью связи L или количеством связей элементов. Схематичное изображение механизма разбиения на классы представлено на рис. 1 [4].

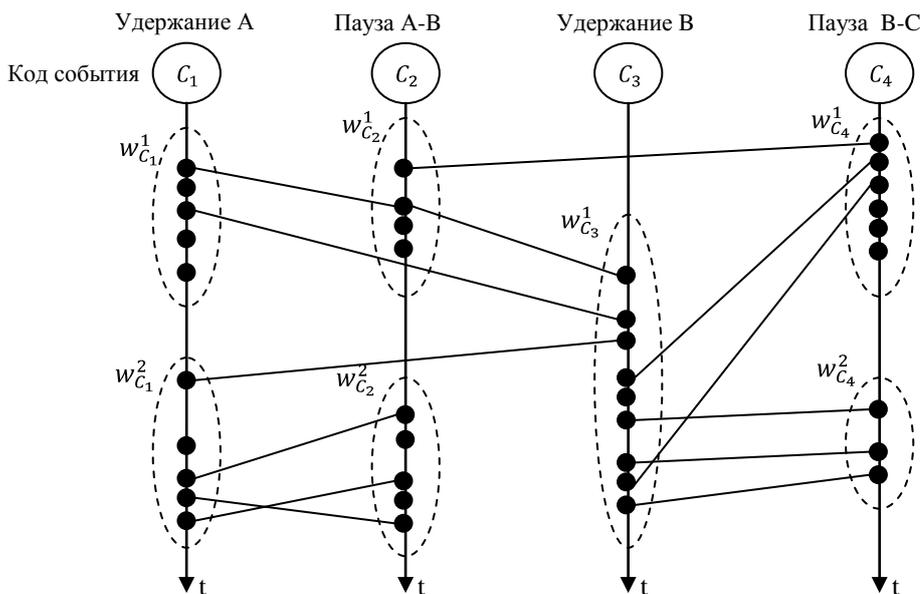


Рис. 1. Многосвязное представление клавиатурного почерка

Для реализации и тестирования подхода была разработана программа для сбора экспериментальных данных (при использовании средств разработки Microsoft Visual Studio C++ и Microsoft Driver Development Kit). Программа решала следующие задачи: сбор экспериментальных данных по клавиатурному почерку (последовательность событий клавиатуры) для анализа, непосредственный анализ полученных временных рядов с целью идентификации пользователя.

Достоверность исходных данных гарантировалась предельными значениями погрешностей, предоставляемых операционной системой Windows. Это достигается за счёт внедрения программы на уровень драйверов, на котором временные задержки минимальны. Программа выводит результаты в файл, имеющий простую иерархическую структуру, которая позволяет легко ориентироваться в больших объёмах данных.

3. Теоретическое обоснование эксперимента по клавиатурной идентификации пользователя на базе метода многосвязного представления

Представляется, что в ходе эксперимента может быть нажата любая клавиша. В результате нажатия происходит событие, которое далее будем называть элементарным и обозначать как $\xi_k = (n_k, t_k)_{k=1}^k$, где n_k – код события, а t_k – длительность события в k -м опыте. Величина $n_k < 256$ соответствует удержанию клавиши, а значение $n_k \geq 256$ характеризует паузу между удержаниями двух клавиш, одной из которых является n_{k-1} клавиша. Из полученного множества двумерных элементарных событий $\xi_k = (n_k, t_k)_{k=1}^k$, $k = 1, 2, \dots, K$ сформулируем подмножество одномерных элементарных событий

$$T^s = \{t_1^s, t_2^s, \dots, t_N^s\}, \quad (1)$$

характеризующихся одинаковым значением кода $n = s$.

В таблице приведены такие подмножества одномерных элементарных событий для $n = 33; 36; 51; 8451; 8466; 9231; 13038; 13056$.

Подмножества элементарных событий, сгруппированных по признаку «Код события»

| Событие | Код события, n | Множество значений событий, t_i^s | Количество событий N_s |
|---------|------------------|--|--------------------------|
| А | 33 | {109, 93, 109, 78, 93, 109, 109, 93} | 8 |
| О | 36 | {78, 78, 93, 93} | 4 |
| Б | 51 | {78, 78, 78, 93, 62, 78, 93, 62, 93, 78, 62} | 11 |
| О/А | 8451 | {187, 250, 281, 140} | 4 |
| Б/А | 8466 | {156, 187, 296, 125} | 4 |
| Б/О | 9231 | {437, 281, 296} | 3 |
| А/Б | 13038 | {140, 171, 203, 515, 234, 171, 140} | 7 |
| Б/Б | 13056 | {484, 343} | 2 |

Каждое элементарное событие $t_i^s, i = 1, 2, \dots, N$ относится к одному из M классов $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_M$, причём к какому конкретному классу, заранее не известно. Обозначим

через ω_{m_i} , $1 < m_i < M_1$ класс, к которому относится i -е элементарное событие. Теперь подмножеству T можно поставить в соответствие вектор

$$\Omega = \{\omega_{m_1}, \omega_{m_2}, \dots, \omega_{m_N}\}, \quad (2)$$

компоненты которого являются номерами классов, к которым относятся элементарные события $t_i^{(s)}$. Отметим, что вектор Ω может содержать повторяющиеся компоненты для тех элементарных событий, которые входят в один класс ω_m .

Таким образом, вектор T представляет собой модель входных данных, а вектор Ω – вектор результатов, к которому надо прийти по результатам анализа вектора на основе принятого критерия качества.

Таким критерием качества классификации J является функционал

$$J = (w_{m_1}, w_{m_2}, \dots, w_{m_N}; t_1, t_2, \dots, t_N) = J(\Omega, T). \quad (3)$$

Результаты классификации считаются оптимальными при условии достижения функционалом J экстремума. Поставленная в данной работе задача клавиатурной идентификации пользователя решается методом кластеризации полученных исходных данных.

Центр первого кластера выбирается произвольно, например, $w_1 = t_i^{(s)}$. К этому кластеру относится любой элемент из T при условии

$$d_{k_1} = |t_k^{(s)} - t_i^{(s)}| \leq D, k = 2, 3, \dots, N. \quad (4)$$

Если $d_{k_1} \leq D$, где D – пороговая величина, то элемент $t_k^{(s)}$ относится к формируемому кластеру. В противном случае, $t_k^{(s)}$ будет считаться центром следующего кластера. Чем больше пороговое значение D , тем худшим разрешением по классам будет обладать процедура классификации. При низком значении D процедура теряет устойчивость, в результате чего с высокой вероятностью элементарные события, характеризующие один и тот же класс, будут отнесены к разным классам.

Рассматриваемый метод классификации основан на анализе устойчивых последовательностей событий клавиатуры, которые образуются во время работы пользователя на компьютере. Для числовой оценки таких последовательностей событий применён введенный в работе [4] интегральный параметр Q , названный весом последовательности. Он зависит от множества значений событий клавиатуры $T = \{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ и множества кодов событий клавиатуры $C = \{C_{k_1}, C_{k_2}, \dots, C_{k_N}\}$ в исходной последовательности длиной N . Аналитически вес устойчивой последовательности определяется как

$$Q(C, T) = p_{c_{k_1}}(t_1) + \sum_{i=2}^N (1 - \exp(-\alpha L_i)) p_{c_{k_i}}(t_i), \quad (5)$$

где i – номер события клавиатуры в последовательности событий;

L_i – мощность связи между i -ым и $(i-1)$ -ым событием клавиатуры;

α – коэффициент связности, определяющий влияние мощности связи на вес Q ;

$p_{c_{k_i}}(t_i)$ – смесь плотности вероятностей событий клавиши c_{k_i} для события t_i ;

$$p_{c_{k_i}}(t_i) = \sum_{j=1}^M P(\omega_{c_{k_i}}^j) P(t/\omega_{c_{k_i}}^j), \quad (6)$$

$P(\omega_{c_{k_i}}^j)$ – априорная вероятность класса $\omega_{c_{k_i}}^j$;

$P(t/\omega_{c_{k_i}}^j)$ – условная плотность вероятности для класса $\omega_{c_{k_i}}^j$.

4. Результаты эксперимента по клавиатурной идентификации пользователя на базе метода многосвязного представления

На базе рассмотренного в п. 3 теоретического обоснования процесса клавиатурной идентификации пользователя было разработано программное обеспечение для экспериментальной проверки эффективности алгоритма идентификации пользователя по фрагменту свободно набираемого текста.

Для этого была выбрана группа из нескольких человек. Им предлагалось ввести один и тот же текст, содержащий порядка 10^4 знаков.

На первом этапе эксперимента сохраняются все события, связанные с набором текста каждым из испытуемых. По этим выборкам строится биометрический эталон каждого пользователя. Далее проводится тест на способность программной модели системы идентификации разделять биометрические образы пользователей. Для этого в качестве эталонного образа использовался биометрический эталон каждого испытуемого, а входными данными являлись все сохранённые события клавиатуры.

Дополнительным результатом теста является чёткое разделение программной моделью системы клавиатурного мониторинга биометрических образов тестируемых пользователей (рис. 2).

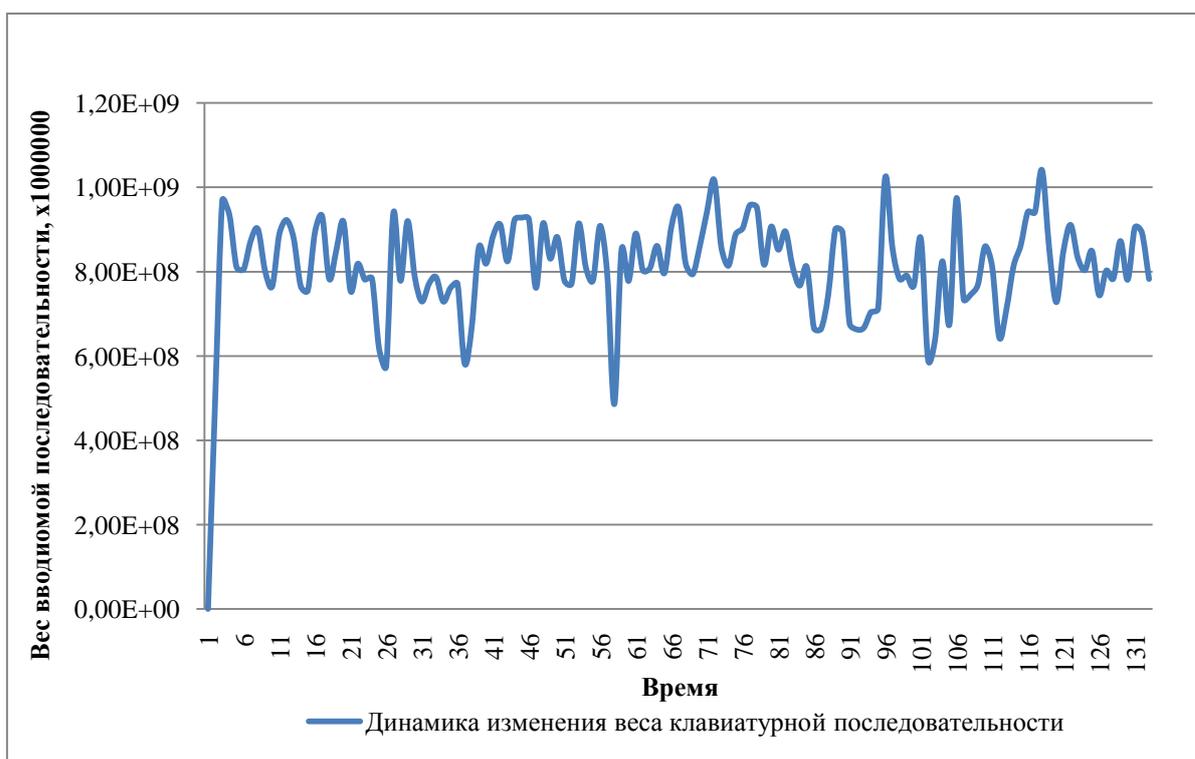


Рис 2. Эксперимент «Динамика работы пользователя»

Эксперимент «Динамика работы пользователя» состоял в следующем: на этапе обучения пользователь набирает текст, после этого, в рабочем режиме, он вводит этот же текст целиком, либо его часть. Рисунок показывает, что значение динамики изменения веса остается примерно на одном уровне.

На втором этапе эксперимента исследовалась способность обнаружения подмены активного пользователя. С этой целью были искусственно синтезированы последовательности событий клавиатуры на основе сохранённых событий. В эти последователь-

ности вставлялись фрагменты последовательностей других пользователей (около 100 событий). После чего в качестве эталонного образа использовался биометрический эталон активного пользователя, а на вход программной модели поступала синтезированная последовательность событий (рис. 3.). В результате были выявлены все ситуации подмены активного пользователя.

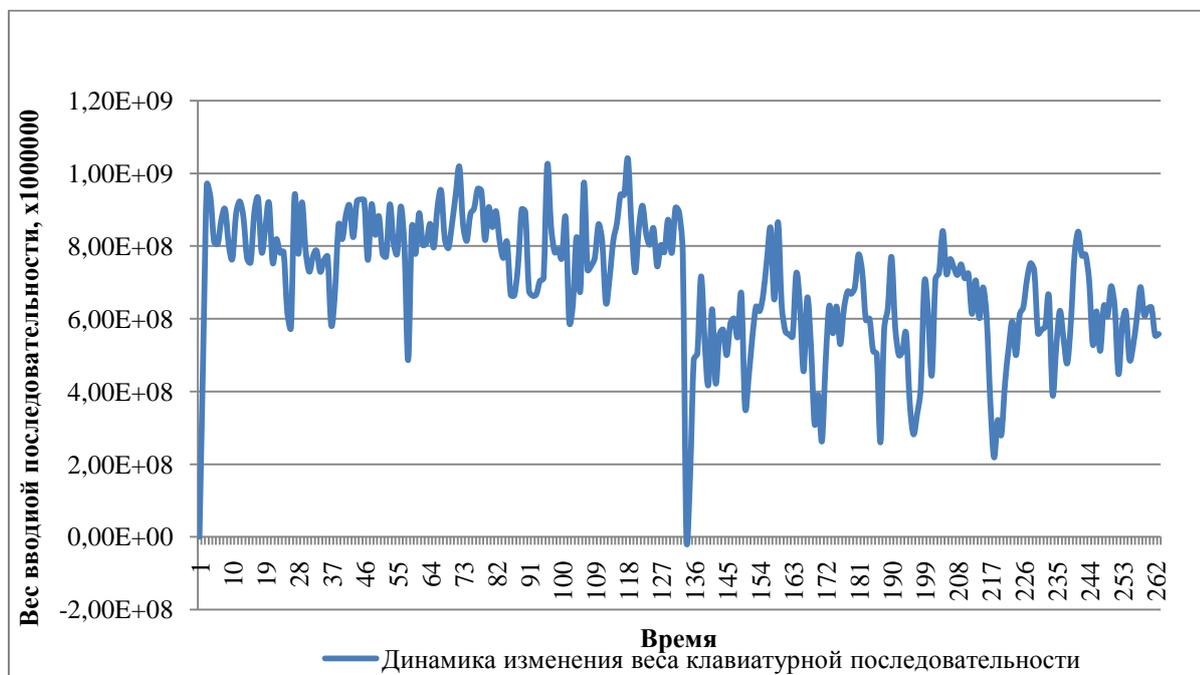


Рис 3. Эксперимент «Подмена пользователя»

Суть этого эксперимента в том, что происходила подмена пользователя. Предполагаемый злоумышленник вводит свой текст. По рисунку видно, что средняя динамика клавиатурного почерка упала по своей величине. Это говорит об успешном различении моделью истинного пользователя от поддельного.

Выводы

1. Исследуемый метод клавиатурного мониторинга может быть использован для построения систем непрерывного контроля доступа.
2. Методы многосвязного представления особенностей динамики работы на клавиатуре могут быть использованы в системах анализа особенностей динамики работы пользователя на клавиатуре.
3. Основными категориями пользователей разработанного программного продукта могут стать системные администраторы, которые обслуживают компьютеры, имеющие строго определенный контингент пользователей: пользователи в основном работают с набором текста на клавиатуре; бухгалтеры, статисты, программисты и др.

Список литературы

1. Широчин, В. П. Динамическая аутентификация на основе анализа клавиатурного почерка / В. П. Широчин, А. В. Кулик, В. В. Марченко. – URL:<http://www.comsys.ntu-kpi.kiev.ua/books/visnik/32/pdf/p199903201.pdf>
2. Болл, Р. М. Руководство по биометрии: пер. с англ. / Р. М. Болл, Дж. Х. Коннел, Ш. Панканти и др. – М.: Техносфера, 2007. – 368 с.: ил.
3. Горелик, А. Л. Методы распознавания / А. Л. Горелик, В. А. Скрипкин. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1984. – 208 с.: ил.

4. Казарин, М. Н. Разработка и исследование методов скрытного клавиатурного мониторинга: автореферат. дисс. канд. техн. наук / М. Н. Казарин. – Таганрог: Таганрогский государственный радиотехнический университет, 2006. – 16 с.
5. Круглов, В. В. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети / В. В. Круглов, М. И. Дли, Р. Ю. Голунов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2001. – 224 с.
6. Ту, Дж. Принципы распознавания образов. Pattern Recognition Principles / Дж. Ту; пер. с англ. И. Б. Гуревич, под ред. Ю. И. Журавлева / J. T. Tou, R. C. Gonzalez. – Addison Wesley, Reading, Mass., 1974; М.: Мир, 1978. – 413 с.
7. Иванов, А. И. Нейросетевые алгоритмы биометрической идентификации личности / А. И. Иванов. – М.: Радиотехника. – 2004. – 143 с.
8. Gentner, D. R. Keystroke timing in transcription typing / D. R. Gentner. – Cognitive Aspects of skilled typewriting, 1993. – P. 95-120.

Статья поступила в редакцию 08.12.09.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 07-01-0058), проект №08-01-00854, проект № 08-01-120001 офи.

R. V. Eruslanov

KEYBOARD IDENTIFICATION OF THE USER ON THE BASIS OF THE MULTILINKED PRESENTATION METHOD

Well-known approaches to the problem of the user identification by keyboard handwriting are considered. The method of multilinked presentation of keyboard events is investigated. The theoretical basis for experimental checking of efficiency of the method is elaborated. Results of the experiment are presented and recommended for its use when solving problems of keyboard identification of the user.

Key words: *keyboard identification of the user, method of multilinked presentation, keyboard handwriting.*

ЕРУСЛАНОВ Руслан Валентинович – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – распознавание образов, информационная безопасность.

E-mail: weer@bi-security.com

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.316.8

А. А. Нагаев, В. Н. Леухин

АНАЛИЗ ПРИМЕНИМОСТИ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ПОДГОНКИ ДЛЯ КОРРЕКТИРОВКИ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Рассмотрены существующие способы корректировки функциональной характеристики и величины сопротивления переменных пленочных элементов. Предложено несколько вариантов построения оборудования для электроискровой подгонки переменных резисторов. Приведены данные подгонки подстроечных резисторов СПЗ-44а номиналов от 1,5 кОм до 1 МОм. Проведена оценка эффективности электроискровой подгонки для корректировки функциональной характеристики.

Ключевые слова: резисторы, переменные резисторы, потенциометры, электроискровая подгонка, функциональная характеристика, корректировка функциональной характеристики.

Введение. Резисторы и элементы на их основе занимают значительную долю среди пассивных электронных компонентов. Так, согласно [1], на 2006 год объем пассивных компонентов в общем объеме мирового рынка составил 70%, а доля резисторов на рынке пассивных компонентов составила 15,7%.

Все резисторы по применению можно разделить на две большие группы: постоянные и переменные. Более подробно остановимся на переменных резистивных элементах. Среди переменных резисторов можно выделить регулировочные и подстроечные резисторы, а также резистивные датчики перемещений.

Значительную часть среди переменных резисторов занимают пленочные резисторы, в частности, выполненные по толстопленочной керметной технологии [2]. Резистивный элемент переменных резисторов обычно имеет прямоугольную или подковообразную топологию.

Основными характеристиками переменных резистивных элементов, к которым предъявляются высокие требования, являются:

- 1) величина сопротивления и допуск на нее;
- 2) линейность функциональной характеристики (ФХ);
- 3) начальный скачок сопротивления;

- 4) контактное и минимальное сопротивление;
- 5) износостойчивость.

Так, к современным пленочным потенциометрам предъявляются требования допуска на сопротивление 10%, нелинейность ФХ не более 0,5 – 1% и срок службы 20...50 млн. циклов [3]. По сравнению с другими типами датчиков перемещения (оптические, емкостные, индукционные, магнитострикционные) резистивные датчики обладают низкой стоимостью, простотой применения и достаточной в ряде случаев точностью. Проволочные и гибридные резистивные потенциометры превосходят пленочные резисторы по точности, но проигрывают по износостойчивости, так, срок службы пленочного потенциометра в 20...50 раз больше, чем проволочного [3].

Толстопленочная технология позволяет изготавливать резисторы с разбросом сопротивлений в пределах $\pm 10\text{--}20\%$. Если необходим более жесткий допуск на сопротивление резисторов, то придется браковать существенную их часть. Поэтому прибегают к корректировке величины сопротивления переменных резистивных элементов [4, 5].

Выделяют два вида и четыре способа корректировки величины сопротивления [5].

Виды подгонки переменных резисторов:

- 1) на основе сравнения;
- 2) на основе расчета.

Способы подгонки переменных резисторов:

- 1) осуществление непрерывной выборки резистивного материала вдоль резистивной полоски;
- 2) дискретная подгонка сопротивления путем проведения серии радиальных резов с определенным шагом;
- 3) равномерное удаление пленки со всей поверхности резистивной полоски (изменение толщины пленки);
- 4) изменение величины сопротивления за счет структурных преобразований в материале резистивного слоя.

Корректировка величины сопротивления пленочных резисторов основана на двух основных принципах:

- 1) разрушение части резистивной пленки, что приводит к увеличению сопротивления за счет уменьшения площади резистивной пленки – лазерная, механическая, электроискровая подгонка (ЭИП) [5–8] и др.;
- 2) структурные преобразования в пленке приводят к нормализации структуры и как следствие уменьшению величины сопротивления – термоотжиг, импульсная тренировка, ЭИП и др.

Цель работы – оценить применимость метода электроискровой подгонки для подгонки параметров переменных резисторов;

рассмотреть варианты возможного построения оборудования электроискровой подгонки величины сопротивления и ФХ переменных пленочных резисторов.

Аналитическое моделирование. Анализ применяемых методов и принципов подгонки ФХ и величины сопротивления [5] показал, что:

- 1) одновременная корректировка ФХ и величины сопротивления возможна лишь при применении способов 1 и 2;
- 2) способ 1 обеспечивает высокую точность подгонки ФХ, но обладает низкой производительностью до $15^\circ/\text{мин.}$;
- 3) способ 2 за счет дискретности корректировки способен обеспечить меньшую линейность ФХ.

В качестве подгоняющего инструмента выбрана электроискровая подгонка, обладающая следующими преимуществами:

- 1) возможность подгонки сопротивления толсто пленочных резисторов как в сторону увеличения, так и в сторону уменьшения;
- 2) точность подгонки до 0,1%;
- 3) большое количество исследований в данной области;
- 4) возможность гибкого управления процессом подгонки и автоматизации;
- 5) относительная простота реализации и низкая стоимость оборудования.

В патентах [9, 10] для подгонки переменных резистивных элементов применялось электроискровое воздействие на резистивный элемент. В [9] целью ставится сохранение ФХ при подгонке полного сопротивления переменного резистора в номинал – ФХ не подвергается оценке. Разрядный электрод в виде металлической лопатки перемещается над поверхностью подгоняемого резистора с помощью электропривода, с целью обеспечения равномерного воздействия. Недостаток данного способа в том, что подгонка ведется без учета ФХ и степени отклонения полного сопротивления от номинала, таким образом, не регулируется скорость перемещения разрядного электрода над поверхностью и не учитывается возможность внесения нелинейности в ФХ.

В [10] подгонке подвергается датчик, состоящий из переменного резистивного элемента и двух секций постоянных резисторов, соединенных последовательно. Подгонка ФХ осуществляется с помощью корректировки величин сопротивления подгоночных секций. Корректировка подковообразного переменного резистивного элемента не предусмотрена.

На основе анализа существующих способов подгонки и требований к измерению ФХ переменных резистивных элементов, согласно ГОСТ 21342.3-87, рассмотрен ряд вариантов построения оборудования корректировки ФХ (рис. 1).

Вариант 1 (рис. 1) основан на измерении выходного напряжения со скользящего контакта, при подключении к контактным площадкам резистора источника постоянного тока G . Измерение производится посредством аналого-цифрового преобразователя АЦП, результат измерения передается в блок управления БУ. Блок управления на основе измеренного напряжения принимает решение о необходимости корректировки ФХ в данной точке в необходимую сторону, в зависимости от чего выбирается вид электроискрового воздействия. Разрядные импульсы формируются в высоковольтном блоке ВВ и подаются на резистивный элемент с разрядного электрода Э. Если измеренное напряжение в пределах допуска, то блок управления перемещает скользящий контакт в следующую точку с помощью шагового двигателя ШД.

Варианты 2 и 3 (рис. 1) предполагают подгонку на основе результата сравнения ФХ падения напряжения на подгоняемом резисторе $R1$ с: образцовым резистором $R_{обр}$ – вариант 2; устройством, формирующим образцовую ФХ, в качестве которого может использоваться, например, цифроаналоговый преобразователь или цифровой потенциометр. Решение о необходимости подгонки, управление разрядными импульсами и шаговым двигателем ШД выполняется блоком управления БУ.

Наиболее оптимальными являются варианты 1 и 3, так как в них отсутствует образцовый резистор, параметры которого подвержены старению и воздействию окружающей среды. Выбор того или иного из вариантов должен осуществляться непосредственно из требований к точности и быстродействию оборудования. Руководствуясь этими данными и применяя критерий наименьшей стоимости и простоты реализации схемного решения, останавливаемся на том или ином варианте.

При размещении разрядного электрода и скользящего контакта на одной радиальной линии электроискровой разряд может воздействовать не на резистивную пленку, а на поверхность скользящего контакта. Таким образом, энергия разряда будет стекать

через резистор без подгонки. Для реализации способа можно применить следующие меры:

- 1) разместить разрядный электрод после скользящего контакта на расстоянии, достаточном для эффективной подгонки (1–3 шага перемещения);
- 2) сместить разрядный электрод радиально относительно центра на некоторое расстояние от подгоняемой резистивной пленки таким образом, чтобы электроискровой разряд приходился в кромку резистивной пленки;
- 3) убирать скользящий контакт из области подгонки, после измерения ФХ.

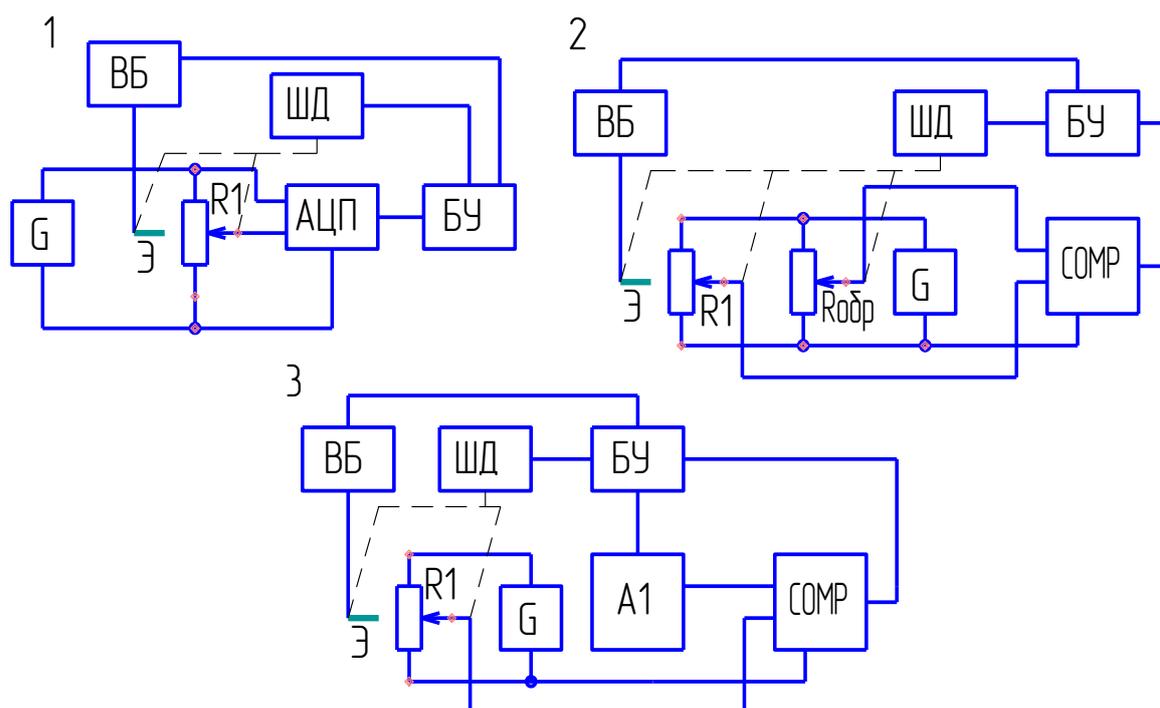


Рис. 1. Варианты построения установки подгонки функциональной характеристики:
1 – по изменению выходного напряжения резистора; 2, 3 – методом сравнения с образцовой ФХ

Образцы и процедура эксперимента. При рассмотрении вариантов построения оборудования для подгонки ФХ и величины сопротивления была поставлена задача: оценить применимость ЭИП. Была проведена подгонка толсто пленочных рутениевых подстроечных резисторов СПЗ-44а различных номинальных сопротивлений (от 1,5 кОм до 1 МОм) и мощностей (0,25, 1 Вт).

Подгонка осуществлялась с помощью установки ЭИП УЭ-1, измерения проводились электронным цифровым омметром ЩЗ4. Производилась корректировка величины полного сопротивления в пределы допуска. Повторный замер величины полного сопротивления проводился через интервал времени ΔT для того, чтобы оценить величину дрейфа сопротивления.

Оценочное измерение функциональной характеристики производилось с помощью изготовленного приспособления для снятия ФХ, позволяющего устанавливать требуемый угол поворота скользящего контакта. Точность установления угла поворота в данном устройстве сильно зависит от оператора, поэтому полученные зависимости могут служить лишь для оценки влияния подгонки на ФХ.

Интерпретация результатов и их анализ. Расчет основных показателей подгонки велся по формулам [11]:

- 1) точность подгонки: $\delta = \frac{R_{II} - R_0}{R} \cdot 100\%$;
- 2) коэффициент подгонки: $K_{II} = R_{II}/R_x$;
- 3) скорость подгонки: $V = \frac{R_n - R_x}{R_x \cdot t} \cdot 100\%$;
- 4) дрейф сопротивления по времени: $\delta_T = \frac{R_t - R_n}{R_n} \cdot 100\%$.

В данных выражениях приняты следующие обозначения:

R_{II} – сопротивление резистора после подгонки, Ом;

R_0 – сопротивление эталонного резистора, Ом;

R_x – сопротивление резистора до подгонки, Ом;

t – время подгонки, с;

R_t – сопротивление резистора через интервал времени ΔT , Ом.

Для каждой партии подгоняемых резисторов определялись следующие параметры, помимо приведенных выше:

- средний коэффициент подгонки $\overline{K_{II}}$;
- среднеквадратическое отклонение коэффициента подгонки σ_{Kn} ;
- средняя точность подгонки $\overline{\delta}$;
- среднеквадратическое отклонение полного сопротивления подогнанных резисторов σ_δ ;
- среднее время подгонки \overline{t} ;
- среднеквадратическое отклонение времени подгонки σ_t ;
- средняя скорость подгонки \overline{V} ;
- среднеквадратическое отклонение скорости подгонки σ_V ;
- средняя величина дрейфа сопротивления $\overline{\delta_T}$;
- среднеквадратическое отклонение дрейфа сопротивления $\sigma_{\delta T}$;
- коэффициент корреляции между коэффициентом подгонки и величиной дрейфа сопротивления $r_{Kn-\delta}$;
- коэффициент корреляции между скоростью подгонки и величиной дрейфа сопротивления $r_{V-\delta}$;
- коэффициент корреляции между коэффициентом подгонки и скоростью подгонки r_{Kn-V} .

Статистически обработанные данные показателей подгонки приведены в таблице.

Результаты статистической обработки данных по подгонке резисторов типа СПЗ-44а

| Параметры | Номинальное сопротивление $R_{ном}$, кОм | | | | | |
|-------------------|---|------|------|------|------|------|
| | 1,5 | 6,8 | 6,8 | 68 | 150 | 1000 |
| $P, Вт$ | 0,25 | 0,25 | 1,00 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| $N, шт$ | 50 | 99 | 110 | 100 | 50 | 100 |
| $T, ч$ | 3000 | 336 | 240 | 240 | 240 | 240 |
| $\overline{t}, с$ | 7,90 | 3,67 | 2,40 | 6,03 | 0,95 | 3,12 |

Окончание таблицы

| | | | | | | |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| σ_t, c | 9,37 | 1,74 | 1,70 | 4,11 | 0,94 | 2,40 |
| $\bar{\delta}, \%$ | -0,12 | 0,38 | 0,38 | -0,06 | 0,17 | 0,06 |
| $\sigma_{\delta}, \%$ | 0,19 | 0,60 | 0,70 | 0,56 | 1,54 | 0,44 |
| \bar{K}_n | 1,36 | 1,19 | 1,19 | 0,79 | 0,89 | 0,88 |
| σ_{K_n} | 0,02 | 0,03 | 0,07 | 0,02 | 0,03 | 0,84 |
| $\bar{\delta}_T, \%$ | 0,40 | -0,18 | -0,07 | 0,17 | 0,47 | -0,72 |
| $\sigma_{\delta T}, \%$ | 0,26 | 0,39 | 0,42 | 0,61 | 0,42 | 0,93 |
| $\bar{V}, \%/c$ | 2,02 | 10,52 | 11,10 | -4,50 | -15,27 | -5,20 |
| $\sigma_V, \%/c$ | 0,81 | 23,00 | 7,95 | 2,10 | 8,00 | 2,83 |
| $r_{K_n-\delta}$ | 0,62 | -0,13 | -0,21 | -0,03 | 0,05 | 0,08 |
| $r_{V-\delta}$ | 0,26 | 0,38 | 0,06 | 0,11 | -0,24 | 0,68 |
| r_{K_n-V} | -0,04 | 0,00 | -0,11 | -0,11 | 0,23 | 0,30 |

Из анализа полученных данных можно сделать следующие выводы:

1. По точности подгонки получены в основном удовлетворительные результаты по всем номиналам. Наибольшее отклонение наблюдается для номиналов 6,8 и 150 кОм, что, очевидно, связано со значительной скоростью подгонки (то есть значительным приращением величины сопротивления на один цикл подгонки).

2. Скорость подгонки для большинства номиналов достаточно высока, за исключением номиналов 1,5 и 68 кОм, очевидно, причиной этого является состав паст. Наиболее медленно подгоняются резисторы с меньшим номинальным сопротивлением (1,5 кОм).

3. Величина дрейфа сопротивления с увеличением величины номинала обычно возрастает, достигая величины нескольких процентов. Наибольшие отклонения имеет номинал 1 МОм. В основе значительных изменений может лежать либо склонность резистивного материала к дрейфу величины сопротивления, либо взаимосвязи величины дрейфа со скоростью подгонки.

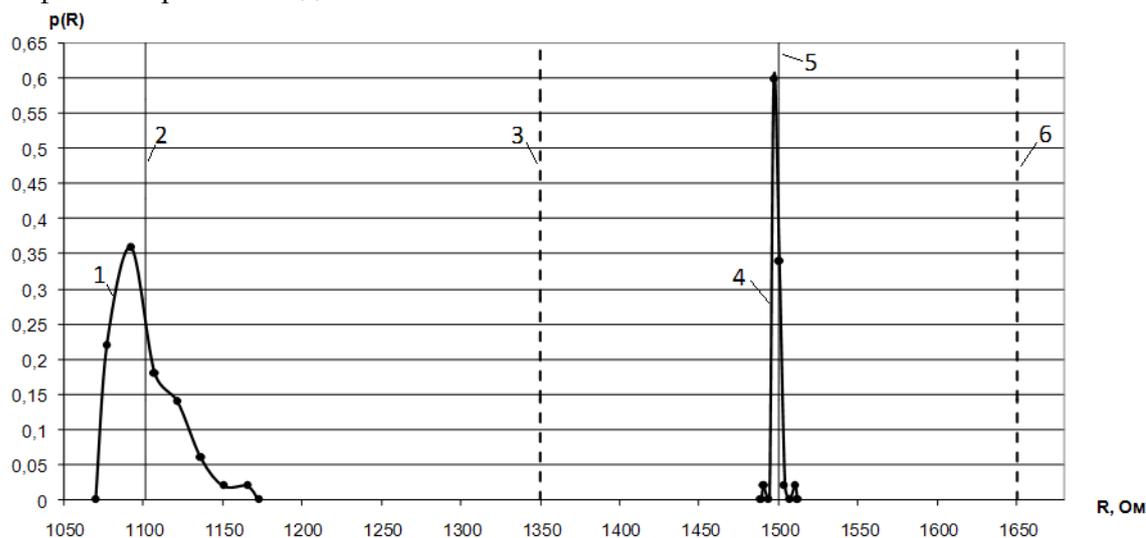


Рис. 2. Плотность распределения величины полного сопротивления резисторов 1,5 кОм-0,25 Вт, $N = 50$:
 1 — до подгонки $f(R)$; 2 — математическое ожидание значения сопротивления до подгонки $m(R)$;
 3, 6 — нижний и верхний допуски, равные 10% от номинала; 4 — после подгонки $f(R_n)$;
 5 — номинальное значение, к которому велась подгонка

Для визуальной оценки эффективности корректировки величины полного сопротивления подгоняемых резисторов были построены функции распределения их значений до и после подгонки (рис. 2, 3). Так, отчетливо видно, что до подгонки значения полного сопротивления находятся за пределами допуска, а после подгонки укладываются в область $1,5 \text{ кОм} \pm 1\%$ (рис. 2) и $1 \text{ МОм} \pm 2\%$ (рис. 3). Следует отметить, что в первом случае подгонка ведется в сторону увеличения, а во втором – в сторону уменьшения сопротивления.

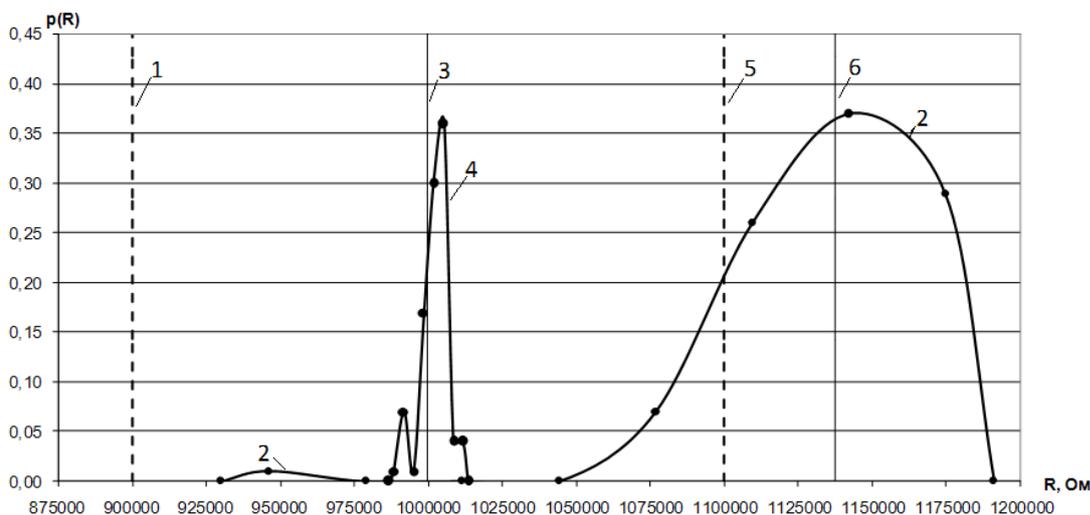


Рис. 3. Плотность распределения величины полного сопротивления резисторов $1 \text{ МОм}-0,25 \text{ Вт}$, $N = 100$:
 1, 5 – нижний и верхний допуски, равные 10% от номинала; 2 – до подгонки $f(R)$;
 3 – номинальное значение, к которому велась подгонка; 4 – после подгонки $f(R_n)$;
 6 – математическое ожидание значения сопротивления до подгонки $m(R)$

Для оценки величины дрейфа сопротивления с течением времени проводился замер величины полного сопротивления резисторов номинала $1,5 \text{ кОм}$ через 3000 ч (рис. 4, 1) и 1 МОм через 240 ч (рис. 4, 2) после подгонки.

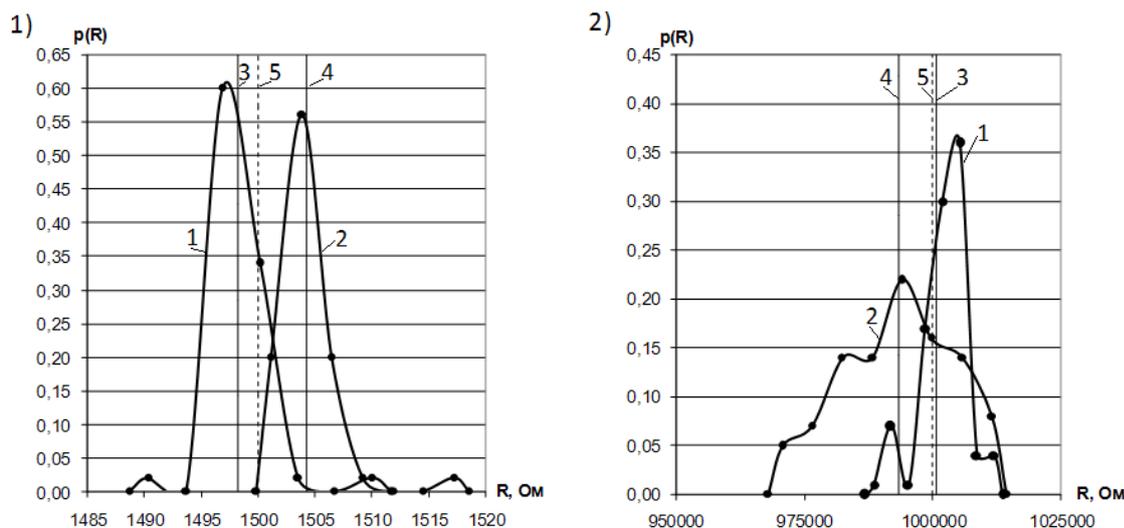


Рис. 4. Плотность распределения величины полного сопротивления резисторов СПЗ-44а после подгонки:
 1) $1,5 \text{ кОм}-0,25 \text{ Вт}$, $N = 50$; 2) $1 \text{ МОм}-0,25 \text{ Вт}$, $N=100$.
 1 – непосредственно после подгонки $f(R_n)$; 2 – спустя 1) 3000 часов и 2) 240 часов $f(R_{nT})$; 3, 4 – математическое ожидание сопротивления после подгонки $m(R_n)$ и через заданный интервал времени $m(R_{nT})$;
 5 – номинальное значение, к которому велась подгонка

Дрейф резисторов номинала 1,5 кОм носит направленность в сторону увеличения сопротивления, очевидно, за счет процесса окисления металлической фазы. Для резисторов номинала 1 МОм наблюдается дальнейшее уменьшение сопротивления, при этом заметно существенное расползание границ плотности распределения, но значения сопротивления остаются в пределах 4%. На основании построенных графиков можно сказать, что дрейф величины сопротивления более существенен у высокоомных резисторов.

Воздействие электроискровой подгонки на ФХ можно оценить по рис. 5. После подгонки нелинейность ФХ не более $\pm 10\%$. Следует заметить, что разрядный электрод перемещался над поверхностью резистора вручную, то есть электроискровое воздействие оказывалось на всю поверхность резистора без учета ФХ. Применение рассмотренных выше вариантов установок подгонки позволит контролировать распределение воздействия на поверхность резистивной пленки.

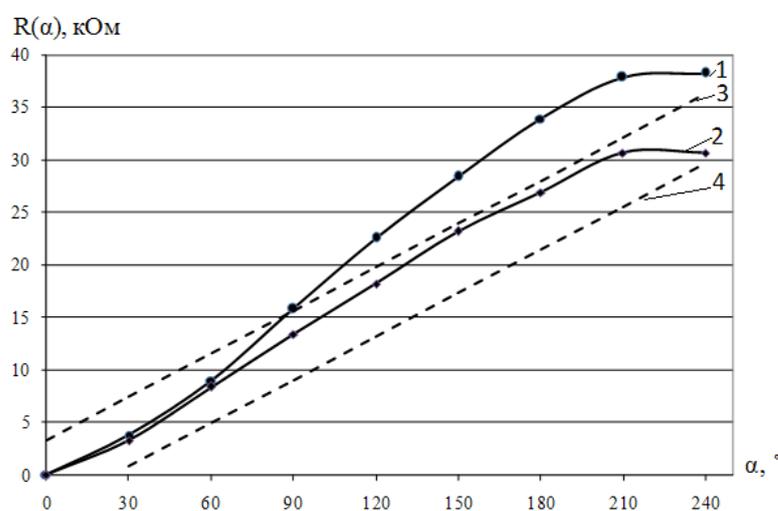


Рис. 5. Функциональная характеристика резистора SP3-44a - 0,25 Вт - 33 кОм $\pm 10\%$ до (1 - $R(\alpha)$) и после (2 - $R_n(\alpha)$) подгонки; 3, 4 - нижняя и верхняя граница допуска

Выводы

Рассмотрен ряд вариантов возможной реализации установки ЭИП для корректировки ФХ переменных пленочных элементов. Отмечена проблема одновременной подгонки и измерения величины сопротивления, предложены способы решения.

По результатам подгонки выявлено, что наибольшее влияние на отклонение и дрейф величины сопротивления оказывает скорость подгонки. Резистивные пленки с меньшим поверхностным удельным сопротивлением подгоняются с меньшей скоростью, но имеют большую временную стабильность.

Проведена оценка влияния ЭИП на линейность ФХ. При применении предложенных вариантов реализации установок возможно добиться отклонения от линейности порядка 1%.

Список литературы

1. Мышаев, А. Отечественные постоянные непроволочные и СВЧ-резисторы: состояние и перспективы производства / А. Мышаев, Н. Пратусевич, Ю. Санкин, В. Уткин // Электронные компоненты. - 2007.- №3. - С. 138-140.
2. Недорезов, В. Подстроечные керметные резисторы. Часть 2 / В. Недорезов // Электронные компоненты. - 2005.- №6. - С. 132-134.

3. Гудков, С. Современные прецизионные потенциометры и датчики перемещений / С. Гудков // Электронные компоненты. – 2006. – №6. – С. 105-107.
4. Ахматаев, А. В. Корректировка функциональной характеристики датчика положения дроссельной заслонки / А. В. Ахматаев, В. Н. Леухин // Тр. науч. конф. по итогам н.-и. работ Мар. гос. техн. ун-та. – Йошкар-Ола, 6 апр., 2001. Секц. 3 Радиофизика, техника, локация и связь. Подсекц.3.3. Конструирование и технология РЭС. /Мар. гос. техн. ун-т.– Йошкар-Ола, 2001.– С. 42-54. Деп. в ВИНТИ 21.03.02 № 515-В 2002.
5. Леухин, В. Н. Электроискровая корректировка сопротивления толстопленочных переменных резисторов / В. Н. Леухин // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1992. – Вып. 3.
6. А.с. 1565282 СССР, МКИ Н 01 С 17/26. Устройство для подгонки толстопленочных резисторов / В. Н. Леухин, С. А. Журавлев (СССР). – № 4464189/24-21; заявл. 21.07.88; опубл. 15.01.90, Бюл. № 2. – 1 с.: ил.
7. Леухин, В. Н. Выбор режимов электроискровой подгонки толстопленочных резисторов / В. Н. Леухин // Техника средств связи. Сер. ТПО. – 1990. – Вып.2. – С.36-45.
8. Сухов, А. М. Автоматизированная система электроискровой подгонки пленочных резисторов / А. М. Сухов, В. Н. Леухин // Проектирование и технология электронных средств.– 2002. – №2. – С. 55-61.
9. А.с. 1494795 СССР, МКИ Н 01 С 17/24. Устройство для корректировки сопротивления толстопленочных переменных резисторов / В. Н. Леухин, М. А. Одинцов, В. Н. Игумнов, А. В. Москвичев (СССР). – № 4464189/24-21; заявл. (22) 23.02.87; опубл. 15.03.90, Бюл. № 8. – 1 с.: ил.
10. Пат. 2199756 Российская Федерация, МПК G 01 P 21/00, Н 01 С 17/22 Способ корректировки характеристики датчика угла поворота резистивного типа / В. Н. Леухин, А. М. Сухов, А. В. Ахматаев; заявитель и патентообладатель Мар. гос. техн. ун-т. – № 2001106799/09 ; заявл. 13.03.01 ; опубл. 27.02.2003, Бюл. № 6. – 1 с.: ил.
11. Леухин, В. Н. Анализ влияния технологических операций на выходные показатели качества резистивных сборок / В. Н. Леухин, А. В. Андрейкин, А. А. Нагаев // Вестник МарГТУ. Серия «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы». – 2008. – №2. – С. 56 – 62.

Статья поступила в редакцию 03.12.09.

A. A. Nagaev, V. N. Leuhin

THE ANALYSES OF APPLICABILITY OF THE ELECTRO-SPARK TRIMMING FOR THE CORRECTION OF THE TAPER OF THE FILM RESISTANCE ELEMENTS

Existing ways of the correction of the taper and the resistance value of variable film elements are examined. Several variants of building of the equipment for the electro-spark trimming of adjustable resistors are suggested. Data of trimmer resistors (СПЗ-44а) with values from 1,5k Ω to 1 MΩ are presented. The efficiency of the electro-spark trimming for the taper correction is estimated.

Key words: *resistors, adjustable resistors, potentiometers, electro-spark trimming, taper of the potentiometer, correction of the taper.*

НАГАЕВ Александр Андреевич – аспирант кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – электроискровая подгонка резисторов. Автор четырех публикаций.

E-mail: kkpr@marstu.net

ЛЕУХИН Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – электроискровая подгонка резисторов, техническая диагностика силовых трансформаторов методами высокочастотного зондирования, технология монтажа на поверхность. Автор 60 публикаций, в том числе 12 патентов и авторских свидетельств.

E-mail: kkpr@marstu.net

УДК 004.3

Е. П. Павлов, Е. Л. Грязина, Ю. М. Зантимирова

СИСТЕМА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ОБЪЕМНОГО ЭЛЕКТРОМОНТАЖА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Представлены результаты сбора показателей качества объемного монтажа. Рассмотрена методика сравнительной оценки показателей качества электро монтажа электронных средств. Приводится применение методики на основе разработанной системы показателей качества объемного электро монтажа.

Ключевые слова: система, качество, показатель, электро монтаж, межсоединение, контактирование, маркировка, метод, анализ, иерархия.

Введение. Современное приборостроение все более и более содержит электро монтажные работы как объемного электро монтажа, так и печатного монтажа с использованием поверхностного монтажа.

При разработке любого прибора, в первую очередь, необходимо определить его показатели качества, в том числе в области электро монтажа, так как электро монтаж – это часть конструкции для реализации связей по принципиальной электрической схеме. От правильности выполнения электро монтажа зависит надежность работы аппаратуры.

Для печатного монтажа показатели качества достаточно широко изучены. Показатели качества объемного монтажа в рассредоточенном виде содержатся в нормативно-технических документах, справочниках. Полный состав показателей качества для объемного монтажа отсутствует. Поэтому особую актуальность имеет выявление показателей именно в области объемного электро монтажа.

Полный перечень показателей качества объемного монтажа значительно облегчит не только поиск отдельных показателей, характеризующих тот или иной вид объемного монтажа, но и процедуру комплексной оценки качества электро монтажа.

Цель работы: создание системы показателей качества объемного монтажа электронных средств, которая рассматривает качество в целом и детально в виде требований, предъявляемых к различным межсоединениям, методам контактирования и маркировке.

Решаемые задачи, направленные на достижение цели.

Во-первых, необходимо провести анализ нормативно-технических документов, справочников и иных источников информации в области электро монтажа.

Во-вторых, осуществить сбор показателей качества объемного монтажа.

В-третьих, применить систему показателей качества для сравнительной оценки показателей качества объемного электро монтажа двух электронных средств.

Математическое моделирование. В качестве метода для сравнительной оценки показателей качества объемного электро монтажа электронных средств выбран метод анализа иерархий.

Метод анализа иерархий является систематической процедурой для иерархического представления элементов, определяющих суть любой проблемы. Метод состоит в декомпозиции проблемы на все более простые составляющие части и дальнейшей обра-

ботке последовательности суждений лица, принимающего решение, по парным сравнениям [1]. В результате может быть выражена относительная степень взаимодействия элементов в иерархии. Эти суждения затем выражаются численно.

В общем случае метод анализа иерархий включает следующие этапы:

- структурирование проблемы и построение иерархии критериев;
- получение приоритетности критериев;
- анализ соответствия альтернативных решений выбранным критериям;
- нахождение альтернативных решений.

После того, как построена иерархия критериев, необходимо осуществить оценку соответствия параметров вариантов (например, электронных средств) данной системе критериев. Предположим, что имеется N вариантов решений: A_1, A_2, \dots, A_N . Чтобы выбрать лучший из них используется система из K критериев. Соответствие вариантов решения A_i ($i=1,2,\dots,N$) условиям критериев K_j ($j=1,2,\dots,K$) определяется с помощью балльных оценок W_{ij} экспертом.

Существует много способов назначения балльных оценок. В данном случае предполагается применение органолептического метода, который основан на высказывании эмоциональных суждений по поводу соответствия образца данному критерию [2, 3]. Оценка может выражаться словами, наиболее удобными для определения степени выраженности критерия: удобно–неудобно, легко–трудно, надежно–ненадежно, мало–много и т.д. Пример шкалы эмоциональных суждений приведен в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Шкала сравнений

| Эмоциональная оценка, Z_i | | | Оценка в баллах, W_i |
|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|------------------------|
| Очень удобно | Очень надежно | Очень важно (Ценно) | 9 |
| Удобно | Надежно | Важно | 8 |
| Достаточно удобно | Достаточно надежно | Достаточно важно | 7 |
| Недостаточно удобно | Недостаточно надежно | Недостаточно важно | 6 |
| Сомнительное удобство | Сомнительная надежность | Сомнительная важность | 5 |
| Можно считать неудобно | Можно считать ненадежно | Скорее неважно | 4 |
| Неудобно | Ненадежно | Неважно | 3 |
| Очень неудобно | Очень ненадежно | Очень неважно | 2 |

После проведения экспертной оценки удобно свести результаты в одну таблицу (см. табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Результаты анализа проектного решения

| Варианты | Критерий K_1 | | Критерий K_2 | | Критерий K_k | |
|----------|----------------|------------|----------------|------------|----------------|------------|
| | Качест. оценка | Баллы | Качест. оценка | Баллы | Качест. оценка | Баллы |
| A_1 | $Z_1(K_1)$ | $W_1(K_1)$ | $Z_1(K_2)$ | $W_1(K_2)$ | $Z_1(K_k)$ | $W_1(K_k)$ |
| A_2 | $Z_2(K_1)$ | $W_2(K_1)$ | $Z_2(K_2)$ | $W_2(K_2)$ | $Z_2(K_k)$ | $W_2(K_k)$ |
| A_N | $Z_N(K_1)$ | $W_N(K_1)$ | $Z_N(K_2)$ | $W_N(K_2)$ | $Z_N(K_k)$ | $W_N(K_k)$ |

Варианты A_1, A_2, \dots, A_N сравниваются между собой по каждому из K критериев, а результаты парных сравнений представляются в матричной форме – в виде квадратной матрицы A . Эта матрица будет иметь свойства обратной симметричной матрицы, то есть,

если i, j – номера строк и столбцов соответственно, то справедливо следующее выражение:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}. \tag{1}$$

Квадратная матрица характеризуется собственным вектором и собственными значениями. Выбор лучшего варианта A_i из возможных вариантов по критерию K_j математически сводится к нахождению наибольшего собственного значения вектора матрицы парных сравнений $A \times A$ с размерностью N .

Матрица парных сравнений представлена на рис. 1.

| | | | | |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 |
| A_1 | $\frac{W_1}{W_1}$ | $\frac{W_1}{W_2}$ | $\frac{W_1}{W_3}$ | $\frac{W_1}{W_4}$ |
| A_2 | $\frac{W_2}{W_1}$ | $\frac{W_2}{W_2}$ | $\frac{W_2}{W_3}$ | $\frac{W_2}{W_4}$ |
| A_3 | $\frac{W_3}{W_1}$ | $\frac{W_3}{W_2}$ | $\frac{W_3}{W_3}$ | $\frac{W_3}{W_4}$ |
| A_4 | $\frac{W_4}{W_1}$ | $\frac{W_4}{W_2}$ | $\frac{W_4}{W_3}$ | $\frac{W_4}{W_4}$ |

$$=$$

| | | | | |
|-----|----------|----------|----------|----------|
| | A | B | C | D |
| A | a_{11} | a_{12} | a_{13} | a_{14} |
| B | a_{21} | a_{22} | a_{23} | a_{24} |
| C | a_{31} | a_{32} | a_{33} | a_{34} |
| D | a_{41} | a_{42} | a_{43} | a_{44} |

Рис. 1. Матрица парных сравнений

Для вычисления собственных векторов обычно рекомендуется использовать геометрическое среднее каждой строки [4, 5]. Доказано, что оптимальным показателем, исходя из практических требований, предъявляемых к ним, является средневзвешенный геометрический показатель. Матрица парных сравнений четвертого порядка и расчет искомого вектора приоритетов представлены в табл. 4.

Т а б л и ц а 4

Пример обобщенной таблицы расчета вектора приоритетов

| | Матрица | | | | Вычисление оценок компонент | Нормализация для получения оценок вектора приоритетов, X_i | Наибольшее собственное значение матрицы A , L_i |
|-------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---|--|---|
| | A_1 | A_2 | A_3 | A_4 | | | |
| A_1 | $\frac{W_1}{W_1}$ | $\frac{W_1}{W_2}$ | $\frac{W_1}{W_3}$ | $\frac{W_1}{W_4}$ | $\sqrt[4]{\frac{W_1 \cdot W_1 \cdot W_1 \cdot W_1}{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4}} = a$ | $\frac{a}{a+b+c+d} = X_1$ | $X_1 S_1 = L_1$ |
| A_2 | $\frac{W_2}{W_1}$ | $\frac{W_2}{W_2}$ | $\frac{W_2}{W_3}$ | $\frac{W_2}{W_4}$ | $\sqrt[4]{\frac{W_2 \cdot W_2 \cdot W_2 \cdot W_2}{W_1 \cdot W_2 \cdot W_3 \cdot W_4}} = b$ | $\frac{b}{a+b+c+d} = X_2$ | $X_2 S_2 = L_2$ |

О к о н ч а н и е т а б л . 4

| | Матрица | | | | Вычисление оценок компонент | Нормализация для получения оценок вектора приоритетов, X_i | Наибольшее собственное значение матрицы A, L_i |
|----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|---|--|--|
| A_3 | $\frac{W_3}{W_1}$ | $\frac{W_3}{W_2}$ | $\frac{W_3}{W_3}$ | $\frac{W_3}{W_4}$ | $\sqrt[4]{\frac{W_3}{W_1} \cdot \frac{W_3}{W_2} \cdot \frac{W_3}{W_3} \cdot \frac{W_3}{W_4}} = c$ | $\frac{c}{a+b+c+d} = X_3$ | $X_3 S_3 = L_3$ |
| A_4 | $\frac{W_4}{W_1}$ | $\frac{W_4}{W_2}$ | $\frac{W_4}{W_3}$ | $\frac{W_4}{W_4}$ | $\sqrt[4]{\frac{W_4}{W_1} \cdot \frac{W_4}{W_2} \cdot \frac{W_4}{W_3} \cdot \frac{W_4}{W_4}} = d$ | $\frac{d}{a+b+c+d} = X_4$ | $X_4 S_4 = L_4$ |
| \sum_i | S_1 | S_2 | S_3 | S_4 | Сумма = a+b+c+d | Сумма = 1 | Сумма = λ_{max} |

Итоговый результат может быть рассчитан двумя способами, исходя из равнозначности или неравнозначности критериев.

Таким образом, обработка результатов парных сравнений может осуществляться по двум алгоритмам. Первый алгоритм применяется, если критерии равнозначны, второй алгоритм – если неравнозначны.

Рассмотрим алгоритм выбора лучшего результата, если критерии равнозначны. Локальные приоритеты будут иметь вид:

$$X = X [K, N] = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1K} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nK} \end{bmatrix} \tag{2}$$

Алгоритм выбора лучшего изделия по равнозначным критериям представлен на рис. 2.

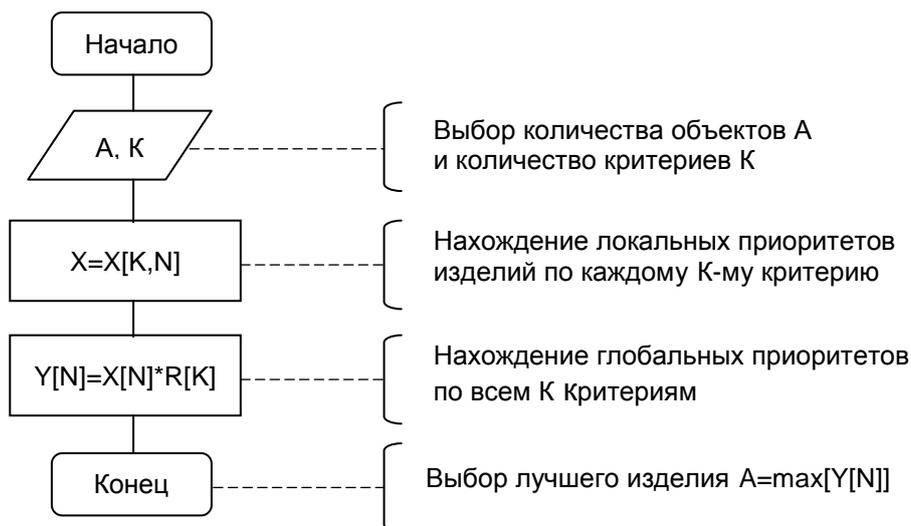


Рис. 2. Алгоритм выбора лучшего изделия по равнозначным критериям

Итоговый результат $Y[N]$ получается суммированием локальных приоритетов по всем K критериям:

$$Y[N] = \sum_{i=1}^K X[N, i] \Rightarrow \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} + X_{12} + \dots + X_{1K} \\ X_{21} + X_{22} + \dots + X_{2K} \\ \dots + \dots + \dots + \dots \\ X_{n1} + X_{n2} + \dots + X_{nK} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Рассмотрим алгоритм выбора лучшего варианта решения, если критерии неравнозначны (см. рис. 3).

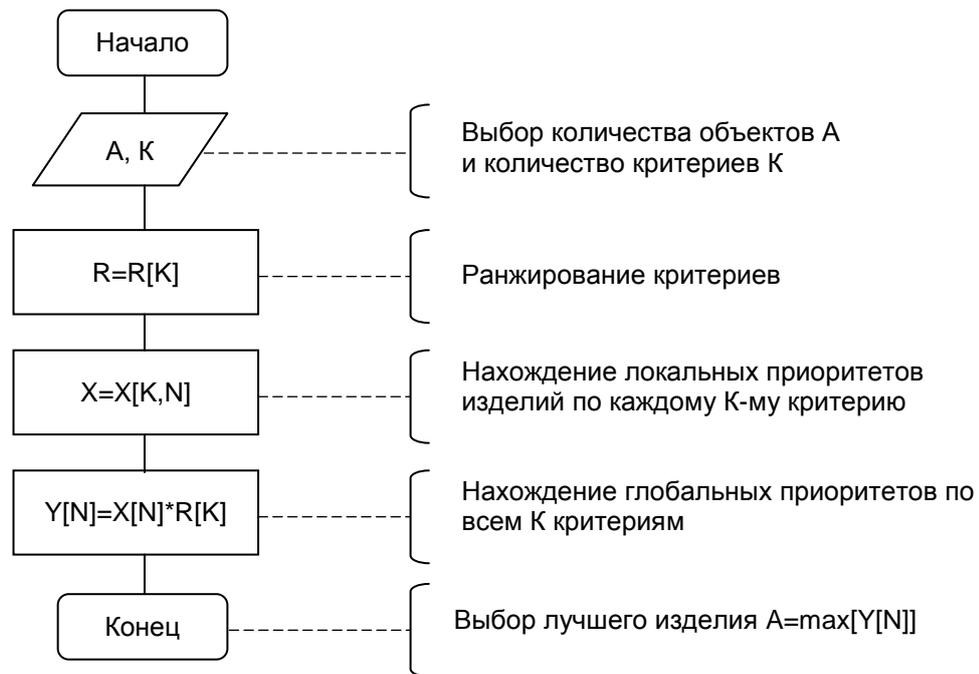


Рис. 3. Алгоритм выбора лучшего изделия по неравнозначным критериям

Если критерии неравнозначны, то предварительно определяют приоритеты критериев R[K]. Затем вычисляются глобальные приоритеты сравниваемых объектов путем перемножения матриц X[N, K] и R[K]:

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \dots \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1K} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2K} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nK} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \dots \\ R_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 X_{11} + R_2 X_{12} + \dots + R_k X_{1K} \\ R_1 X_{21} + R_2 X_{22} + \dots + R_k X_{2K} \\ \dots + \dots + \dots + \dots \\ R_1 X_{n1} + R_2 X_{n2} + \dots + R_k X_{nK} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Поскольку оценки, сделанные специалистом (экспертом), субъективны, всегда существует возможность нарушения логичности суждений. Чтобы этого избежать, после заполнения матрицы парных сравнений производится процедура согласованности оценок. С помощью наибольшего собственного значения матрицы суждений λ_{max} находится индекс согласованности по формуле:

$$\alpha = \frac{\lambda_{max} - N}{N - 1}. \quad (5)$$

Для обратносимметричной матрицы всегда выполняется условие $\lambda_{Max} > N$.

Затем по размеру матрицы N определяется случайная согласованность γ по следующим таблицам (см. табл. 5, 6).

Таблица 5

Определение случайной согласованности матрицы (для $N < 9$)

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|---|---|------|-----|------|------|------|------|
| Размер матрицы, N | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| Случайная согласованность, γ | 0 | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 |

Таблица 6

Определение случайной согласованности матрицы (для $N > 8$)

| | | | | | | | | |
|-------------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Размер матрицы, N | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Случайная согласованность, γ | 1,45 | 1,49 | 1,51 | 1,54 | 1,56 | 1,57 | 1,59 | 1,60 |

Следующий шаг – расчет отношения согласованностей согласно выражению:

$$\beta = \frac{\alpha}{\gamma}. \quad (6)$$

Если получаем, что $\beta \leq 0,1$, то это означает хорошее согласование, если $\beta \leq 0,2$ – удовлетворительное согласование, если $\beta > 0,2$ – плохое согласование. В случае плохого согласования нужно исследовать задачу снова и проверить суждения.

Методика обработки и полученные результаты

В ходе исследования было собрано порядка 70 показателей качества объемного монтажа. Все показатели качества объемного монтажа с указанием соответствующих нормативных значений были сведены в единую систему.

Рассмотрим основные показатели качества объемного монтажа.

Исходя из анализа требований, предъявляемых к объемному электромонтажу, было выявлено, что монтажные провода по сечению должны соответствовать току нагрузки, допустимому падению напряжения и обладать необходимой механической и электрической прочностью. Показатель рекомендуемого сечения медных жил и соответствующие нормативные значения представлены в табл. 7 (показатель №1).

Таблица 7

Показатели качества объемного электромонтажа

| Показатель качества | Значения |
|--|--|
| 1. Рекомендуемое сечение медных жил, мм ² | 0,03; 0,05; 0,08; 0,12; 0,2; 0,35; 0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5. |
| 2. Диаметр по изоляции радиочастотного кабеля, мм | 0,5; 1; 1,5; 2,2; 3; 4,6; 7,3; 9; 11; 13; 17,3; 24; 44; 60; 82; 112. |
| 3. Волновое сопротивление линии связи (ЗВ), Ом | 50; 75; 100 |
| 4. ТКЛР металлов (в интервале 20 – 200° С), 1/град | (0,9–39,5) – 10 ^{–6} |
| 5. ТКЛР изоляционных материалов, 1/град | (0,5–180) – 10 ^{–6} |
| 6. Показатели влагопоглощения изоляционных материалов, % | < 5 |
| 7. Критерий жесткости проводника | $\sqrt{l^3}/d \leq 300$, где l – длина проводника, м; d – диаметр провода. |
| 8. Расстояние между неизолированными токоведущими поверхностями аппаратуры, мм | > 2 |
| 9. Расстояние между неизолированными токопроводящими поверхностями при монтаже, мм | > 1 |

Общеизвестно, что по монтажным проводам могут протекать мешающие сигналы, которые за счет паразитных связей (через общее сопротивление, через электромагнитное поле, емкостной, индуктивной, волновой) наводят в других цепях сигналы помех, которые в свою очередь приводят к потере устойчивости, нарушению работы и сбою команд в радиоустройствах. Поэтому при монтаже нужно стремиться к уменьшению таких паразитных параметров, как емкость монтажа, индуктивность соединительных проводников и ослабление их взаимосвязи.

Кроме перечисленных параметров существует понятие волнового сопротивления линии связи. Волновое сопротивление – электрическая характеристика кабеля, разъёмов и других элементов линий связи, описывающая их способность передавать переменный ток. Условием эффективной передачи электрических сигналов на расстояние является правило согласования волновых сопротивлений: все элементы линии связи должны иметь одинаковое волновое сопротивление. Волновое сопротивление рекомендуется выбирать из ряда 50, 75, 100 Ом (см. табл.7, №3).

Для каждого вида линии связи есть определенные формулы расчета вышеизложенных параметров. Например, для одиночного проводника рассчитывается его индуктивность согласно выражению (7).

$$L = 0,21 ((2,31g \ 4l/d) - 0,75), \text{ мкГн.}, \quad (7)$$

где l – длина проводника, d – диаметр проводника [6].

Основными электрическими параметрами линии передач СВЧ диапазона выступают длина волны в линии и коэффициент затухания.

Кроме волнового сопротивления существует понятие характеристического импеданса – это комплексное сопротивление в электрической цепи. Импеданс выхода предыдущего каскада должен соответствовать импедансу входа последующего каскада, тем самым производится согласование и вся мощность передается от первого каскада ко второму и т.д. по цепочке.

При выборе материала, который будет использоваться при электромонтаже, необходимо учитывать его температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР). Так как чем больше ТКЛР материала и линейные размеры тела, тем больше приращение тела при изменении температуры, что нежелательно. Среди металлов наименьшим ТКЛР при температуре 20 – 200 °С обладает инвар, наибольшим – цинк. А среди изоляционных материалов наименьшим – кварц, наибольшим – полиэтилен.

В процессе сбора показателей качества были выявлены основные диапазоны варьирования ТКЛР различных металлов и изоляционных материалов (см. табл. 7).

При длительном пребывании в сухой атмосфере детали из изоляционных материалов могут потерять механическую прочность и изменить форму. Однако и влага оказывает на материалы вредное воздействие. Показателем качества в данном случае является низкое влагопоглощение. Самым низким показателем влагопоглощения (до 0,01%) обладают полистирол блочный, полиэтилен, политетрафторэтилен, политрихлорфторэтилен. В целом показатели влагопоглощения могут достигать 5 %.

В качестве межсоединения широкое применение нашли гибкие печатные платы и гибкие печатные кабели. Основные показатели качества гибких печатных плат – это допустимый радиус изгиба – величина расчетная, минимальная ширина проводников и зазоров, толщина проводников, максимальная температура работы, минимальный шаг балочных выводов. Гибкие печатные платы достаточно широко распространены и для монтажа устройств СВЧ диапазона. Однако в этом случае к материалу диэлектрика предъявляются дополнительные требования [7, 8]. Что касается гибких печатных кабелей, то их длина должна быть не более 350 мм, а ширина – не более 150 мм.

Довольно часто для крепления элементов конструкций в ячейках и блоках используется приклейка. Эта операция достаточно критическая в том плане, что в продуктах газовой выделения из клевого шва может быть наличие агрессивных компонентов (атомы хлора, фтора, молекулы водорода, воды) и коррозионно-опасных веществ (муравьиная кислота, уксусная кислота, аммиак, фенол, формальдегид). В данном исследовании выявлено их предельно допустимое количество.

Газовыделение при повышенной температуре и с течением времени пребывания на воздухе увеличивается. Эту закономерность также необходимо учитывать.

Одной из причин возможных изменений свойств элементов схемы в герметичном блоке является наличие остатков растворителей. В технологии электромонтажа должны применяться растворители с относительной летучестью < 807 [9].

Важнейшим показателем качества электромонтажа является и расстояние между точками приклеивания проводов, жгутов и кабелей к корпусу прибора, значение которого зависит от диаметра жгута, провода, кабеля.

Чтобы не возникало переходных электрических контактов, все стыки металлических несущих конструкций должны быть выполнены сваркой, электрическое сопротивление на стыке соединенных частей конструкции должно быть не более $2,5 \cdot 10^{-3}$ Ом.

При монтаже методом накрутки количество витков выбирается в зависимости от диаметра жилы провода, так, при диаметре более 1, 2 мм допускается 3 витка. Расстояние между выводами при бандажировании и накрутке должно быть не более 2,5 мм.

Крепление элементов конструкций ячеек и блоков может быть выполнено при помощи пайки. Длительность процесса пайки не должна превышать 5 сек., а температура разогрева места пайки должны быть на $30 - 50^\circ \text{C}$ выше температуры припоя и флюса.

В качестве основных показателей качества, предъявляемых к разъемам, выступают:

- переходное сопротивление;
- наибольшее сечение подпаиваемой многопроволочной жилы провода;
- длина заделки жилы от изоляции;
- длина изоляционной трубки;
- выступание конца обжимаемого провода при выходе из хвостовика контакта.

При осуществлении формовки выводов необходимо учесть, что вывод не должен испытывать механических усилий выше значений, установленных нормативными документами на изделия электронной техники (ИЭТ). Исходя из этого, к формовке выводов предъявляются определенные требования.

В настоящее время для присоединения выводов от кристаллов ИМС как к контактными площадкам корпуса, так и платам нашел широкое применение проволочный микромонтаж. Для проволочного микромонтажа используется проволока диаметром $10 - 40$ мкм из золота, алюминия и его сплавов, а также (значительно реже) из сплава палладия с никелем. Для бескорпусных ИМС незаменимое применение нашла золотая проволока, а для монтажа корпусных ИМС предпочтительнее использовать алюминиевую проволоку. Соединение золотых и алюминиевых проволочных выводов с контактными площадками на кремниевых кристаллах осуществляется с использованием методов термокомпрессии, ультразвуковой и термозвуковой сварки. Метод термокомпрессии часто применяется для золотых проволочек. В этом случае вывод соединяется с контактной площадкой без применения припоя и без плавления, только путем одновременного воздействия повышенной температуры и давления.

Различают следующие требования, предъявляемые к режиму термокомпрессионной сварки:

1) температура нагрева не должна превышать температуры эвтектики этих материалов во избежание образования жидкой фазы (для большинства практических случаев температура в зоне сварки лежит в пределах 300–400 °С);

2) давление инструмента, которое должно обеспечивать деформацию проволоки после ее нагрева, должно находиться в пределах 25–75%, при этом прочность соединения должна составлять не менее 40–50% прочности проволоки на разрыв в исходном состоянии.

Помимо вышеперечисленного существуют также требования к цвету маркировки выводов, цвету обособленной электрической цепи и условному обозначению проводов.

Таким образом, было собрано более 70 показателей качества объемного электро монтажа, которые сведены в единую таблицу, форма которой аналогична виду таблицы 7. Выше представлены лишь основные показатели из полученного перечня.

Рассмотрим решение задачи выбора лучшего прибора с точки зрения объемного электро монтажа с помощью метода анализа иерархий.

В качестве объектов оценки были выбраны следующие электронные средства: генератор телевизионных сигналов PAL / SECAM TR -0836 и телетест ЛАСПИ ТТ-01.

В результате предварительного анализа было выявлено следующее.

Прибор ЛАСПИ ТТ-01 содержит:

- 1) 43 провода ПМВГ, сечением 0,2 мм², общей протяженностью 4,17 м, 86 паек;
- 2) 25 проводов ПМВГ, сечением 0,12 мм², общей протяженностью 2,24 м, 50 паек;
- 3) 5 проводов МГТФ, сечением 0,12 мм², общей протяженностью 0,2 м, 10 паек.

Генератор телевизионных сигналов PAL / SECAM TR -0836 содержит:

- 1) 29 проводов МГТФ, сечением 0,2 мм², общей протяженностью 3,96 м, 58 паек;
- 2) 4 кабеля РК 50-2-13, общей протяженностью 0,58 м, 16 паек.

Чтобы выбрать подходящий прибор из двух предложенных, были определены пять обобщенных критериев, которым должны удовлетворять приборы: надежность, экономические параметры, электрические параметры, физические параметры, параметры процесса электро монтажа и его подготовки. Эти критерии были разбиты на девять детальных критериев (показателей). Задача состояла в выборе лучшего прибора с точки зрения объемного электро монтажа из генератора телевизионных сигналов PAL / SECAM TR -0836 и телестета ЛАСПИ ТТ-01.

Иерархия критериев представлена на рис. 4. На первом, высшем уровне находится общая цель — «Выбор прибора, лучшего с точки зрения качества объемного электро монтажа». На втором уровне находятся обобщенные критерии, а на третьем – девять детальных критериев, конкретизирующих и уточняющих цель. Четвертый уровень включает в себя два прибора, один из которых лучшим образом должен отвечать запросам.

Согласно методике оценки, в первую очередь определяются абсолютные значения показателей качества. В результате определения абсолютных значений оказалось, что массы приборов примерно одинаковы, что позволяет исключить данный показатель из последующих расчетов.

Затем проводится анализ характеристик обоих приборов по выбранным критериям. Анализ заключается в определении эмоционального суждения и выставлении баллов по каждому критерию, согласно шкале сравнений (см. табл. 1). В связи с тем, что критерии неравнозначны, аналогичным образом был проведен анализ критериев.

Сравнение важности критериев между собой проводится согласно методу анализа иерархий путем составления матрицы парных сравнений и расчета собственного вектора данной матрицы (см. табл. 4). Собственный вектор – это и есть искомый вектор приоритетов.

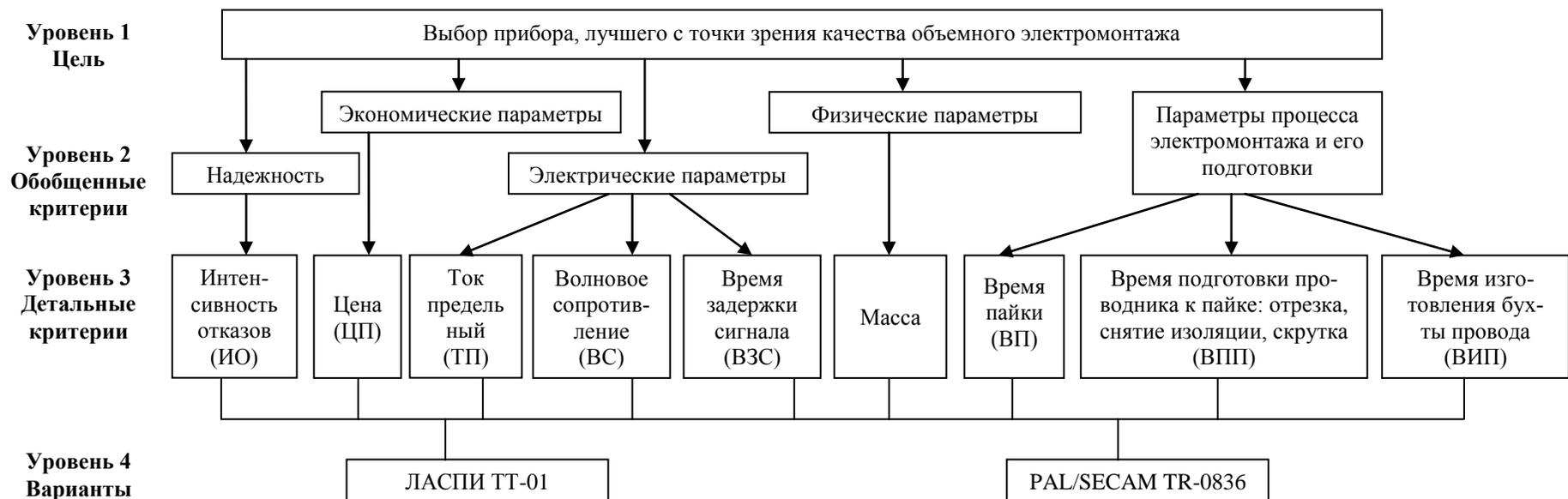


Рис. 4. Иерархия критериев для выбора электронного средства

В результате сравнения важности критериев между собой получаем вектор приоритетов, представленный в табл. 8.

Таблица 8

Приоритеты критериев

| Критерии | ИО | ЦП | ТП | ВИП | ВС | ВПП | ВЗС | ВП |
|-------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Л.П., X_i | 0,297 | 0,071 | 0,153 | 0,071 | 0,297 | 0,020 | 0,071 | 0,020 |

Сокращения наименований показателей соответствуют приведенным в иерархии критериев (см. рис. 4).

После процесса ранжирования критериев необходимо по каждому из них сравнить электронные средства. Сравнение осуществляется путем построения матриц парных сравнений по каждому критерию. Очевидно, что порядок матрицы будет равен 2. Результаты расчета локальных приоритетов сведем в одну таблицу (см. табл. 9).

Таблица 9

Локальные приоритеты приборов по критериям

| Варианты | ИО | ЦП | ТП | ВИП | ВС | ВПП | ВЗС | ВП |
|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| ЛАСПИ ТТ-01 | 0,249 | 0,751 | 0,166 | 0,249 | 0,249 | 0,249 | 0,249 | 0,249 |
| PAL/SECAM TR-0836 | 0,751 | 0,249 | 0,834 | 0,751 | 0,751 | 0,751 | 0,751 | 0,751 |

Свертка критериев или расчет итогового результата осуществляется согласно алгоритму, представленному на рис. 3, учитывая неравнозначность критериев. То есть необходимо перемножить вектор приоритетов критериев, представленный в табл. 8, и локальные приоритеты приборов по критериям, представленные в табл. 9. Итоговый результат представлен в табл. 10, при этом вариант А – это ЛАСПИ ТТ-01, а вариант Б – PAL/SECAM TR-0836.

Таблица 10

Итоговый результат

| Варианты | ИО | ЦП | ТП | ВИП | ВС | ВПП | ВЗС | ВП | К.п. | Место |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| А | 0,074 | 0,053 | 0,025 | 0,018 | 0,074 | 0,005 | 0,18 | 0,005 | 0,271 | II |
| Б | 0,223 | 0,018 | 0,127 | 0,053 | 0,223 | 0,016 | 0,053 | 0,016 | 0,726 | I |

Колонка «К.п.» таблицы 10 содержит значения комплексного показателя.

Прибор PAL/SECAM TR-0836 по качеству объемного монтажа оказывается лучше, чем прибор ЛАСПИ ТТ-01.

Анализ результатов. В процессе сбора информации было определено более 70 показателей качества объемного монтажа. Применяя данные показатели качества, проведена сравнительная оценка электронных средств: генератора телевизионных сигналов PAL / SECAM TR - 0836 и телетеста ЛАСПИ ТТ-01. В качестве метода оценки выбран метод анализа иерархий, математическое обоснование которого приведено выше.

Для сравнительной оценки электронных средств из 70 полученных показателей качества объемного монтажа экспертным путем отобраны основные девять показателей качества, наиболее полно характеризующие качество объемного монтажа выбранных приборов.

Значение комплексного показателя качества объемного электромонтажа прибора PAL / SECAM TR - 0836 получилось выше, чем значение показателя прибора ЛАСПИ ТТ-01. Исходя из этого, сделан вывод, что качество объемного монтажа PAL / SECAM TR – 0836 лучше, чем телетеста ЛАСПИ ТТ-01.

Выводы. В результате исследования сформирована система показателей качества объемного монтажа. В ходе работы проанализирован ряд нормативно-технической документации, включая национальные стандарты, а также другие источники информации (например, справочная литература).

Практическое применение перечня показателей качества объемного монтажа представлено на примере сравнительной оценки качества объемного монтажа электронных средств. В качестве методики оценки предложен метод анализа иерархий, который удобно применять именно для процедуры сравнения или выбора лучшего варианта из нескольких предложенных.

Таким образом, цель работы достигнута – создана система показателей качества объемного монтажа электронных средств. Систему удобно применять не только для комплексной оценки определенного электронного прибора, но и для сравнительной оценки нескольких приборов, что было продемонстрировано выше.

Список литературы

1. Саати, Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий: Пер. с англ. / Т. Саати.– М.: Радио и связь, 1993. – 278 с.: ил.
2. Лавренов, О. П. Конструирование современных радиоэлектронных средств: Учебное пособие / О. П. Лавренов. – Казань: Казанский гос.техн.ун-т, 2002. – 70 с.: ил.
3. Павлов, Е. П. Основы проектирования электронных средств: Курс лекций / О. П. Павлов, И. Т. Санникова. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2004. – 308 с.:ил.
4. Конструирование радиоэлектронных средств / В. Ф. Борисов, О. П. Лавренов, А. С. Назаров, А. Н. Чекмарев. Под ред. А. С. Назарова. – М.: Издательство МАИ, 1996. – 360 с.:ил.
5. Гель, П. П. Конструирование и микроминиатюризация РЭА / П. П. Гель, Н. К. Иванов-Есинович. – М.: Радио и связь, 1988. – 187 с.:ил.
6. Глудкин, О. П. Методы и устройства испытаний РЭС и ЭВС / О. П. Глудкин. – М.: Высшая школа, 1991. – 335 с.:ил.
7. Белоруцов, Н. И. Электрические кабели, провода и шнуры. Справочник / Н. И. Белоруцов, А. Е. Саакян, А. И. Яковлева. – Под редакцией Н. А. Белоруцова; 5-е издание, переработанное и дополненное. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 276 с.: ил.
8. Гуськов, Г. Я. Монтаж микроэлектронной аппаратуры / Г. Я. Гуськов, Г. А. Блинова, А. А. Газаров. – М.: Радио и связь, 1977. – 32 с.
9. Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К. И. Билибин, А. И. Власов, Л. В. Журавлева и др. Под общ. ред. В. А. Шахнова. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 528 с.:ил.

Статья поступила в редакцию 16.11.09.

E. P. Pavlov, E. L. Gryazina, Y. M. Zantimirova

**THE SYSTEM OF QUALITY INDICES OF VOLUMETRICAL
WIREBONDING OF ELECTRONIC MEANS**

Results of the collection of quality indices of volumetrical wirebonding are presented. The methods of comparative estimation of quality indices of electric means wirebonding are examined. The methods are applied on the basis of the elaborated system of quality indices of the volumetric wirebonding.

Key words: *system, quality, index, wirebonding, interconnection, marking, method, analyses, hierarchy.*

ПАВЛОВ Евгений Петрович – кандидат технических наук, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – конструирование электронных средств, исследования в области повышения качества, точности и надежности. Автор 101 публикации. E-mail: PavlovEP@marstu.net

ГРЯЗИНА Екатерина Львовна – аспирантка кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – исследования в области повышения качества изделий, системы качества, оценка соответствия. Автор одной публикации.

E-mail: kkpr@marstu.net

ЗАНТИМИРОВА Юлия Михайловна – студентка радиотехнического факультета МарГТУ. Область научных интересов – исследования в области повышения качества изделий. Автор одной публикации.

E-mail: kkpr@marstu.net

УДК 537.312.62: 621.319.4

О. Н. Афанов

ПРИЗНАКИ «ГОРЯЧЕЙ» СВЕРХПРОВОДИМОСТИ В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ ОБКЛАДКАХ КОНДЕНСАТОРА

Обнаружен и исследован физико-технический эффект, заключающийся в уменьшении активного сопротивления тонкопленочных обкладок конденсатора переменному току проводимости до значений, близких к нулю. Регистрировались признаки «горячей» сверхпроводимости, в том числе в виде указанного уменьшения, при температурах не менее 100°С, плотностях тока около 10^8 А/м², частотах до нескольких кГц. Эффект объясняется принудительной концентрацией носителей тока внутри образующегося тонкого плоского канала, локализованного в ограниченной части объема обкладки и протяженного по всей ее длине. Решающий фактор проявления – «электрическое давление» избыточных поверхностных зарядов заряжающейся обкладки на транспортные электроны, «собирающее» их в область канала из окружающих областей металла. В соответствии с теорией сверхпроводимости, из-за высокой концентрации транспортных электронов металл внутри канала переходит в сверхпроводящее состояние.

Ключевые слова: *высокотемпературная сверхпроводимость, конденсатор, тонкопленочная обкладка, каналирование тока, принудительная концентрация электронов, «электрическое давление».*

Введение. После открытия в 1986 году Г. Беднорцем и К. Миллером высокотемпературной сверхпроводимости в керамических оксидных образцах теоретические и практические работы в этой области приобрели особую актуальность. С этого момента началось интенсивное исследование свойств новых керамических материалов. С тех пор критические параметры и в первую очередь, критические температуры и токи, существенно увеличены. Однако проблема создания сверхпроводников при комнатных и более высоких температурах всё еще остаётся чисто научной. Чтобы придать ей технический характер и создать «горячий» сверхпроводник, требуется, очевидно, ещё немало усилий исследователей.

В статье в кратком виде приведены некоторые результаты теоретических и экспериментальных исследований физических процессов, происходящих в обкладках электрического конденсатора при приложении к нему синусоидального напряжения. Излагаемый материал носит достаточно общий характер, математические расчеты использованы лишь в той мере, чтобы избежать бездоказательных утверждений, и основное внимание обращено на физическую сторону рассматриваемых вопросов. Наиболее интересным, с практической точки зрения, экспериментальным результатом явилось обнаружение физико-технического эффекта (ФТЭ), заключающегося в аномальном уменьшении активного сопротивления $R_{\text{активн}}$ тонкопленочных обкладок электрического конденсатора переменному току проводимости до значений, близких к нулю, при температурах существенно больших, чем комнатная. Большинство экспериментально

наблюдаемых особенностей эффекта удается естественным образом объяснить в рамках теории электромагнитного поля [1] и базовых положений стандартной теории сверхпроводимости [2;3].

Целью работы было обоснование гипотезы об интерпретации эффекта как главного из признаков «горячей» сверхпроводимости в тонкопленочных обкладках конденсаторов.

Решаемые задачи. Для достижения цели решалась задача выработки ряда обобщений и адекватных моделей для корректного объяснения условий реализации и механизмов исследуемого эффекта, на основе анализа накопленного экспериментального материала и уже имеющихся сведений. Была сделана попытка описать реально сложную ситуацию в приближенном виде, с применением достаточно упрощенных модельных представлений. При более детальном анализе необходимо учитывать всю сложность рассматриваемых физических процессов. Подробная математическая теория наблюдаемого эффекта находится на стадии доработки, но уже сейчас можно сделать некоторые несомненные утверждения. Однако для ответа на все имеющиеся вопросы требуются дальнейшие исследования.

Методика исследования и применяемые приборы. В ходе экспериментальных работ применялись известные методы определения сопротивления обкладок переменному току и фиксации момента перехода материалов обкладок в состояние с аномально низкими значениями активного сопротивления. Приведем некоторые из примененных методов определения суммарного активного сопротивления обеих обкладок $R_{\text{сумм.}}$: 1) через измерение активной мощности, теряемой в обкладках, малокосинусным ваттметром с максимальной рабочей частотой до 400 Гц, с ценой деления 0,25 Вт; 2) исходя из измеренного общего сопротивления $Z_{\text{общ.}}$ конденсатора с известной емкостью C и его рассчитанного (при известной емкости) емкостного сопротивления Z_C – по стандартной формуле $R^2_{\text{сумм.}} = Z^2_{\text{общ.}} - Z^2_C$; 3) через измерение угла сдвига фаз φ между вектором тока и напряжения при протекании переменного тока через конденсатор двухлучевым осциллографом С1-114/1, при отсутствии потерь энергии $\varphi = 90^\circ$. В качестве внешнего источника ЭДС применялся низкочастотный генератор синусоидальных сигналов ГЗ-109, токи и напряжения измерялись при помощи электронного ампервольтметра В7-27. При проведении измерений учитывалось наличие переходного (контактного) сопротивления в месте присоединения зажима к обкладке, а также коробление обкладок при размотке конденсатора, из-за чего на отдельных участках обкладок емкость резко падает и описанный физико-технический эффект на этих участках практически отсутствует. Учитывалось, что в случае присоединения зажимов к противоположным концам обкладок их суммарное сопротивление переменному току при отсутствии ФТЭ определяется как результат параллельного соединения сопротивлений обкладок.

Особенности экспериментов. Были выполнены измерения активной мощности, теряемой в длинномерных тонкопленочных обкладках из напыленного алюминия и их активного сопротивления, в широком диапазоне частот приложенного к выводам конденсатора напряжения и при температурах до 100°C . Однако из-за ограниченного объема статьи приведены только некоторые результаты экспериментов. При этом температура ограничивалась только максимально допустимой рабочей температурой использованных для изготовления экспериментальных образцов серийных металло-бумажных конденсаторов. На практике фиксировалось уменьшение $R_{\text{активн.}}$ обкладок не менее чем до двух тысяч раз. Определение реального максимального значения уменьшения было ограничено точностью измерения и чувствительностью примененных приборов. Следу-

ет заметить, что активное сопротивление низкотемпературных и высокотемпературных сверхпроводников переменному току также не равно нулю, а меньше активного сопротивления проводников в резистивном состоянии примерно в десять тысяч раз [4]. Вполне обоснованно можно было предположить, что в проведенных экспериментах регистрировался признак, который можно было интерпретировать как один из главных признаков «горячей» сверхпроводимости в тонкопленочных обкладках конденсатора, и наблюдался сверхпроводящий переменный ток. Основная трудность выявления сверхпроводимости обкладок в случае прохождения через них переменного тока состоит в том, что такие стандартные методы, как обнаружение эффекта Мейсснера, наличие кольцевого незатухающего тока, применимы только к постоянному сверхпроводящему току. Поэтому в рассматриваемом случае приходилось довольствоваться также и рядом косвенных признаков, присущих эффекту и служащих дополнительными аргументами в пользу данной концепции.

Физическое и аналитическое моделирование. Проведенный анализ показал, что экспериментальные данные адекватно описываются в рамках модели локализации тока проводимости в ограниченной части объема обкладки (канале). При этом ток распределяется как по длине, так и по поперечному сечению обкладки неравномерно. Для упрощения будем рассматривать только конденсатор с плоскими обкладками.

Можно условно разделить протекающий по обкладке суммарный ток проводимости на две составляющие. Это, во-первых, направленный от зажимов вдоль обкладки транспортный ток, обеспечивающий доставку зарядов от прикрепленного к началу обкладки зажима источника ЭДС до удаленных частей обкладки. Во-вторых, ответвляющийся от транспортного тока на каждом участке обкладки «зарядный» ток, направленный к заряжающейся поверхности обкладки и обеспечивающий эту зарядку. Следует сразу заметить, что локализуется только транспортный ток с последующим переходом этого тока в сверхпроводящий. Однако из-за того, что «зарядный» ток проходит очень короткое расстояние, в сотые и тысячные доли микрона от транспортного тока до заряжающейся поверхности, и сечением проводника для тока является плоскость всей обкладки, активные потери при этом настолько малы, что даже во втором приближении их можно не учитывать.

Согласно с моделью, решающий вклад в уменьшение $R_{\text{активн}}$ обкладки вносит принудительная концентрация свободных электронов в канал протекания транспортного тока в виде тонкого плоского слоя, локализованного во внутренних слоях обкладки и протяженного по всей ее длине. Носители тока сконцентрированы в канале под внешним «электрическим давлением» избыточных поверхностных зарядов заряжающейся обкладки на транспортные электроны, расположенные во внутренних слоях обкладки. Электрическое силовое воздействие «собирает» электроны в область канала путем смещения из окружающих областей металла, которые при этом обедняются электронами и заряжаются положительно.

Описанный выше физико-технический эффект наблюдался при любых вариантах присоединения зажимов к обкладкам конденсатора, однако наибольший практический интерес представлял вариант, позволяющий изготовить длинномерный токопровод с большой токонесущей способностью, для передачи электрической энергии с малыми потерями. Согласно варианту, токопровод состоит из длинномерных тонкопленочных обкладок конденсатора, входной зажим токопровода присоединен к началу одной обкладки, выходной зажим токопровода при этом присоединен к концу другой обкладки, расположенному у конца первой обкладки. Для увеличения рабочего тока отдельные токопроводы соединяются параллельно. При оптимальных значениях внешних и внут-

ренных «управляющих» параметров токопровод представляет собой сверхпроводниковый кабель, который можно использовать в электроэнергетике, для формирования обмоток электродвигателей, генераторов, трансформаторов и т.д. Это открывает и новые перспективы в «сверхпроводниковой инженерии». В статье приведены результаты экспериментов с применением указанного токопровода, хотя следует упомянуть, что результаты эти, как показали эксперименты, справедливы и для других вариантов присоединения зажимов. Далее везде при упоминании токопровода следует понимать указанный вариант.

Последовательное объяснение основных особенностей эффекта каналирования можно дать с единой точки зрения, в рамках теории электромагнитного поля. Из электростатики следует, что электрический заряд на заряженном проводящем теле любой формы распределяется на его поверхности [1;5]. Происходит это потому, что одноименные заряды внутри тела взаимно отталкиваются и избыточные заряды выталкиваются на поверхность. Внутри тела суммарный заряд и напряженность электрического поля должны быть равны нулю, что обеспечивается, в том числе, и процессами экранировки поверхностных зарядов внутренними свободными электронами [5]. Избыточные заряды на обкладках уже заряженного конденсатора также равномерно распределяются на поверхности, образуя избыточные поверхностные заряды. Поверхностная плотность заряда максимальна на поверхностях обкладок, обращенных в конденсаторе друг к другу [6]. Остальные электроны в объеме металла обкладки перераспределяются так, чтобы их поле внутри металла скомпенсировало поле избыточных зарядов на поверхности [1]. Представим электрическое поле, создаваемое поверхностными избыточными зарядами в глубинных слоях обкладки, как внешнее по отношению к этим слоям. Поле будет действовать на все электроны внутри обкладки, но перемещаться, меняя при этом энергию, под этим воздействием смогут только свободные электроны, расположенные в импульсном пространстве в «тепловом слое» у поверхности Ферми [3]. Свободные электроны будут перемещаться противоположно направлению силовых линий в направлении возрастания электрического потенциала внешнего поля. С физической точки зрения происходят известные процессы экранировки поверхностного заряда обкладки, некомпенсированного зарядом другого знака противоположной обкладки конденсатора. В результате электроны скапливаются или около незаряженной поверхности обкладки в виде протяженного вдоль всей обкладки плоского слоя малой толщины, если избыточные поверхностные заряды другой поверхности этой же обкладки отрицательны, или скапливаются в плоских тонких слоях, примыкающих к поверхностным положительным зарядам. Перейдем к случаю заряжения обкладки переменным напряжением. Все рассмотренное выше, строго говоря, справедливо только для электростатического поля. Однако в рассматриваемом случае допустимо представление переменного электрического поля в конденсаторе в отдельные моменты времени как электростатического поля, т.к. критерием допустимости представления служит соотношение между линейными размерами области, в которой рассматривается поле, и длиной электромагнитной волны λ [1], а при используемых низких частотах порядка промышленных λ превышает характерные размеры в токопроводе. Из рассмотренного достаточно очевидно, что и при прохождении переменного тока через обкладки указанные каналы образуются и сохраняются как стабильные структуры.

В результате описанных процессов концентрация транспортных электронов в области протекания (в канале) переменного тока в обкладках может существенно превышать равновесную концентрацию свободных электронов в незаряженных обкладках в исходном, нерабочем состоянии. Из-за этого канал обладает собственным отрицатель-

ным зарядом и потенциалом. Чтобы электроны перетекали из канала к заряженной поверхности в виде указанного выше «зарядного» тока, потенциал канала должен быть отрицательнее потенциала этой поверхности, чтобы перетекали от заряженной поверхности в канал, потенциал канала должен быть положительнее, что обеспечивается зажимами источника ЭДС в течение всего периода приложенного к обкладкам синусоидального напряжения. Таким образом, в ходе зарядки конденсатора переменным напряжением внутренние слои обкладок демонстрируют эффект макроскопического пространственно-фазового расслоения на обогащенную и обедненную носителями тока фазы.

Согласно стандартной теории сверхпроводимости, критическая температура перехода проводников в сверхпроводящее состояние экспоненциальным образом зависит от концентрации электронов проводимости в материале проводника, при этом в импульсном пространстве эти электроны расположены в тонком «тепловом» слое около поверхности Ферми [2;3]. Описанный выше механизм концентрации способен обеспечить настолько высокую локальную концентрацию транспортных электронов, что даже при достаточно высоких плотностях тока и температурах окружающей среды сверхпроводящее состояние материала обкладки в области канала способно сохраниться.

Условия реализации ФТЭ. Обнаружено, что исследуемый физико-технический эффект уменьшения активного сопротивления обкладок возникает в оптимальных диапазонах значений внешних и внутренних «управляющих» параметров. Из выработанной выше модели и экспериментов следует, что величина концентрации электронов в канале в основном зависит от приложенного к зажимам напряжения и толщины обкладки. Объясняется это тем, что концентрация зависит, в том числе, от поверхностной плотности неподвижных избыточных поверхностных зарядов заряжающейся обкладки σ , обеспечивающих своим электрическим полем, не полностью скомпенсированным электрическим полем зарядов противоположного знака другой обкладки, «электрическое давление». В свою очередь, поверхностная плотность σ линейно пропорциональна приложенному к конденсатору напряжению по формуле:

$$\sigma = q / S = U \cdot C / S,$$

где C – ёмкость, q – заряд, U – разность потенциалов между обкладками конденсатора, S – площадь обкладки. Соответственно, величина концентрации также прямо пропорциональна U . Концентрация зависит и от напряженности электрического поля E между противоположными заряженными и незаряженными поверхностями одной и той же обкладки, между которыми существует [1] определенная разность потенциалов $\Delta\varphi = E \cdot d$, где d – толщина обкладки, и поэтому обратно пропорциональна толщине обкладки. При малых толщинах порядка сотых или даже тысячных долей микрона внутри обкладок возникают весьма сильные электрические поля с большой напряженностью, обеспечивающие значительную концентрацию электронов в канале. Поэтому малую толщину обкладок следует считать доминирующим фактором, обуславливающим возникновение эффекта и позволяющим эффективно регулировать критическую температуру T_K , при которой обкладки переходят в резистивное состояние.

Для практического применения идеален токопровод с равными омическими сопротивлениями обкладок в исходном состоянии. Объясняется это тем, что при частотах, когда емкостное сопротивление сравнимо с омическими сопротивлениями, ток от зажима к зажиму начинает в большей своей части протекать по пути наименьшего сопротивления, в основном протекая только по части «высокоомной» обкладки и всей «низкоомной» обкладке. Транспортный ток в удаленных от зажима частях «высокоомной» обкладки уменьшается, что приводит к уменьшению поверхностной плотности зарядов в этой части и, в конечном итоге, к деградации сверхпроводимости и переходу этой

части в резистивное состояние. На рис. 1 приведена типичная кривая зависимости суммарного активного сопротивления обкладок, определенного путем измерения ваттметром активной мощности токопровода $R_{\text{активн.}}$ по формуле

$$R_{\text{активн.}}^{\Sigma} = P_{\text{активн.}} / I^2,$$

где I – ток через токопровод. Из графика следует, что при большой разнице между исходными сопротивлениями длинномерных обкладок, сравнимой с емкостным сопротивлением токопровода, критическая частота тока, при которой регистрируется переход в резистивное состояние, достаточно мала и составляет ~ 20 Гц.

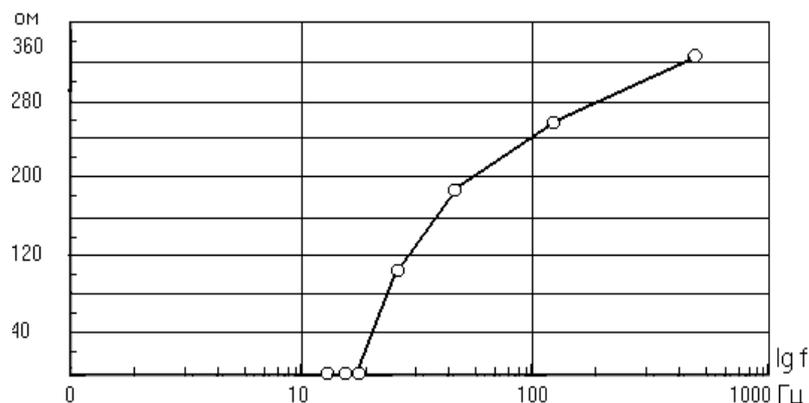


Рис. 1. Полулогарифмический график зависимости суммарного активного сопротивления $R_{\text{активн.}}$ обкладок токопровода от частоты тока. $R_0^1 = 746$ Ом, $R_0^2 = 594$ Ом, толщина обкладок $d \approx 0,01$ мкм. Емкость $C = 3,43$ мкФ. Плотность тока $j \approx 0,5 \cdot 10^8$ А/м²

К сожалению, как показал опыт, омические сопротивления обкладок примененных серийных металло-бумажных конденсаторов сильно различаются, что не позволяло изготовить токопроводы с достаточно большими для измерения ваттметром активными мощностями, т.е. с большими омическими сопротивлениями в исходном состоянии и с минимальными разницеми между ними, для экспериментов при средних, килогерцовых частотах тока. Поэтому изготавливались образцы с малой длиной и малыми исходными сопротивлениями, но с минимальной разницей между ними. Суммарное $R_{\text{активн.}}$ при этом определялось путем измерения разницы напряжений между зажимами и свободными от зажимов концами обкладок. Результаты экспериментов в виде типичных кривых показаны на рис. 2.

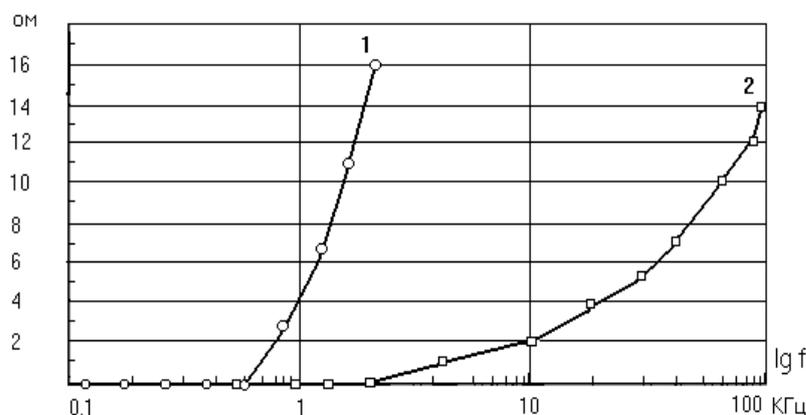


Рис. 2. Полулогарифмические графики зависимостей суммарного активного сопротивления $R_{\text{активн.}}$ обкладок токопровода от частоты тока и температуры. Кривая 1 – 100°С, кривая 2 – 24°С. $R_0^1 = 54$ Ом, $R_0^2 = 54$ Ом, толщина обкладок $d \approx 0,01$ мкм, емкость $C = 0,039$ мкФ. Плотность тока $j \approx 10^7$ А/м²

Из графика заметно существенное возрастание критической частоты, по сравнению с предыдущим случаем, до ~ 2 кГц. Повышение температуры до 100°C привело к снижению критической частоты до ~ 500 Гц.

К условиям проявления эффекта следует отнести – значения толщин обкладок в пределах сотых долей микрометра; оптимальный диапазон величин приложенных к токопроводу напряжений и протекающих токов; частота и температура меньше критической; минимальная разница между омическими сопротивлениями обкладок в исходном состоянии, при этом, чем более емкостное сопротивление конденсатора при данной частоте превышает эту разницу, тем больше и допустимая разница.

Характерные особенности эффекта. В процессе исследований выявлены и характерные особенности эффекта. Приведем некоторые из них. Обнаружилось, что даже при нахождении обкладок в сверхпроводящем состоянии, что фиксировалось ваттметром как нулевое значение потребляемой токопроводом активной мощности, между зажимом на обкладке и противоположным концом этой же обкладки регистрируется разность потенциалов, что при обычном подходе понимается как падение напряжения вдоль обкладки из-за потерь энергии на активном сопротивлении. Примечательно, что на практике в большинстве случаев измерения такого рода разности потенциалов на обкладках размонтированных конденсаторов, при номинальных приложенных напряжениях, вычисленное по стандартной формуле значение этого «сопротивления» соответствует по величине реальному омическому сопротивлению обкладок в исходном состоянии. Известно, что величину $R_{\text{активн.}}$ обкладки токопровода переменному току следует вычислять, исходя из среднего значения тока по всей обкладке, равного половине максимального тока в зажиме [6]. Этого требует линейное уменьшение значения тока в обкладке от максимального в районе зажима до нуля на конце обкладки, из-за чего среднее значение тока равно половине максимального. Дальнейшие исследования показали, что указанные разности потенциалов на обеих обкладках токопровода находятся в противофазе относительно заданного условно положительного направления переменного тока от одного зажима к другому. Противофазность была зафиксирована в том числе и двухлучевым осциллографом. Если бы указанные разности потенциалов были полностью обусловлены падением напряжения на активных сопротивлениях этих обкладок, они были бы синфазны и суммировались бы относительно условно положительного направления. Так как токопровод представляет собой, с точки зрения теории электрических цепей, своеобразную двухпроводную линию с распределенными параметрами без подключения нагрузки, то суммарное падение напряжения на $R_{\text{активн.}}$ обкладок также можно определить измерением напряжения между свободными от зажимов концами обкладок и напряжения на зажимах [1]. Разница между этими напряжениями делится на величину проходящего тока, результат должен быть равен суммарному $R_{\text{активн.}}$ обкладок. Противофазные разности потенциалов, обусловленные неравномерным распределением зарядов по длине обкладок, при такой схеме измерения вычитаются друг из друга, давая в случае расхождения между ними (при разных омических сопротивлениях обкладок в исходном состоянии) мнимое увеличение активного сопротивления. Для получения точного значения суммы активных сопротивлений обкладок из указанной выше разницы напряжений следует дополнительно вычесть разницу противофазных напряжений, появляющихся из-за разницы исходных сопротивлений.

Рассмотрим более подробно физические причины появления псевдосопротивления. Известно, что в том конце обкладки, где поставлен зажим, ток проводимости $I = \max$, далее ток линейно спадает по длине обкладки и в противоположном ее конце равен нулю. Происходит это потому, что на каждом отрезке dx длины обкладки, начиная от ее

начала, ток ответвляется на зарядку прилегающего участка поверхности обкладки, или, по-другому, ответвляется через диэлектрик в виде тока смещения [6]. Из-за этого при протекании переменного тока через токопровод в районах присоединения зажимов в обкладках всегда наибольшая концентрация электронов, которая также линейно уменьшается по длине обкладки до минимального значения в противоположном конце этой же обкладки. Поэтому между началом и концом обкладок в процессе протекания тока возникает разность потенциалов, обусловленная неравномерным пространственным распределением концентрации электронов (заряда) по длине обкладок. Градиент пространственного заряда образуется только за счет движущихся электронов, т.е. связан с существованием тока. Таким образом, при измерениях разности потенциалов между концами обкладки с целью определить величину его активного сопротивления даже при нахождении его в сверхпроводящем состоянии, регистрируется кажущееся, псевдосопротивление, не имеющее отношения к реальному падению напряжению вдоль обкладки из-за потерь активной мощности на активном сопротивлении. Данная разность потенциалов должна существовать даже при охлаждении обкладок до абсолютного нуля температуры.

Частичный, вплоть до полного, переход обкладок в резистивное состояние сложным образом влияет на указанную выше разность потенциалов. При этом существенно меняются измеренные на обкладках значения разности потенциалов, при определенных значениях внешних «управляющих» параметров эта разность потенциалов даже становится равной нулю, что при обычном подходе воспринималось бы как нахождение обкладки в сверхпроводящем состоянии, что не соответствует действительности. В действительности обкладка находится в сверхпроводящем состоянии, когда это сопротивление полностью кажущееся и его величина соответствует омическому исходному сопротивлению. Сложное поведение указанной разности потенциалов объясняется не менее сложным механизмом плавного перехода обкладок в резистивное состояние при изменении внешних «управляющих параметров». Кратко рассмотрим влияние изменения величины тока через обкладки. Выше указывалось, что в том конце обкладки, где поставлен зажим, ток проводимости $I = \max$, далее ток линейно спадает по длине обкладки и в противоположном ее конце равен нулю. Из-за этого в районах присоединения зажимов в канале всегда наибольшая концентрация электронов, которая также линейно уменьшается по длине обкладки до минимального значения в конце обкладки. По этой причине температура $T_{\text{критич.}}$ в канале также уменьшается от максимума к минимуму от зажима к концу обкладки. При уменьшении до определенного уровня транспортного тока $T_{\text{критич.}}$ в областях концов обкладок еще больше уменьшается и эти области обкладок раньше областей в районах прикрепления зажимов переходят в резистивное состояние. Из-за этого может даже реализоваться случай, когда канал в области зажимов еще сверхпроводящий, середина обкладки в частично резистивном состоянии, а в областях концов обкладок сверхпроводимость полностью деградировала. При повышении тока до определенного уровня в каналах в районах прикрепления зажимов плотность тока превышает критический уровень и сверхпроводимость в этих районах деградирует. В районах концов обкладок плотность тока меньше, каналы здесь могут остаться сверхпроводящими. Таким образом, разность потенциалов между зажимом и концом обкладки получается в результате суммирования падений напряжений на всех этих участках из-за активных потерь энергии и разности потенциалов, обусловленной неравномерным пространственным распределением тока по длине обкладки. Дело осложняется еще и тем, что обкладка несколько по-разному ведет себя при приходе положительной и отрицательной полуволны синусоидального тока. Не рассматривая эти

достаточно сложные механизмы, упомянем, что по результатам экспериментов, при уменьшении тока «сопротивление» обкладки уменьшается вплоть до нуля, при увеличении тока возрастает больше величины омического сопротивления обкладки в исходном состоянии. Эти изменения зависят от толщины обкладок. На рис. 3 показаны полулогарифмические графики зависимостей активных сопротивлений отдельных обкладок от протекающих через зажимы токов, иллюстрирующие сказанное.

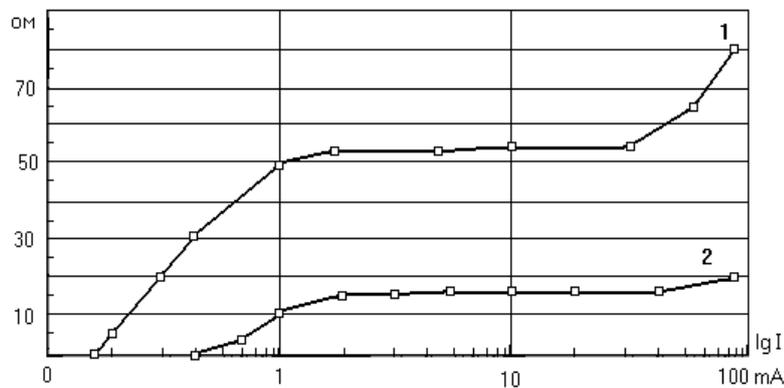


Рис. 3. Полулогарифмические графики зависимостей активных сопротивлений обкладок от величины протекающих токов. Частота тока 2 кГц. $C_1 = C_2 = 0,048$ мкФ. Кривая 1 – исходное сопротивление обкладки ~ 53 Ом, толщина $d \approx 0,005$ мкм. Кривая 2 – исходное сопротивление обкладки ~ 15 Ом, толщина $d \approx 0,015$ мкм

Рассмотрим причины соответствия величины псевдосопротивления реальному омическому сопротивлению обкладок в исходном состоянии. Конденсатор с потерями энергии в обкладках (без учета потерь в диэлектрике) можно заменить эквивалентной схемой, состоящей из соединенных последовательно идеального конденсатора без потерь и сопротивления R , равного суммарному $R_{\text{активн.}}$ обкладок [6]. Если конденсатор включен в цепь постоянного тока, после замыкания цепи пройдет лишь кратковременный ток, заряжающий конденсатор. Как только конденсатор полностью зарядится и напряжение на обкладках (противодействующая ЭДС емкости, направленная против приложенного к конденсатору напряжения) ε_C сделается равным ЭДС генератора ε_G , ток прекратится. В начале процесса заряда, когда конденсатор еще не заряжен, $\varepsilon_C = 0$, поэтому вся ЭДС генератора приложена только к сопротивлению R и начальный ток I_0 имеет максимальную величину, равную ε_G/R . В этом случае незаряженный конденсатор представляет собой как бы короткое замыкание. В соответствии с этим, на начальных стадиях прихода положительной и отрицательной полуволны переменного напряжения к зажимам, когда напряжение практически равно нулю и конденсатор не заряжен, также наблюдается зависящий от постоянной времени конденсатора, практически мгновенный скачок переменного тока до амплитудного значения [6]. В результате также скачком возрастает поверхностная плотность поверхностных зарядов обкладок. В процессе скачка плотность достигает значения, при котором проявляется сверхпроводимость. Однако до появления сверхпроводимости вольтметр регистрирует падение напряжения вдоль обкладки, связанное с потерями энергии. Рассмотрим только простой случай, когда сверхпроводимость появляется через какое-то короткое время после достижения амплитудного значения тока, поэтому при амплитудном значении тока вольтметр еще измеряет амплитудное, максимальное значение падения напряжения на обкладке из-за потерь энергии. Из-за этого максимум контролируемой током указанной выше разности потенциалов, обусловленной неравномерным пространственным рас-

пределением концентрации электронов по длине обкладок, совпадает по значению с максимальным значением падения напряжения на обкладке из-за потерь энергии. Это и является причиной указанной характерной особенности ФТЭ. Таким образом, величина псевдосопротивления контролируется величиной омического сопротивления незаряженной обкладки и при определенных условиях может быть равна ей. Не вызывает сомнений, что именно эта особенность и явилась существенным психологическим барьером, не позволившим исследователям своевременно обнаружить описанный выше эффект. Можно также сделать вывод, что в течение очень короткой части периода в районе амплитудных значений тока сверхпроводимость отсутствует. Это практически не оказывает влияния на исследуемый эффект при малых, сравнимых с промышленным, частотах, но обуславливает, в числе прочих причин, переход обкладки в резистивное состояние при высоких частотах.

Наконец, следует упомянуть еще одну заслуживающую внимания характерную особенность поведения обкладок в процессе проявления изучаемого физико-технического эффекта. Заключается она в постепенном выравнивании величин изначально разных «сопротивлений» обкладок с повышением частоты. Выравнивание сложным образом зависит и от величины протекающего тока. К этому также приводит достаточно сложный механизм суммирования падений потенциалов за счет потерь активной энергии в обкладках и разностей потенциалов за счет неравномерного распределения тока по длине обкладок. Почти все упомянутые выше характерные особенности поведения активных сопротивлений обкладок в процессе протекания токов разной силы и различных частот наиболее просто и адекватно объясняются на основе принятой в работе гипотезы. Гипотеза заключается, как уже упоминалось, в переходе локализованного в обкладке канала в сверхпроводящее состояние под воздействием внутренних и внешних факторов. Приведенные особенности не исчерпывают весь список присутствующих эффекту особенностей, но заслуживают внимания как наиболее характерные. Следует добавить, что исходя из практики и выработанной теории ФТЭ, обкладки заряженного конденсатора находятся в сверхпроводящем состоянии. Убедиться в этом можно, применяя известные бесконтактные методы регистрации сверхпроводимости, например, изготовив два плоских кольцеобразных конденсатора из тонкопленочных обкладок и подвесив их на нитках вблизи друг от друга. При нахождении этих конденсаторов в заряженном состоянии и индуцировании в них постоянных кольцевых токов плоскости конденсаторов устанавливаются перпендикулярно. Таким образом, одним из способов перевода токопроводящих материалов в сверхпроводящее состояние является изготовление из них тонкопленочных обкладок конденсатора с последующей зарядкой этого конденсатора.

Выводы.

1. Обнаружен физико-технический эффект в виде аномального уменьшения активного сопротивления тонкопленочных обкладок электрического конденсатора переменному току проводимости до значений, близких к нулю, при температурах существенно больших, чем комнатная. Эффект можно интерпретировать как признак «горячей» сверхпроводимости, вероятность соответствия предложенной гипотезы реальной действительности достаточно высока.

2. Установлено, что главная причина эффекта – принудительная концентрация свободных электронов обкладки в протяженный по всей ее длине тонкий плоский канал протекания транспортного тока, локализованного во внутренних слоях обкладки и неравномерно распределенного по длине обкладки. Аргументом в пользу данной концепции являются и характерные особенности эффекта, которые адекватно объясняются, исходя из модели каналирования и наличия сверхпроводимости в канале.

3. Порог возникновения эффекта определяется номинальными уровнями внутренних и внешних «управляющих» параметров, таких, как толщина и сопротивление обкладок в исходном состоянии, разность этих сопротивлений, частота и плотность тока, приложенное к конденсатору напряжение, емкость, температура. Доминирующим фактором, обуславливающим реализацию эффекта, следует считать малую толщину обкладок в пределах сотых долей микрона.

Список литературы

1. Нейман, Л. Р. Теоретические основы электротехники: в 2-х т. / Л. Р. Нейман, К. С. Демирчян. – Л.: Энергоиздат, 1981. Т. 1. – 536 с. – Т. 2. – 416 с.
2. Шриффер, Дж. Теория сверхпроводимости / Дж. Шриффер. – М.: Наука, 1970. – 312 с.
3. Займан, Дж. Принципы теории твердого тела / Дж. Займан. – М.: Мир, 1974. – 472 с.
4. Ашкрофт, Н. Физика твердого тела: в 2-х т. / Н. Ашкрофт, Н. Мермин. – М.: Мир, 1979. – Т. 1. – 400 с. Т. 2. – 423 с.
5. Яворский, Б. М. Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – М.: Наука, 1968. – 940 с.
6. Ренке, В. Т. Электрические конденсаторы / В. Т. Ренке. – Л.: Энергия, 1969. – 592 с.

Статья поступила в редакцию 17.12.09.

O. N. Afonov

THE SIGNS OF «HOT» SUPERCONDUCTIVITY IN THIN FILM CAPACITOR PLATES

The physical – technical effect revealed in decreasing of active resistance of thin film capacitor plates to the alternating current of the conductivity to the values, closer to zero is discovered and investigated. The signs of «hot» superconductivity including the indicated decrease at the temperatures no less than 100°С and densities of the current about 10⁸ A/m², frequencies to several kHz were registered. The effect is explained by the forced concentration of the current carrier inside the formed thin flat channel located in the limited part of the capacitor plate volume and stretched along its length. The determining factor of the display is the electric pressure of excess surface charges of the charging capacitor plate on transport electrons «gathering» them in the channel field from the surrounding fields of the metal. In accordance with the theory of superconductivity owing to the high concentration of transport electrons the metal inside the channel is turned into the superconducting condition.

Key words: *highly temperature superconductivity, capacitor, thin film capacitor plate, current channeling, forced concentration of electrons, «electric pressure».*

АФОНОВ Олег Николаевич – кандидат технических наук, ведущий инженер-электроник кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – надежность радиоэлектронной аппаратуры. Автор 22 публикаций.
E-mail: kkpr@marstu.net

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

УДК 378.147.001.76:338.2

ОТ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОЙ ОЛИМПИАДЫ К НАУЧНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ В ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧНЫХ ОТРАСЛЯХ ИННОВАЦИОННОЙ ЭКОНОМИКИ РОССИИ

В рамках Федеральной целевой программы (ФЦП) «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» (2009 – 2013 годы) по направлению 2 «Обеспечение привлечения молодежи в сферу науки, образования и высоких технологий, а также закрепления ее в этой сфере за счет развитой инфраструктуры» Научно-координационный совет ФЦП одобрил проведение в 2009 году двух международных олимпиад, двух всероссийских олимпиад среди студентов ВПО по нескольким междисциплинарным направлениям инновационного характера, пяти всероссийских олимпиад среди студентов ВПО по отдельным дисциплинам или междисциплинарному направлению и пяти всероссийских олимпиад среди студентов СПО, обучающихся по направлениям высокотехнологичных и социально значимых секторов экономики. После проведения соответствующего конкурса была определена конкретная тематика олимпиад.

Основной акцент был сделан на поддержку олимпиад с использованием интернет-технологий, позволяющих увеличить количество и расширить географию участников олимпиады, уменьшить влияние человеческого фактора на ее результаты, расширить возможности для участия в олимпиаде людям с ограниченными возможностями, повысить уровень компетенций педагогов и студентов в области информационных технологий, организовать в перспективе сетевое взаимодействие субъектов образовательного пространства для создания общероссийской системы оценки качества образования, значительно уменьшить затраты на проведение отборочных туров (отсутствие финансовых затрат на проезд, проживание участников и т.п.).

Большой интерес представляют открытые интернет-олимпиады, проводящиеся в режиме онлайн. Такие олимпиады проводятся в режиме компьютерного тестирования в вузах Российской Федерации с 2008 года по отдельным дисциплинам высшего профессионального образования. Полученный опыт показал большую заинтересованность со стороны студенчества и преподавателей в таких олимпиадах как в России, так и за ее пределами.

Одним из победителей конкурса на проведение олимпиады в 2009 году в рамках ФЦП стал Марийский государственный технический университет. Всероссийская студенческая олимпиада 2009 года «Информационные технологии в сложных технических

системах», которую провел МарГТУ, проводилась в два тура: первый тур – как полидисциплинарная интернет-олимпиада в режиме онлайн по математике, физике и информатике (17–24 октября 2009 года) и второй тур – очный (11–13 ноября 2009 года). Проведению олимпиады предшествовала большая научно-исследовательская и методическая работа высокопрофессионального коллектива профессорско-преподавательского состава МарГТУ и привлеченных из других вузов ученых и специалистов по разработке уникальных тестовых материалов и задач олимпиады. Были подготовлены программные оболочки и сайт олимпиады www.i-olymp.ru.

В первом туре олимпиады приняли участие 5019 студентов из 131 вуза России, Казахстана и Белоруссии (рис. 1). В результате на второй тур были отобраны студенты, обладающие высоким уровнем подготовки по естественно-научным дисциплинам.



Рис. 1. Регионы-участники олимпиады «Инфокоммуникационные технологии в сложных технических системах»

На второй тур олимпиады в г. Йошкар-Олу, в Марийский государственный технический университет съехались студенты и их руководители из всех федеральных округов России (57 студентов из 42 вузов), мероприятие стало настоящим праздником науки для представителей вузов. В работе Программного комитета, оргкомитета и жюри олимпиады приняли участие ведущие ученые и педагоги Российской Федерации, стран ближнего (Азербайджан, Казахстан) и дальнего зарубежья (Израиль, Вьетнам), представители учебно-методических объединений вузов. Во втором туре участникам были предложены олимпиадные задания междисциплинарного характера, ориентированные на практику.

В процессе выполнения олимпиадных заданий самый высокий уровень подготовки, умение творчески мыслить и предлагать нестандартные оригинальные решения задач в области инфокоммуникационных технологий в сложных технических системах показали студенты: Саровского государственного физико-технического института – Урбанович Аркадий Константинович (1 место), Санкт-Петербургского политехнического университета – Малышев Евгений Иванович (2 место) и Белорусско-Российского университета – Шкрабов Антон Юрьевич (3 место) (рис. 2).

Победителями по федеральным округам признаны: Фаст Юлия Сергеевна, Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова (Сибирский и Дальневосточный федеральные округа); Ишимова Полина Борисовна, Челябинский государственный университет (Уральский федеральный округ); Урбанович Аркадий Константинович, Саровский государственный физико-технический институт (Приволжский федеральный округ); Ярцев Сергей Евгеньевич, Военная академия воздушно-

космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь, Центральный федеральный округ); Орлов Андрей Андреевич, Волгоградский государственный университет (Южный федеральный округ); Малышев Евгений Иванович, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет (Северо-Западный федеральный округ). Большинство участников олимпиады продемонстрировали высокий уровень сформированных компетенций в области инфокоммуникационных технологий для решения задач, связанных с потребностями современного промышленного производства, способность к анализу и обработке информации и принятию решений в области сложных технических систем.



Рис. 2. Мероприятия олимпиады «Инфокоммуникационные технологии в сложных технических системах» и ее победители

Церемония награждения победителей и закрытия олимпиады в МарГТУ проходила в торжественной обстановке, были приглашены сотрудники организаций, представлявших научно-производственные кластеры в области ИКТ. Фото с закрытия олимпиады приведены на сайте МарГТУ www.marstu.net и сайте олимпиады www.i-olymp.ru. Проведение олимпиады широко освещалось в СМИ Республики Марий Эл, в серии новостных выпусков ВГТРК/ГТРК «Марий Эл». Два информационных сообщения (октябрь и ноябрь 2009 года) о результатах проведения олимпиады было опубликовано на сайте «Президент России молодым ученым и специалистам» www.youngscience.ru.

Среди результатов олимпиады: развитие у студентов способностей к использованию инфокоммуникационных технологий в сложных технических системах для решения потребностей современного промышленного производства, формирование предложений и рекомендаций по разработке новых федеральных образовательных программ высшего профессионального образования, развивающих компетенции, связанные со способностью к анализу и обработке информации с использованием информационных и коммуникационных технологий, и профессиональные компетенции для работы в сложных технических системах.

Проведение междисциплинарной олимпиады позволило выявить по-настоящему талантливых молодых людей, способных к научным исследованиям, связанным с потребностями рынка в высокотехнологичных отраслях инновационной экономики России.

В. А. Иванов, Н. В. Рябова

Статья поступила в редакцию 10.12.09.

**FROM THE INTERDISCIPLINARY COMPETITION
TO SCIENTIFIC RESEARCHES IN HIGHLY TECHNOLOGICAL
BRANCHES OF INNOVATIONAL ECONOMICS OF RUSSIA**

All-Russian student competition «Info communicational technologies in complex technical systems» held by MARSTU in 2009 was conducted in 2 rounds: the first round was a poly disciplinary on-line internet-competition in Mathematics, Physics and Information Science (October 17–24, 2009), and the second one was a full-time round (November 11–13, 2009).

The interdisciplinary competition allowed to discover really talented young people capable of scientific researches connected with the market demands in highly technological branches of innovational economics of Russia.

ИВАНОВ Владимир Алексеевич – руководитель госконтракта на проведение олимпиады, доктор физико-математических наук, профессор, проректор по научной работе и инновационной деятельности МарГТУ.

E-mail: vai@marstu.net.

РЯБОВА Наталья Владимировна – ответственный исполнитель по госконтракту на проведение олимпиады, председатель жюри, доктор физико-математических наук, профессор, зав. кафедрой радиотехники и связи МарГТУ, член Совета УМО вузов России в области Телекоммуникаций.

E-mail: krts@marstu.net.

УДК 002 (049.32)

НОВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РЕШЕНИЯ ПРОБЛЕМЫ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ОБЪЕКТА НА ЗЕМЛЕ

Рецензия на монографию:

*Иванов В. А. Многочастотное наклонное зондирование ионосферы
для загоризонтного позиционирования
/ В. А. Иванов, Е. В. Катков. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2009. – 218 с.*

Рецензируемая монография подготовлена на основе кандидатской диссертации «Загоризонтное позиционирование с использованием многочастотного наклонного зондирования ионосферных радиолоний», успешно защищенной Е. В. Катковым в 2007 году в Казанском государственном университете. Теперь, благодаря выпущенной издательством МарГТУ монографии, глубокие теоретические выводы и актуальные практические рекомендации работы стали достоянием широкого круга специалистов, работающих в областях: распространение радиоволн и радиосигналов в ионосферной плазме, позиционирование с использованием отражения высокочастотных радиосигналов от ионосферы Земли.

Рассматриваемая в монографии проблема – повышение точности определения координат объекта на Земле по данным о запаздывании отраженных ионосферой радиосигналов, излучаемых передатчиками с заданными координатами, обладает большой актуальностью из-за своей практической значимости. Однако в литературе отсутствует системное изложение вопросов, относящихся к этой актуальной проблеме, и рецензируемая монография восполняет данный пробел.

Безусловно, спутниковые системы позиционирования обладают гораздо более высокой точностью определения местоположения объекта, чем наземные ВЧ системы. Однако можно привести ряд важных задач, для решения которых применимы только загоризонтные радиотехнические системы, использующие в качестве переносчиков информации отраженные от ионосферы декаметровые радиосигналы. Это системы загоризонтной радиолокации и ВЧ радионавигации. Для них существующая проблема обеспечения высокой точности определения дальности по земной поверхности до объекта, главным образом, обусловлена отсутствием достаточной информации о текущем состоянии ионосферы из-за ее пространственно-временной изменчивости и неоднородности.

В монографии рассмотрены новые возможности повышения точности при загоризонтном позиционировании с развитием и применением метода многочастотного наклонного зондирования ионосферных радиолоний сложными декаметровыми сигналами. Представлены теоретические, методические и практические аспекты решения задачи местоопределения объекта за линией горизонта при отражении многочастотных радиосигналов от ионосферы. В работе представлено развитие методики решения еще одной актуальной задачи – дистанционного определения основных параметров профиля электронной концентрации в F слое ионосферы над труднодоступными регионами

земного шара. Действие разработанных методик иллюстрируется богатым экспериментальным материалом, который является новым и сам по себе имеет большое научное и практическое значение.

Монография может быть использована в учебном процессе вузов для студентов, аспирантов и преподавателей, специализирующихся в области радиофизики, радионавигации и радиолокации.

А. Н. Леухин

Статья поступила в редакцию 05.12.09.

**NEW RESULTS IN PROBLEM SOLVING OF ACCURACY ENHANCEMENT
OF OBJECT POSITION DETERMINATION ON THE EARTH**

The monograph «Multi frequency oblique ionospheric sounding for transhorizon positioning» (Yoshkar-Ola: MARSTU, 2009.–218 p.) by Ivanov V. A., Katkov E. V.

The problem of the accuracy enhancement of object position determination on the Earth using data about lagging of reflected by the ionosphere radio signals radiated by transmitters with machine coordinates, examined in the monograph is very urgent today owing to its practical significance. There is no systematic review of questions relative to this problem in technical literature and the given monograph makes up this deficiency.

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 180 публикаций.

E-mail: kinf@marstu.net

**УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ,
ОПУБЛИКОВАННЫХ
В ЖУРНАЛЕ В 2009 ГОДУ**

**ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ
И РАДИОТЕХНИКА**

С. В. Атаманчук, М. И. Рябова, П. Е. Сарфанников, А. А. Чернов. Модели и методы математического и полунатурного моделирования процесса приёма радиолокационных сигналов

Р. Р. Бельгибаев, Д. В. Иванов, В. А. Иванов, М. И. Рябова. Автоматическое обнаружение работы и поддержание синхронизации станций в мировой сети ЛЧМ ионозондов

А. А. Елсуков. Синтез и анализ численной модели вертикального однопозиционного ЛЧМ зонда

В. А. Иванов, Н. В. Рябова, И. Е. Царев, А. В. Коркин. Автоматическое определение отношения сигнал – шум при измерении функции рассеяния узкополосных декаметровых радиоканалов

Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова, А. Ю. Чернышев. Формирование и взаимные преобразования порождающих и проверочных матриц линейных блочных кодов

В. В. Рожнецов, Т. А. Лежнина. Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий

И. В. Рябов, П. М. Юрьев. Системы синтеза частот и сигналов как основные функциональные узлы современных радиоэлектронных средств

А. Ю. Чернышев. Коды цифрового представления и их взаимные преобразования

А. Ю. Чернышев. Синхронизация многоуровневых кодов линий передачи

**ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА
И ИНФОРМАТИКА**

Ю. Е. Гарипова. Предварительная обработка и выделение контуров изображений предстательной железы в сценах рентгеновской томографии

М. А. Егوشин. Экспериментальное исследование потенциальной помехоустойчивости распознавания 2D и 3D изображений при условии их произвольных вращений

Р. В. Ерусланов. Клавиатурная идентификация пользователя на базе метода многосвязного представления

Ю. А. Ипатов, А. В. Кривецкий. Обнаружение границ разномасштабных клеточных структур на основе вейвлет-анализа

**LIST OF MATERIALS
PUBLISHED IN
MarSTU REPORTER IN 2009**

**TELECOMMUNICATION
AND RADIO ENGINEERING**

S. V. Atamanchuk, M. I. Ryabova, P. E. Sarfannikov, A. A. Chernov. Models and methods of mathematical and half-sized modeling of the process of radar-tracking signals reception

1

R. R. Belgibaev, D. V. Ivanov, V. A. Ivanov, M. I. Ryabova. Automatic detection of work and maintenance of synchronization of stations in the global network of LFM ionosondes

2

A. A. Yelsoukov. Synthesis and analysis of numerical model of a vertical one-item LFM probe

V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, I. E. Tsarev, A. V. Korkin. Automatic determination of the signal-to-noise ratio when measuring the scattering function of narrow-band decameter radio channels

1

3

E. V. Petuhova, Y. V. Sushentsova, A. Y. Chernyshev. Formation and reciprocal transformations of generator and check matrices of linear block codes

3

V. V. Rozhentsov, T. A. Lezhnina. The method of determining the eyesight resolution by the light flicker frequency

3

I. V. Ryabov, P. M. Yuryev. Systems of frequencies and signals synthesis as basic functional units of modern radio-electronic means

2

A. Yu. Chernyshev. Codes of digital representation and their mutual transformations

1

A. Yu. Chernyshev. Synchronization of multilevel codes of transmission lines

2

**COMPUTER ENGINEERING
AND INFORMATION TECHNOLOGY**

Yu. Ye. Garipova. Preliminary processing and allocation of contours of a prostate gland images in the scenes of x-ray tomography

2

M. A. Yegoshin. Experimental research into potential noise stability in recognition of 2D and 3D images on condition of their arbitrary rotations

1

R. V. Eruslanov. Keyboard identification of the user on the basis of the multilinked presentation method

3

Yu. A. Ipatov, A. V. Krevetsky. Detection of borders multiscale cellular structures on the basis of wavelet-analysis

- А. А. Рожнецов, А. А. Баев, А. С. Наумов.** Применение методов кватернионного анализа для выделения изображений дорог в 3D сценах
- А. А. Рожнецов, А. А. Баев, А. С. Наумов.** Распознавание и оценка параметров многоградационных пространственных изображений с неупорядоченными отсчетами
- А. А. Рожнецов, А. А. Баев, К. В. Морозовский.** Обработка 3D изображений на базе кватернионного преобразования Фурье
- Р. Г. Хафизов, Я. А. Фурман.** Векторные поля на поверхности трехмерных сцен и подходы к их анализу
- Р. Г. Хафизов, Я. А. Фурман.** Исследование влияния яркостной информации точек пространственного группового точечного объекта на устойчивость его проволочной модели
- Р. Г. Хафизов, Д. Г. Хафизов, С. А. Охотников.** Применение стереографической проекции для решения задач распознавания контуров изображений

ЭЛЕКТРОНИКА

- С. Ю. Алёхин, А. Б. Савиных.** Устройства системы прецизионного управления дискретным электроприводом
- О. Н. Афонов.** Признаки «горячей» сверхпроводимости в тонкопленочных обкладках конденсатора
- Н. В. Белова, Л. А. Стешина, И. О. Танрывердиев.** Способ и алгоритм повышения динамической точности измерения параметров газовой среды
- А. Р. Буев, В. Н. Игумнов, А. П. Большаков, Ю. Н. Осипов.** Разработка и исследование сверхпроводниковых ограничителей тока резистивного типа
- В. Т. Изиков.** Организация и проектирование функционально ориентированных процессоров, управляемых потоком данных
- М. А. Ляпина.** Статистические методы оценки качества технологических процессов изготовления металлокерамических корпусов и плат
- А. А. Нагаев, В. Н. Леухин.** Анализ применимости электроискровой подгонки для корректировки функциональной характеристики пленочных резистивных элементов
- Е. П. Павлов, Е. Л. Грязина, Ю. М. Зантимирова.** Система показателей качества объемного электромонтажа электронных средств
- И. В. Петухов, Л. А. Стешина, И. О. Танрывердиев.** Система распределенного управления и вывода информации для автоматизации непрерывных технологических процессов в реальном времени

- A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev, A. S. Naoumov.** Application of quaternion analysis methods for allocation of road images in 3D stages
- A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev, A. S. Naoumov.** Recognition and estimation of parameters of multigradational spatial images with the disorder readout
- A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev, K. V. Morozovskiy.** Processing of 3D images on the basis of quaternion inverse Fourier transformation
- R. G. Khafizov, Ya. A. Furman.** Vector fields on the surface of three-dimensional stages and approaches to their analysis
- R. G. Khafizov, Ya. A. Furman.** Research of points brightness information influence of a spatial group dot object on the stability of its wire model
- R. G. Hafizov, D. G. Hafizov, S. A. Ohotnikov.** Application of stereographic projection for solving problems of recognition of image contours

ELECTRONICS

- S. Yu. Alyokhin, A. B. Savinykh.** Devices for the system of precision control of a discrete electric drive
- O. N. Afonov.** The signs of «hot» superconductivity in thin film capacitor plates
- N. V. Belova, L. A. Steshina, I. O. Tanriverdiev.** Way and algorithm of increasing dynamic accuracy of gas environment parameters measurement
- A. R. Bouyev, V. N. Igoumnov, A. P. Bolshakov, Yu. N. Osipov.** Development and research of superconductive terminators of resistive type current
- V. T. Izikov.** The organization and designing of functionally focused processors controlled by the stream of data
- M. A. Lyapina.** Statistical methods for assessment of the manufacturing quality of ceramic-metal cases and boards technological processes
- A. A. Nagaev, V. N. Leuhin.** The analyses of applicability of the electro-spark trimming for the correction of the taper of the film resistance elements
- E. P. Pavlov, E. L. Gryazina, Y. M. Zantimirova.** The system of quality indices of volumetric wirebonding of electronic means
- I. V. Petoukhov, L. A. Steshina, I. O. Tanryverdiev.** System for distributed control and putting out information for automation of continuous technological processes in real time

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

Ю. С. Андрианов. 12 Московский международный салон промышленной собственности «Архимед–2009»

В. А. Иванов, Н. В. Рябова. От междисциплинарной олимпиады к научным исследованиям в высокотехнологических отраслях инновационной экономики России

С. Г. Кудрявцев. Международная научная студенческая конференция – экзамен на профессиональную зрелость

А. Н. Леухин. Новые результаты решения проблемы повышения точности определения координат объекта на Земле (рецензия на монографию)

И. Е. Царев. Участие молодых инноваторов МарГТУ во Всероссийском образовательном форуме «Селигер – 2009»

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

Yu. S. Andrianov. 12 Moscow international trade fair of industrial property «Archimedes–2009»

V. A. Ivanov, N. V. Ryabova. From the interdisciplinary competition to scientific researches in highly technological branches of innovational economics of Russia

S. G. Koudryavtsev. International scientific students' conference – examination for a professional maturity

A. N. Leuhin. New results in problem solving of accuracy enhancement of object position determination on the Earth (monograph review)

I. Ye. Tzaryov. Participation of young innovators of the MarSTU in the All-russia educational forum «Seliger – 2009»

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 завершенных исследований автора, ранее не публиковавшихся.

К печати принимаются материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Рукописи проходят обязательное рецензирование. В «Вестнике ...» печатаются только статьи, получившие положительные рецензии.

Отклоненные в результате рецензирования материалы возвращаются в одном экземпляре (с приложением копии рецензии).

Автор передает журналу в лице его учредителя сроком на пять лет следующие исключительные имущественные права на материал: право воспроизводить произведение (право на воспроизведение); право распространять экземпляры произведения любым способом, в том числе продавать, сдавать в прокат (право на распространение); право импортировать экземпляры произведения в целях распространения (право на импорт); право сообщать произведение для всеобщего сведения по кабелю, проводам или с помощью иных аналогичных средств (право на сообщение для всеобщего сведения по кабелю); право переводить произведение (право на перевод).

Заявка об опубликовании материала, поступившая в адрес журнала, является конклюдентным действием, направленным на возникновение указанных прав и обязанностей.

Требования к оригиналам представляемых работ

Структура научной статьи

1. Аннотация (3-4 предложения), ключевые слова.
2. Введение (оценка состояния вопроса, основанная на обзоре литературы с мотивацией актуальности; выявленное противоречие, позволяющее сформулировать проблемную ситуацию).
3. Цель работы, направленная на преодоление проблемной ситуации (1-2 предложения).
4. Решаемые задачи, направленные на достижение цели.
5. Математическое, аналитическое или иное моделирование.
6. Техника эксперимента и методика обработки или изложение иных полученных результатов.
7. Интерпретация результатов или их анализ.
8. 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., отступ первой строки на 0,75 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, полужирный, прописью).

Далее размещается аннотация. Аннотация статьи представляется на **русском и английском языках**.

Рисунки, графики, таблицы должны иметь нумерационный и тематический заголовки (размер шрифта 10 пт, заголовки полужирный).

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, ученая степень, должность, область научных интересов, количество опубликованных работ, телефон, e-mail, домашний адрес.

К статье прилагаются следующие **документы**:

- рекомендация кафедры;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Подписка на журнал осуществляется по «Объединенному каталогу. Пресса России. Газеты и Журналы» (подписной индекс **42916**, тематический указатель: Научно-технические издания. Известия РАН. Известия вузов).

Следующий номер журнала выйдет в мае 2010 года.