

ВЕСТНИК 2(3) 2008

МАРИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-прикладной журнал

Издаётся с ноября 2007 года
Выходит три раза в год

СЕРИЯ «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы»

Учредитель:

ГОУ ВПО «Марийский государственный
технический университет»

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

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

Адрес редакции:

424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Тел. (8362) 68-60-12

Факс (8362) 41-08-72

e-mail: vestnik@marstu.net

Редактор *Т. А. Рыбалка*
Дизайн обложки *Л. Г. Маланкина*
Компьютерная верстка *Д. Н. Симонов*
Перевод на английский язык
О. В. Филипчук

Подписано в печать 20.09.08.
Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. п. л. 9,76. Уч.-изд. л. 7,6.
Заказ № 83/08. Тираж 500 экз.

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

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

Главный редактор Е. М. Романов

Главная редакционная коллегия:

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

(главный редактор)

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

(первый зам. гл. редактора)

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

(зам. гл. редактора)

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

(зам. гл. редактора)

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

(зам. гл. редактора)

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

(отв. секретарь)

Редакционная коллегия серии:

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

(зам. гл. редактора)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

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

3

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

13

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

22

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

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

27

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

35

Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова, А. Ю. Чернышев. Непосредственное формирование порождающих матриц и практическое применение кодов Адамара

42

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

48

ЭЛЕКТРОНИКА

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

56

А. А. Нагаев, В. Н. Леухин. Влияние диэлектрической маски на корректировку величины сопротивления толсто пленочных резисторов методом электроискровой подгонки

63

М. А. Передреева, В. В. Егوشин. Проблема согласования усадочных свойств металлизационного слоя и подложки при производстве металлокерамических плат

68

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

А. А. Рожнецов. К 100-летию со дня рождения Владимира Александровича Котельникова

76

Ю. С. Андрианов. МарГТУ на Российских смотровых площадках

81

Информация для авторов

83

CONTENTS TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

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

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

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

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

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

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

Ye. V. Petukhova, Yu. V. Sushentsova, A. Yu. Chernyshov. Direct forming of generating matrices and practical application of Adamar codes

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

ELECTRONICS

V. N. Leoukhin, A. V. Andreykin, A. A. Nagayev. Analysis of influence of technological operations on the output quality indexes of resistive assemblages

A. A. Nagayev, V. N. Leoukhin. Influence of a dielectric mask on the correction of resistance value of thick-film resistors by the method of electric-spark fitting

M. A. Peredreyeva, V. V. Egoshin. The problem of shrinking characteristics matching between metallized layer and substrate while producing metal-ceramic boards

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

A. A. Rozhentsov. To the 100th anniversary of Vladimir Aleksandrovich Kotelnikov

Yu. S. Andrianov. MSTU on Russian inspection sites

Information for the authors

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

УДК 621.371:551.510.535

М. И. Бастракова

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ДИАПАЗОНОВ ОПТИМАЛЬНЫХ РАБОЧИХ ЧАСТОТ ДЕКАМЕТРОВЫХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Представлены методики и алгоритмы автоматического определения отношения сигнал/шум для различных рабочих каналов и диапазонов оптимальных рабочих частот (ДОРЧ) декаметровых систем связи по экспериментальным данным наклонного зондирования ионосферных радиоканалов широкополосным ЛЧМ сигналом. Экспериментально определены ДОРЧ декаметровых модемов на радиолиниях протяженностью 2,6–3,5 Мм для различных сезонов года и времени суток.

Введение. Радиосвязь в декаметровом (ДКМ) диапазоне играет важную роль как средство внутренней, зонной, подвижной и производственно-диспетчерской связи общего и ведомственного пользования. Однако из-за замираний сигнала при ионосферном распространении и наличия «зон молчания» надежность коротковолновой (КВ) связи может быть недостаточно высокой, а в отдельных случаях и очень низкой. Решение задачи обеспечения установленных требований по надежности и помехоустойчивости ДКМ радиолиний связано с адаптацией работы системы связи к изменяющимся условиям распространения радиоволн. Адаптация предполагает автоматическую смену частот для перехода в диапазон с лучшим распространением и минимальными помехами; регулирование мощности передатчиков для улучшения условий электромагнитной совместимости; применение антенн с автоматической регулировкой диаграммы направленности; прием с различными видами разнесения и т.д. [1,2]. Определение ДОРЧ и надежности ДКМ радиоканала позволяет наиболее эффективно использовать его на основе данных, полученных в результате наблюдений за состоянием ионосферы посредством наклонного зондирования линейно-частотно модулированными (ЛЧМ) сигналами, прогнозировать дальнейшие изменения радиоканала [3–6].

Цель работы. Разработать методику и алгоритм определения диапазонов оптимальных рабочих частот декаметровых систем связи по результатам панорамного зондирования радиолиний непрерывным ЛЧМ сигналом.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать алгоритм автоматического определения отношения сигнал/шум для различных рабочих каналов радиолинии.
2. Разработать методику определения ДОРЧ по данным наклонного зондирования ионосферы широкополосным ЛЧМ сигналом.

3. Определить ДОРЧ для декаметровых модемов на радиоприемах протяженностью 2,6–3,5 Мм для случаев некогерентного приема частотной телеграфии (ЧТ) с узкополосным трактом и некогерентного приема ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей, а также для систем связи, использующих сигналы с PSK модуляцией.

1. Техника и условия проведения эксперимента

Как показал многолетний опыт эксплуатации российской исследовательской сети ЛЧМ ионозондов, она является эффективным инструментом мониторинга ионосферы.

Приемо-передающая станция ЛЧМ ионозонда, разработанная в МарГТУ, предназначена для приема и передачи ЛЧМ сигналов в режиме диагностики ионосферы и ДКМ радиоканалов, а также для приема и передачи служебной информации. В ее состав входят (рис.1): трансивер IC-78; «ChirpModem», ПЭВМ, типа Notebook; блок питания (БП); антенна. Технические характеристики приемо-передающей станции ЛЧМ ионозонда приведены в табл. 1.



Рис. 1. Приемо-передающая станция ЛЧМ ионозонда

Таблица 1

Технические характеристики приемо-передающей станции ЛЧМ ионозонда

| Наименование параметра | Значение |
|--|-----------------------------|
| Диапазон рабочих частот, МГц | 1,6–30 |
| Чувствительность, мкВ | 0,5 |
| Нелинейность перестройки частоты | Не более 10 ⁻⁴ % |
| Скорость изменения частоты, кГц/с | 10–1000 |
| Диапазон наблюдаемых задержек, мс | 0,5–50 |
| Динамический диапазон, дБ | не менее 70 |
| Полоса пропускания по ПЧ, Гц | 500 |
| Сопrotивление антенного тракта, Ом | 50 |
| Излучаемая мощность, Вт | 2–100 |
| Уровень паразитных излучений, дБ | не более –46 |
| Напряжение питания | 13,8 В пост. тока |
| Габариты, мм ³ (без ПЭВМ и антенны) | 240x310x239 |
| | 240x160x239 (без БП) |
| Масса, кг | 25 |
| | 15,8 (без БП) |

ПЭВМ, на которой реализовано автоматизированное рабочее место (АРМ) оператора, предназначена для обработки поступающих данных с IC-78 или IC-R75, а также для контроля работоспособности, хранения и индикации обработанных данных.

На рис. 2 в качестве примера приведена ионограмма радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола.

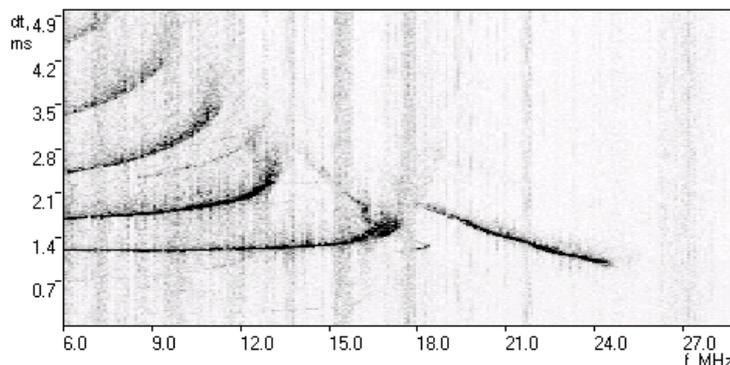


Рис. 2. Пример ионограммы НЗИ для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола

Объектами ионограммы являются как полезный сигнал, так и комплекс помех. При работе в ДКМ диапазоне мешающее действие оказывают как активные, так и пассивные помехи. Пассивные помехи появляются из-за многолучевости, доплеровского смещения частоты, частотной дисперсии, сигналов кругосветного эха и рассеянных сигналов, отраженных от земной поверхности [7].

Для проведения экспериментальных исследований использовалась сеть ЛЧМ ионозондов. Физической моделью связного сигнала является ЛЧМ сигнал наклонного ионозонда. Результатом цифрового спектрального анализа разностного сигнала является ионограмма, получаемая с помощью ионозонда. Для экспериментальных исследований были использованы данные наклонного зондирования ионосферы сетью ЛЧМ ионозондов на радиотрассах: Иркутск–Йошкар-Ола и Кипр–Йошкар-Ола. Приемный пункт находился в г. Йошкар-Оле. Данные о сети ионозондов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исследуемые радиотрассы

| Пункты передачи – приема | Характеристики радиолинии | | |
|--------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| | Длина трассы, км | Основная мода распространения | Широта вершины скачка |
| Иркутск – Йошкар-Ола | 3 561 | 1F2 | 57°–56°с.ш. |
| Кипр – Йошкар-Ола | 2 623 | 1F2 | 43°–47°с.ш. |

Выборка из 2230 ионограмм охватывала все сезоны года. Наблюдения проводились круглосуточно с периодом 15 минут. Время экспериментов: март, июнь, октябрь, декабрь 2003–2004 гг. Расчеты надежности и определение диапазона оптимальных рабочих частот проведены для случаев узкополосного некогерентного приема со случайно меняющейся фазой и широкополосного приема с парциальным сложением мощностей лучей в условиях релейских замираний, а также при применении кодов с исправлением ошибок.

2. Автоматическая оценка полосы пропускания декаметровая радиолонии и алгоритм определения ДОРЧ по данным наклонного зондирования ионосферных радиоканалов

Полоса пропускания декаметровая радиолонии связи (диапазон прохождения сигнала) определяется наименьшей наблюдаемой и максимальной наблюдаемой частотами (ННЧ и МНЧ). Она является важным параметром радиолонии, характеризующим ее возможности для создания радиоканалов. Наиболее важным из этих двух параметров является МНЧ, поскольку поглощение волны быстро уменьшается с ростом частоты. При этом уменьшается и уровень помех приему сигналов. Все это приводит к росту отношения сигнал/шум, определяющему помехоустойчивость радиотехнической системы. При определении оптимальных рабочих частот для систем связи можно рассматривать только частоты из диапазона полосы пропускания.

Алгоритм определения ННЧ и МНЧ в автоматическом режиме может проводиться информационно-аналитической системой ЛЧМ ионозонда [1,2] разработки МарГТУ. При этом используется следующий алгоритм.

Каждый вектор-столбец ионограммы, очищенной от помех [1,2], проверяется на наличие в нем сигнала. При этом крайний левый столбец соответствует ННЧ, а крайний правый – МНЧ. Для защиты от сбоев алгоритма оценки ННЧ и МНЧ в алгоритм вводятся два защитных условия:

- 1) граница диапазона прозрачности должна содержать не менее трех смежных вектор-столбцов ионограммы, содержащих полезный сигнал;
- 2) считается, что вектор-столбец содержит сигнал, если в нем есть не менее трех смежных ненулевых элементов.

Процедура защиты алгоритма состоит в последовательной проверке всех вектор-столбцов ионограммы на выполнение условий 1 и 2 и определение номера вектор-столбца (рабочих частот), где условие 1 выполняется в первый (ННЧ) и последний (МНЧ) раз.

При определении оптимальных рабочих частот для систем связи можно рассматривать только частоты из диапазона от ННЧ до МНЧ. В частотном диапазоне от ННЧ до МНЧ производится оценка качества каналов. Критерием качества является рассчитываемое по ионограммам значение отношение сигнал/шум (Z) в рассматриваемом радиоканале. После того, как частотные зависимости вероятностей ошибок для случаев применения в системе связи узкополосных сигналов (УПС) и широкополосных сигналов (ШПС) определены, по заданному пороговому значению $Z_{\text{доп}}$ находятся диапазоны оптимальных рабочих частот (ДОРЧ), в пределах которых Z не превышает своего порогового значения, и выбираются наилучшие каналы для связи. Для выбранных каналов рассчитываются следующие рабочие параметры: коэффициент двоичной ошибки ($\text{КДО} = -\lg(P)$), максимальная скорость передачи данных; мощность передатчика, необходимая для обеспечения заданного уровня Z [1,2]. Как было показано в [1,2], на магистральных линиях декаметровая радиосвязи в случае телеграфии или передачи данных оптимальной будет частота, для которой $\text{КДО} > 3$ или $\text{КДО} > 4$ при заданной мощности связного передатчика. Ограничение на КДО определяет полосы частот или ДОРЧ.

3. Алгоритм автоматического определения отношения сигнал/шум для различных рабочих каналов радиолинии

Отношение сигнал/шум определяет возможности работы радиотехнической системы в данном частотном радиоканале. Если радиотехническая система и ЛЧМ ионозонд используют для работы одни и те же (или идентичные) антенные системы, то решение задачи обнаружения и выделения непрерывного ЛЧМ сигнала на выходе системы сжатия его в частотной области позволяет решить задачу определения отношения сигнал/шум (Z) для радиотехнической системы [8–10].

Алгоритм определения отношения строится на гипотезе, что спектральные амплитуды шума в вектор-столбцах ионограммы распределены по закону Релея, а смеси сигнала и шума – по закону Райса. Согласно этим законам, отношение сигнал/шум равно [1]:

$$Z = 10 \lg(A^2 / 2\sigma^2). \quad (1)$$

Таким образом, по экспериментальным спектральным амплитудам вектор-столбцов ионограммы необходимо вычислить такие статистические характеристики, которые бы позволили определить величины A^2 и σ^2 . Процедура очистки ионограмм от помех позволяет в рассматриваемом вектор-столбце выделить элементы, содержащие либо только спектральные амплитуды смеси сигнала и шума, либо только спектральные амплитуды шума. Рассматривая ансамбль из первых, можно определить для него квадрат среднего, который связан с искомыми величинами следующим соотношением:

$$\langle \rho_1^2 \rangle = 2\sigma^2 + A^2. \quad (2)$$

Второй ансамбль связан с дисперсией шума формулой:

$$\langle \rho_2^2 \rangle = 2\sigma^2. \quad (3)$$

Обращаясь к формулам (2) и (3), для отношения сигнал/шум можно получить следующее выражение через средние квадраты амплитуд ансамблей:

$$Z = 10 \lg[(\langle \rho_1^2 \rangle - \langle \rho_2^2 \rangle) / \langle \rho_2^2 \rangle]. \quad (4)$$

Учитывая, что смесь сигнала с шумом занимает m элементов, а один шум ($N-m$) – элементов спектра, средние квадраты амплитуд ансамблей можно вычислить по формулам:

$$\langle \rho_1^2 \rangle = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \rho_{1k}^2, \quad \langle \rho_2^2 \rangle = \frac{1}{N-m} \sum_{k=1}^{N-m} \rho_{2k}^2. \quad (5)$$

Определяя автоматически отношение сигнал/шум для каждого вектор-столбца, можно получить частотные зависимости Z для рабочих частот из полосы прозрачности радиолинии.

На рис. 3 показана блок-схема алгоритма, реализующего данный метод и позволяющего рассчитывать частотные зависимости $Z(f)$ для всего диапазона зондирования.

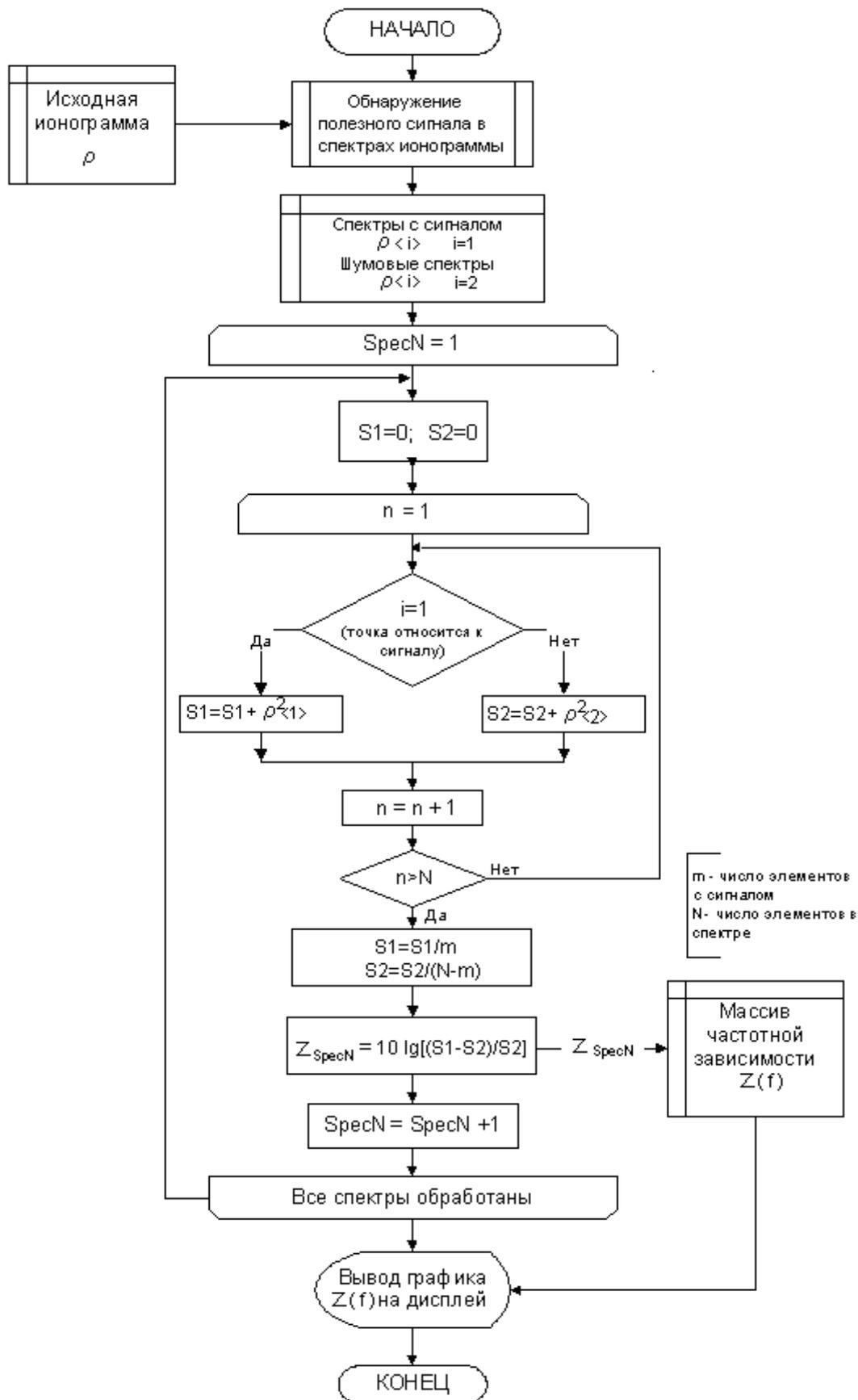


Рис. 3. Алгоритм расчета частотных зависимостей отношения сигнал/шум

На рис. 4 в качестве примера представлены ионограммы наклонного зондирования радиолинии Хабаровск – Йошкар-Ола, где слева показана неочищенная от шумов ионограмма, а справа – очищенная. В ее верхней части правой ионограммы представлена частотная зависимость отношения сигнал/шум для сигнала ионозонда. Более темным цветом на треках ионограммы отмечается сигнал большего уровня.

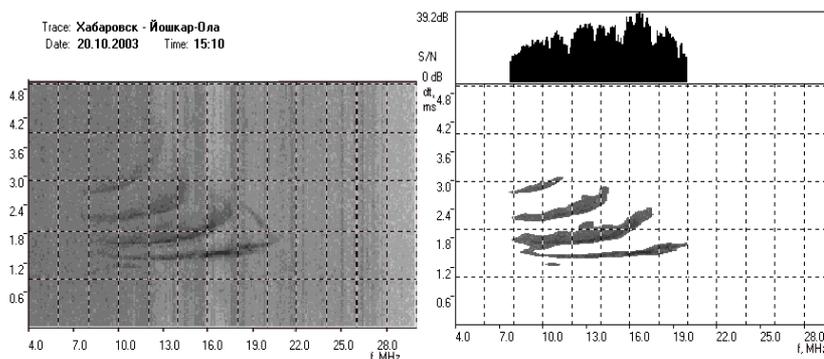


Рис. 4. Пример работы алгоритма вычисления отношения сигнал/шум

На рис. 5 в качестве примера приведен суточный ход отношения сигнал/шум для частот из полосы пропускания радиолинии Хабаровск – Йошкар-Ола.

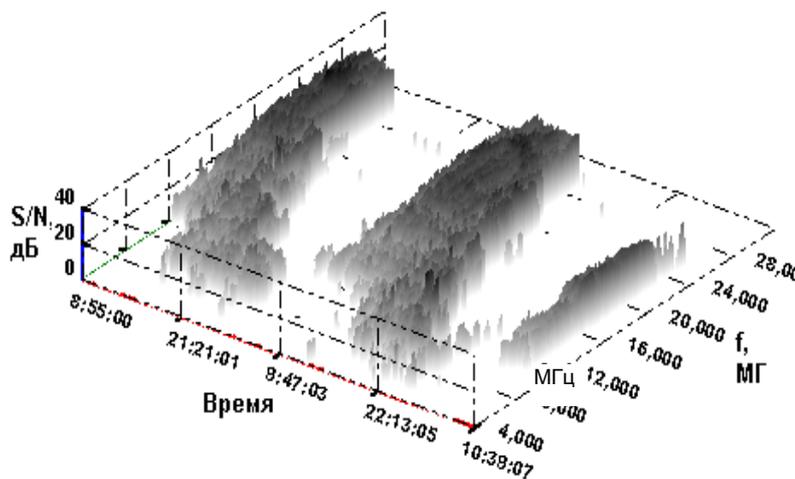


Рис. 5. Суточные вариации отношения сигнал/шум для частот из полосы пропускания радиолинии

Определенные таким образом частотные зависимости отношения сигнал/шум по разработанному алгоритму, пересчитываются на аналогичные отношения для систем декаметровой радиосвязи:

$$Z_{св} = Z - 10 \lg \frac{P_0 \cdot \Delta f_{св}}{P_{св} \cdot \delta F}, \tag{6}$$

где Z – отношение сигнал/шум для ионозонда при мощности его сигнала, равной P_0 ; δF – разрешение анализатора спектра ионозонда; $P_{св}$ – мощность связного передатчика; $\Delta f_{св}$ – полоса связного радиоканала.

4. Результаты исследования диапазонов ДОРЧ на радиоприемах различной протяженности

Для исследуемых радиоприемов были определены отношения границ диапазонов оптимальных рабочих частот к максимально наблюдаемой частоте (ДОРЧ/МНЧ) при использовании различных модемов связи, исследуемых сезонов для дневного и ночного времени суток. Экспериментальные значения границ ДОРЧ, пронормированные к МНЧ (ДОРЧ/МНЧ), для радиоприема Иркутск–Йошкар-Ола и Кипр–Йошкар-Ола представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 3

Экспериментальные значения отношений ДОРЧ/МНЧ на радиоприеме
Иркутск–Йошкар-Ола для различных случаев приема

| Вид приема | Некогерентный прием с ЧТ с узкополосным трактом | Некогерентный прием ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей | Прием сигналов с PSK |
|-------------|---|---|----------------------|
| Весна, день | 0,61–0,94 | 0,48–0,55, 0,75–0,92 | 0,38–1 |
| Весна, ночь | 0,6–0,62, 0,95–0,98 | 0,87–0,89 | 0,37–1 |
| Лето, день | 0,7–0,95 | 0,65–0,9 | 0,35–1 |
| Лето, ночь | 0,65–0,92 | 0,6–0,85 | 0,37–0,99 |
| Осень, день | 0,58–0,72 | 0,56–0,68, 0,82–0,88 | 0,36–0,988 |
| Осень, ночь | 0,34–0,39 | 0,49–0,51 | 0,31–0,98 |
| Зима, день | 0,45–0,52 | 0,64–0,88 | 0,37–1 |
| Зима, ночь | 0,48–0,62 | 0,75–0,84 | 0,34–0,99 |

Таблица 4

Экспериментальные значения отношений ДОРЧ/МНЧ на радиоприеме
Кипр–Йошкар-Ола для различных случаев приема

| Вид приема | Некогерентный прием с ЧТ с узкополосным трактом | Некогерентный прием ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей | Прием сигналов с PSK |
|-------------|---|---|----------------------|
| Весна, день | 0,72–0,87 | 0,77–0,85 | 0,58–0,99 |
| Весна, ночь | 0,77–0,96 | 0,79–0,88 | 0,57–0,999 |
| Лето, день | 0,82–0,98 | 0,85–0,94 | 0,54–1 |
| Лето, ночь | 0,78–0,95 | 0,8–0,92 | 0,51–0,999 |
| Осень, день | 0,78–1 | 0,93–0,95 | 0,55–1 |
| Осень, ночь | 0,665–1 | 0,9–0,92 | 0,685–1 |
| Зима, день | 0,64–0,92 | 0,85–0,91 | 0,57–0,988 |
| Зима, ночь | 0,59–0,9 | 0,82–0,9 | 0,53–0,99 |

Выводы.

По результатам исследования установлено, что применение в системе связи сигналов с PSK модуляцией можно расширить ДОРЧ по сравнению со случаями некогерентного приема с ЧТ с узкополосным трактом и некогерентного приема ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей.

1. Для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола для весеннего и осеннего периода дневного и ночного времени суток нижняя граница ДОРЧ увеличивается на 37%, а верхняя достигает значений МНЧ по сравнению со случаем некогерентного приема с ЧТ с узкополосным трактом и увеличивается на 28% по сравнению со случаем некогерентного приема ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей.

2. Для радиолинии Кипр – Йошкар-Ола для весеннего и осеннего периода дневного времени суток нижняя граница ДОРЧ увеличивается на 19% по сравнению с некогерентным приемом ЧТ с узкополосным трактом и на 18% – по сравнению с некогерентным приемом ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей, а верхняя граница достигает значений МНЧ.

3. Для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола для летнего сезона и дневного времени суток для сигналов с PSK модуляцией нижняя граница ДОРЧ уменьшается в 1,53 раза по сравнению с некогерентным приемом ЧТ с узкополосным трактом.

4. Для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола нижняя граница ДОРЧ при применении сигналов с PSK модуляцией уменьшается в 1,8 раза по сравнению с некогерентным приемом ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей парциальных лучей.

5. При переходе от ночного к дневному времени суток на радиолинии Иркутск–Йошкар-Ола для весеннего и осеннего периодов при применении обоих видов некогерентного приема сигналов с ЧТ происходит резкое сужение границ ДОРЧ (на 90%), в то время как при приеме сигналов с PSK модуляцией они остаются постоянными для всех случаев приема.

6. Для радиолинии Иркутск – Йошкар-Ола в летний период при переходе от ночного к дневному времени суток границы ДОРЧ остаются постоянными для всех случаев приема, а для зимнего периода происходит расширение в 2 раза границ ДОРЧ для ЧТ с узкополосным трактом и уменьшение в 2 раза – для ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей.

7. На радиолинии Кипр – Йошкар-Ола для всех исследуемых модемов и сезонов при переходе от ночного к дневному времени суток границы ДОРЧ практически не изменяются, но при применении в системе сигналов с PSK модуляцией границы ДОРЧ расширяются в 2,5 раза по сравнению с применением ЧТ с узкополосным трактом и в 5 раз – при применении ЧТ с широкополосным трактом и суммированием мощностей.

Список литературы

1. Рябова, Н. В. Диагностика и имитационное моделирование помехоустойчивых декаметровых радиоканалов: Научное издание / Н. В. Рябова. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2003. – 292 с.

2. Информационно-аналитическая система для исследования ионосферы и каналов декаметровой радиосвязи: Научное издание / А. Б. Егошин, В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2006. – 322 с.

3. Рябова, Н. В. Исследование влияния ионосферы на надежность декаметровых радиоканалов / Н. В. Рябова, М. И. Бахрамова, А. В. Мальцев // Региональная XI конференция по распространению радиоволн, 29 ноября – 1 декабря 2005 г. – СПб., 2005.

4. Рябова, Н. В. Расчет надежности коротковолновой связи с заданной достоверностью / Н. В. Рябова, М. И. Бахрамова, А. В. Мальцев // Двенадцатая международная научно-техническая конференция студентов и аспирантов, 2 – 3 марта 2006 г. Тез. докл. В 3-х т. – М.: МЭИ, 2006. Т.1. – 560 с.

5. Рябова, Н. В. Экспериментальное исследование влияния условий распространения радиоволн в среднеширотной ионосфере на надежность декаметровых систем радиосвязи / Н. В. Рябова, М. И. Бахрамова, А. В. Мальцев // Материалы 61-ой Научной сессии, посвященной Дню радио, 17–18 мая 2006 г. – М., 2006. – С.128–131.

6. Рябова, Н. В. Исследование надежности декаметровых систем связи на трассах протяженностью 2,6-5,7 Мм на основе данных панорамного зондирования ионосферных радиолоний / Н. В. Рябова, М. И. Бастракова, А. В. Мальцев // Сборник трудов XIII Международной научно-технической конференции «Радиолокация, навигация, связь», 17–19 апреля 2007 г. – Воронеж, 2007. – 456 с.

7. Комарович, В. Ф. Случайные радиопомехи и надежность КВ связи / В. Ф. Комарович, В. Н. Сосун. – М.: Связь, 1977.

8. Иванов, В. А. Основы радиотехнических систем ДКМ диапазона: Учебное пособие / В. А. Иванов, Н. В. Рябова, В. В. Шумаев; Под общей ред. проф. В. А. Иванова. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – 204 с.

9. Морелос-Сарагоса, Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение / Р. Морелос-Сарагоса. – М.: Техносфера, 2005.

10. Головин, О. В. Системы и устройства коротковолновой радиосвязи / О. В. Головин, С. П. Простов. Под ред. профессора О. В. Головина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006.

Статья поступила в редакцию 15.09.08

М. И. Bastrakova

EXPERIMENTAL STUDY OF THE RANGE OF OPTIMUM WORKING FREQUENCIES OF DECAMETER SYSTEMS

Techniques and algorithms for automatic definition of signal / noise ratio for various working channels and ranges of optimum working frequencies (ROWF) of decameter systems of communication against experimental data of inclined sounding of ionosphere radio channels with broadband LFM signal are submitted. ROWF of decameter modems at radio lines extending for 2,6-3,5Мм are experimentally determined for various seasons and daytime.

БАСТРАКОВА Марина Ивановна – доцент кафедры радиотехники и связи МарГТУ. Область научных интересов – исследование, моделирование надежности и помехоустойчивости информационно-коммуникационных систем. Автор 12 научных публикаций.

УДК 621.391.266

Е. А. Григорьевых

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ ФИЗИЧЕСКИХ НОСИТЕЛЕЙ КОМПЛЕКСНОЗНАЧНЫХ КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ С РАВНОМЕРНЫМ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ СПЕКТРОМ

Рассмотрены свойства физических носителей комплекснозначных кодовых последовательностей в виде их амплитудно-фазового и полигармонического представления. Проведена оценка помехоустойчивости полученных физических носителей комплекснозначных кодовых последовательностей в виде их амплитудно-фазового и полигармонического представления.

Введение. При проектировании систем многоканальной передачи данных одной из важнейших задач является обеспечение исключения взаимного влияния между каналами, что может быть получено в том случае, когда сигнал на выходе разделяющего устройства приемника имеет достаточно узкий отклик или, в идеале, только один отсчет. Все остальные отсчеты должны быть нулевыми. Теоретически это достижимо при условии, когда энергетический спектр канальных сигналов является строго равномерным [1,2].

В работе [3] было показано, что сигнал с равномерным энергетическим спектром в общем случае является комплекснозначным и предложен подход к его синтезу, основанный на использовании композиционных комплекснозначных сигналов, то есть сигналов, полученных конкатенацией других сигналов. Основой обработки комплекснозначных сигналов является контурный анализ [3], содержащий традиционные для теории сигналов разделы. При этом не только сами сигналы, но и их спектры, и корреляционные функции, а также импульсные и частотные характеристики фильтров для их обработки представлены в виде контуров (векторных диаграмм). Комплекснозначные сигналы, по сравнению с вещественными, обладают важным свойством – это простота получения сигналов с заданными спектрально-корреляционными свойствами [3].

При этом комплекснозначные кодовые последовательности с равномерным энергетическим спектром (РЭС) являются лишь математической моделью реального сигнала и не могут непосредственно использоваться в системах передачи и извлечения информации, использующих радиоканал. Реальным физическим носителем сигнала в пространстве может быть гармоническое колебание, какие-либо параметры которого изменяются по закону формирования элементов комплекснозначной кодовой последовательности с РЭС. Способ кодирования обуславливает алгоритм формирования и обработки сигнала и выделения из него элементов кодирующей последовательности, аппаратную реализацию системы, и, в конечном счете, ее эффективность. От правильного выбора физического носителя зависит то, насколько полно будут реализованы полезные свойства сигнала в виде комплекснозначных композиционных последовательностей с равномерным энергетическим спектром.

Цель – рассмотреть свойства физических носителей комплекснозначных кодовых последовательностей в виде их амплитудно-фазового и полигармонического представления.

1. Краткие сведения из контурного анализа [3]

Контур $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0,s-1}$ представляет собой совокупность элементарных векторов (ЭВ) $\gamma(n), n = 0, 1, \dots, s-1$:

$$\gamma(n) = \gamma_1(n) + i\gamma_2(n) = |\gamma(n)| \exp(i\varphi(n)),$$

где $\gamma_1(n) = \operatorname{Re} \gamma(n)$; $\gamma_2(n) = \operatorname{Im} \gamma(n)$; $|\gamma_2(n)|$ и $\varphi(n)$ – модуль и аргумент ЭВ. Контур Γ , заданный совокупностью ЭВ, рассматривается как вектор-контур (ВК) в s -мерном пространстве C^s .

Скалярное произведение ВК в пространстве C^s имеет вид

$$\begin{aligned} (\Gamma, \mathbf{N})_{C^s} &= \sum_{n=0}^{s-1} [\gamma_1(n)v_1(n) + \gamma_2(n)v_2(n)] + \\ &+ i \sum_{n=0}^{s-1} [\gamma_2(n)v_1(n) + \gamma_1(n)v_2(n)]. \end{aligned}$$

В отличие от скалярного произведения $(\Gamma, \mathbf{N})_{E^{2s}}$ в действительном пространстве E^{2s}

$$(\Gamma, \mathbf{N})_{E^{2s}} = \sum_{n=0}^{s-1} [\gamma_1(n)v_1(n) + \gamma_2(n)v_2(n)],$$

скалярное произведение в C^s содержит в качестве своей действительной части скалярное произведение в E^{2s} . Вследствие этого скалярное произведение в унитарном пространстве за счет своей мнимой части более информативно, чем скалярное произведение в пространстве E^{2s} .

Скалярное произведение в действительном координатном пространстве E^{2s} позволяет ввести не только норму для вектора этого пространства, но и обобщить понятие угла между векторами:

$$\cos \varphi = \frac{(\Gamma, \mathbf{N})_{E^{2s}}}{\|\Gamma\| \|\mathbf{N}\|}.$$

Эту величину называют нормированным скалярным произведением (НСП). В пространстве C^s НСП в общем случае является комплексной величиной и не может быть косинусом какого-либо действительного угла. Модуль НСП в пространстве C^s

$$|\eta_H| = \frac{(\Gamma, \mathbf{N})_{C^s}}{\|\Gamma\| \|\mathbf{N}\|}$$

равен нулю, если ВК Γ и \mathbf{N} ортогональны, и принимает максимальное значение, равное единице, если Γ и \mathbf{N} – это один и тот же контур, причем контур \mathbf{N} может быть повернут относительно контура Γ на произвольный угол $\Delta\varphi$ и изменен в масштабе в $|\mu|$ раз. НСП в пространстве E^{2s} проявляет близкие свойства, однако из-за действительного характера множителя μ вектор-контур Γ и \mathbf{N} имеют значение НСП, не

достигающее единицы. Таким образом, НСП в C^s позволяет обнаружить высокую степень близости для значительно больших значений ВК, чем в E^{2s} .

Кроме того, максимальное значение модуля НСП в C^s инвариантно к преобразованию поворота и изменению масштаба ВК, т.е.

$$|\eta_n| = f(\Delta\varphi) = f(\mu) = f(\Delta\varphi, \mu) = const.$$

При этом НСП в E^{2s} свойством инвариантности к повороту не обладает.

Среди большого разнообразия контуров существуют виды контуров, пространственные или спектральные описания которых обладают особыми свойствами. К таким контурам относятся, например, элементарные и композиционные контуры. Семейство контуров $\Gamma_m, m = 0, 1, \dots, s-1$, названных элементарными (ЭК), образуют ортогональный базис, по которому раскладывается произвольный контур Γ :

$$\Gamma_m = \{\gamma_m(n)\}_{0, s-1} = \left\{ \exp\left\{i \frac{2\pi}{s} mn\right\} \right\}_{0, s-1}, \quad m = 0, 1, \dots, s-1,$$

и представляет собой правильный ориентированный s -угольник с одинаковыми по модулю ЭВ, равными $|\gamma|$ и одинаковыми по величине углами между соседними ЭВ, равными $\frac{2\pi}{s} m$.

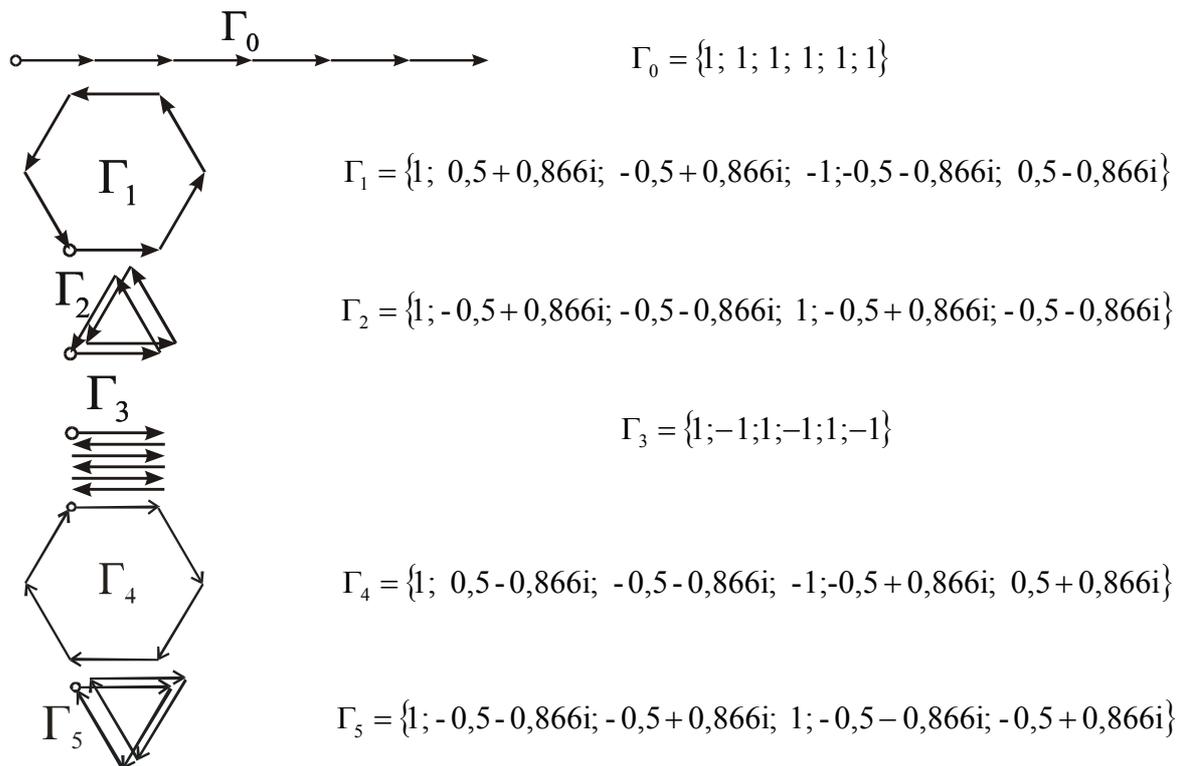
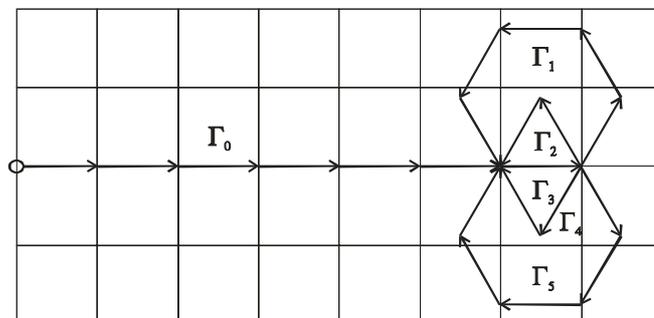


Рис. 1. Векторные и числовые представления элементарных контуров размерностью $s=6$

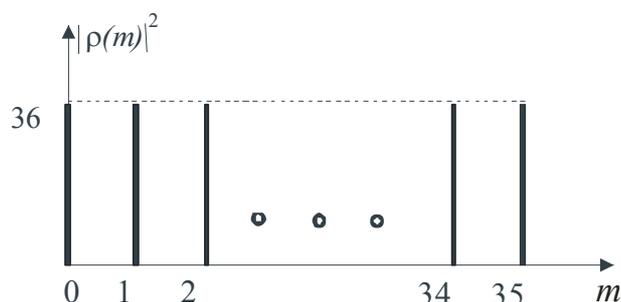
На рис. 1 представлены примеры векторных и числовых представлений элементарных контуров размерностью $s=6$.

Композиционный контур, образованный конкатенацией ЭК, обладает равномерным энергетическим спектром $|\rho(m)|^2$ и дельтовидной циклической автокорреляционной функцией $\eta(n)$ (рис. 2).

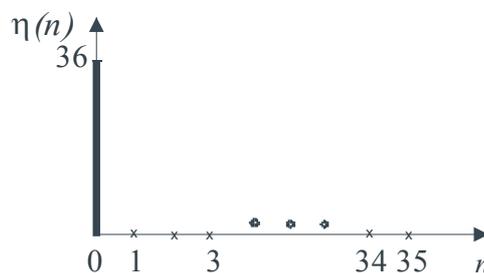


$$\Gamma = \left\{ \begin{array}{l} 1; 1; 1; 1; 1; 1; 1; 0,5 + 0,866i; -0,5 + 0,866i; \\ -1; -0,5 - 0,866i; 0,5 - 0,866i; 1; -0,5 + 0,866i; \\ -0,5 - 0,866i; 1; -0,5 + 0,866i; -0,5 - 0,866i; \\ 1; -1; 1; -1; 1; -1; -0,5 - 0,866i; -0,5 + 0,866i; \\ 1; -0,5 - 0,866i; -0,5 + 0,866i; 1; 0,5 - 0,866i; \\ -0,5 - 0,866i; -1; -0,5 + 0,866i; 0,5 + 0,866i \end{array} \right\}$$

a



б



в

Рис. 2. Композиционный контур для $s = 6$ (а), энергетический спектр (б) и циклическая АКФ (в)

2. Формирование физических носителей комплекснозначных сигналов

Рассмотрим два способа формирования физических носителей комплекснозначных сигналов. Контур $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0,s-1}$ можно интерпретировать в виде дискретно кодированного гармонического сигнала из s -кодовых интервалов, либо с помощью полигармонического представления [4,5].

С точки зрения энергетической эффективности, наиболее предпочтительными являются частотнокодированные и фазокодированные сигналы. Одним из возможных носителей является описанный еще в 60-е годы Р.Фрэнком фазокодированный сигнал. Однако из-за общей непроработанности теории (исследовались лишь ациклические свойства сигнала) отдельные полезные свойства сигнала были описаны лишь для частных значений размерности кодирующей последовательности.

Широкое использование фазокодированных сигналов в системах связи стало возможным только после изобретения и внедрения относительной фазовой манипуляции (ОФМ). Ее также называют фазоразностной модуляцией. В этой связи большой интерес представляет рассмотрение свойств сигналов с ОФМ на базе кодирующих последовательностей с РЭС [5].

При формировании физического носителя заданного контура с помощью амплитудно-фазокодированного метода каждый его элементарный вектор $\gamma(n)$, $n = 0, 1, \dots, s - 1$ ассоциирован с n -м кодовым интервалом сигнала. В его пределах сигнал представляет собой отрезок синусоиды, амплитуда которой определяется модулем $|\gamma(n)|$, а начальная фаза – аргументом $\varphi(m)$ ЭВ:

$$s_{\text{АФМ}}(t) = \begin{cases} |\gamma(0)| \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau_{\text{ки}}} + \arg(\gamma(0))\right) \text{ при } 0 \leq t < \tau_{\text{ки}}, \\ |\gamma(1)| \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau_{\text{ки}}} + \arg(\gamma(1))\right) \text{ при } \tau_{\text{ки}} \leq t < 2\tau_{\text{ки}}, \\ \dots \\ |\gamma(s-1)| \sin\left(\frac{2\pi t}{\tau_{\text{ки}}} + \arg(\gamma(s-1))\right) \text{ при } (s-1)\tau_{\text{ки}} \leq t < s\tau_{\text{ки}}, \end{cases}$$

где $\tau_{\text{ки}}$ – длительность кодового интервала.

На рис. 3 показан пример дискретно-кодированного сигнала, ассоциированного с комплекснозначной последовательностью $\Gamma = \{4; -3i; -2 - 2i; -2 + 2i; 3i\}$. Длительность кодового интервала составляет 4 мкс.

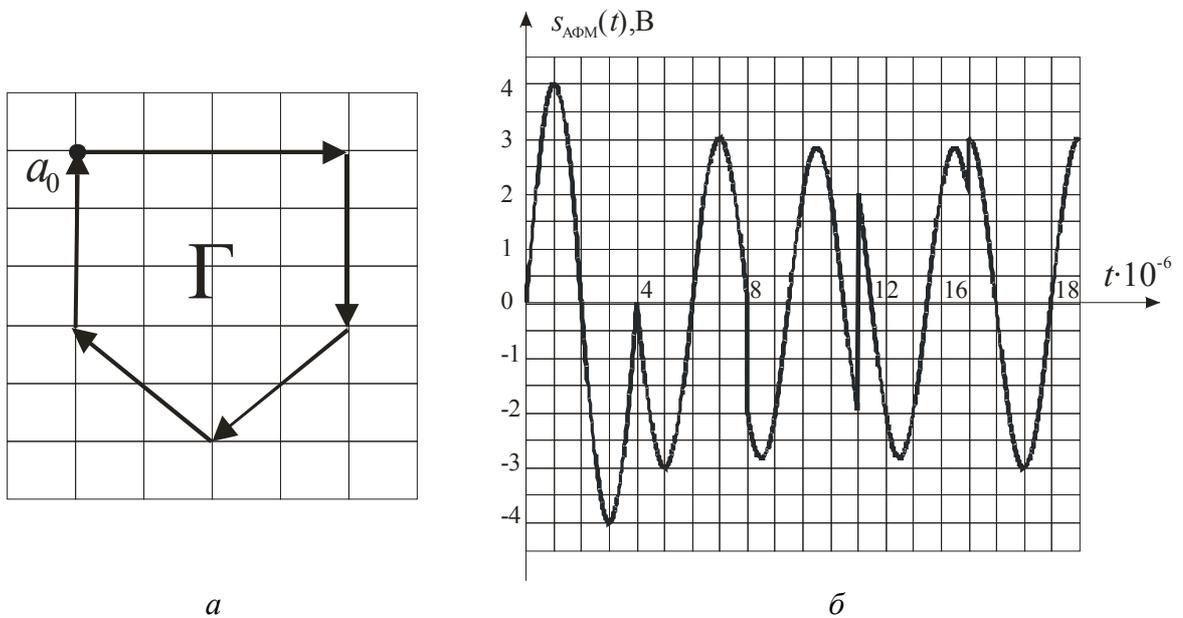


Рис. 3. Комплекснозначная последовательность $\Gamma = \{4; -3i; -2 - 2i; -2 + 2i; 3i\}$ (а) и образованный сложный сигнал $s_{\text{АФМ}}(t)$ (б)

При полигармоническом представлении для формирования физического носителя комплекснозначной последовательности контур $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0,s-1}$ представим как спектр C_m некоторого периодического сигнала $s_{\Gamma}(t)$, ограниченного на частоте $(s-1)\omega_1$. При этом совокупность модулей ЭВ контура Γ образует амплитудный спектр $A_n = |\gamma(n)|$, а аргументов – фазовый спектр $\varphi_n = \arg \gamma(n)$. На основании представления сигнала $s(t)$ в виде ряда Фурье получим

$$s_{\Gamma}(t) = \sum_{n=0}^{k-1} A_n \cos(n\omega_1 t - \varphi_n) = \sum_{n=0}^{k-1} |\gamma(n)| \cos\left(n \frac{2\pi}{T} t - \varphi(n)\right).$$

На рис. 4 представлены, в качестве примера, векторное представление комплекснозначной последовательности $\Gamma = \{4; -3i; -2 - 2i; -2 + 2i; 3i\}$, модули и аргументы ЭВ и ассоциированный с ним действительный периодический сигнал $s_{\Gamma}(t)$.

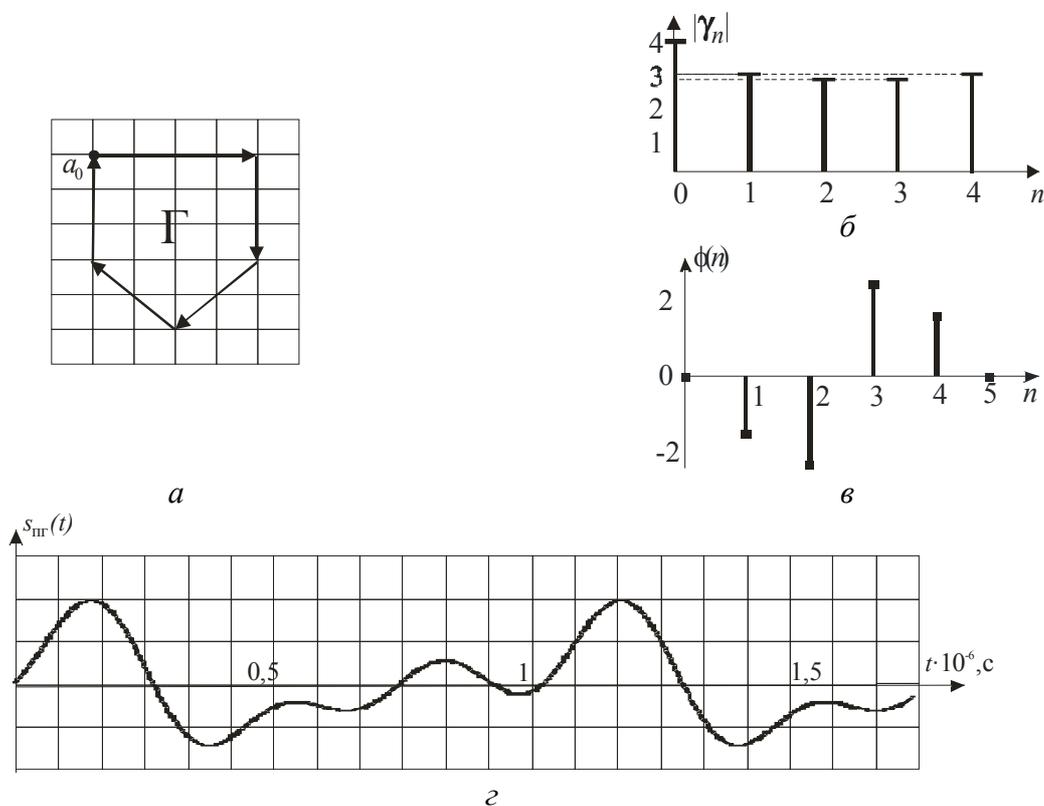


Рис. 4. Полигармоническое представление комплекснозначной последовательности: а – комплекснозначная последовательность Γ , б, в – модули и аргументы его ЭВ, г – действительный периодический сигнал $s_{\Gamma}(t)$

Использование полигармонического представления комплекснозначной последовательности выгодно тем, что имеется возможность получения физического носителя с заданными спектрально-корреляционными свойствами. Так сигнал, образованный на базе композиционной комплекснозначной последовательности, будет также обладать равномерным энергетическим спектром (рис.5).

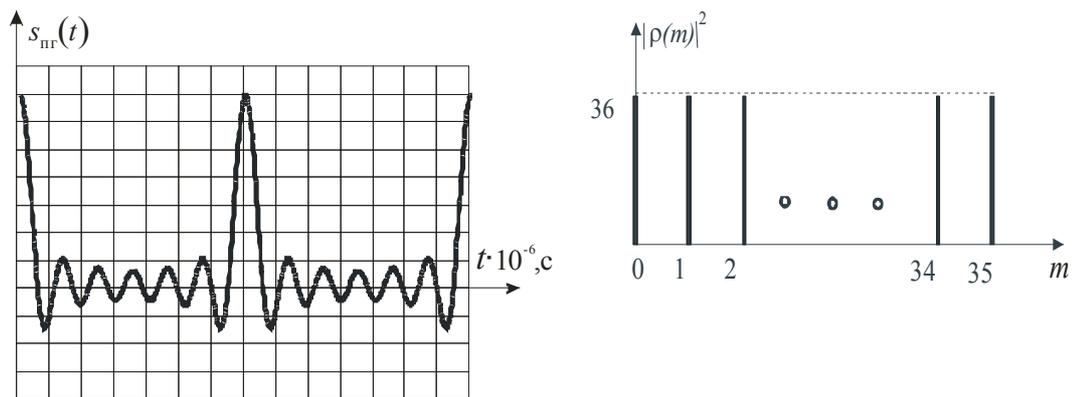


Рис. 5. Полигармоническое представление комплекснозначной последовательности $\Gamma = \{4; -3i; -2 - 2i; -2 + 2i; 3i\}$ при $s=6$ (а) и его энергетический спектр

3. Оценка помехоустойчивости физических носителей

Для оценки помехоустойчивости физических носителей комплекснозначных сигналов к воздействию флуктуационного шума экспериментально исследовалась зависимость отношения сигнал/шум в восстановленной комплекснозначной последовательности от отношения сигнал/шум в носителе.

Методика экспериментального исследования.

1. По заданной комплекснозначной последовательности $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0,s-1}$ формируются физические носители в виде амплитудно-фазомодулированных сигналов $s_{AFM}(t)$ и полигармонического $s_{nr}(t)$ представлений.

2. На физические носители аддитивно накладывается шум $n(t)$ с нулевым математическим ожиданием, средноквадратическим отклонением (СКО) σ_n и распределенным по гауссовскому закону. При этом,

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\int_0^t s^2(t) dt}{q_n}}.$$

3. По зашумленным физическим носителям восстанавливается комплекснозначная последовательность $\mathbf{N} = \{v(n)\}_{0,s-1}$.

4. Вычисляется нормированное скалярное произведение эталонного Γ и зашумленного \mathbf{N} контуров:

$$|\eta_n| = \frac{(\Gamma, \mathbf{N})_{C^s}}{\|\Gamma\| \|\mathbf{N}\|}.$$

На рис. 6 представлены зависимости скалярного произведения $|\eta_n|$ эталонного Γ и зашумленного \mathbf{N} контуров от отношения сигнал/шум q_n в носителе. При этом комплекснозначная последовательность Γ представляла собой композиционный контур с размерностями $s=6,8,10$.

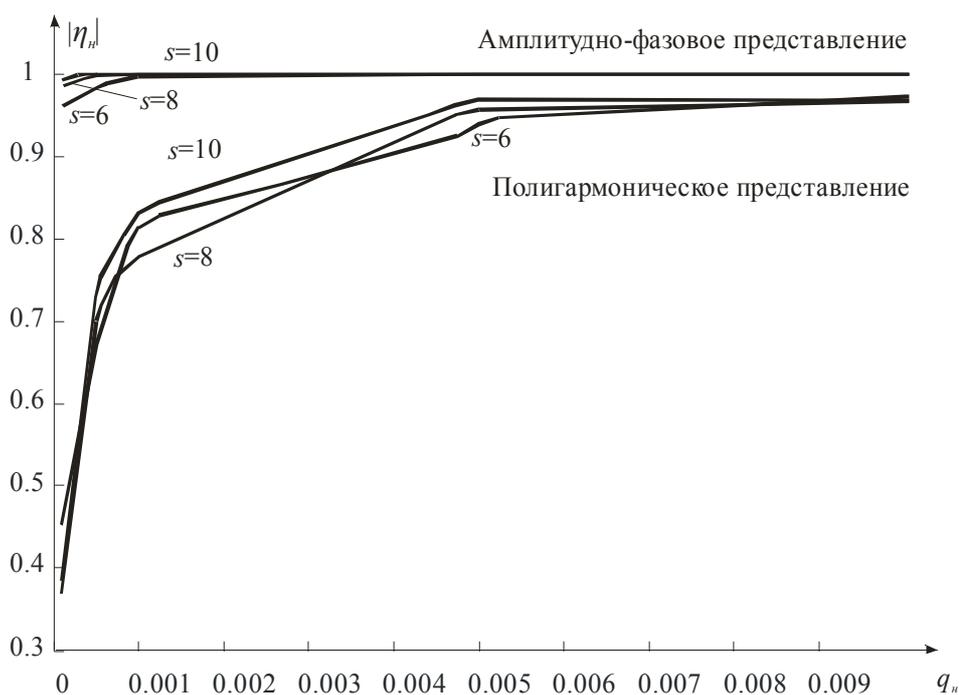


Рис. 6. Зависимость скалярного произведения эталонного Γ и зашумленного N контуров от отношения сигнал/шум q_n в носителе

По полученным графикам видно, что наиболее устойчиво к воздействию нормально распределенного шума является амплитудно-фазоманипулированное представление сигнала, чем полигармоническое представление. Также с увеличением размерности s увеличивается и мера схожести эталонного и зашумленного сигналов при различных представлениях.

Заключение. Комплекснозначные кодовые последовательности с равномерным энергетическим спектром (РЭС) являются лишь математической моделью реального сигнала и не могут непосредственно использоваться в системах передачи и извлечения информации, использующих радиоканал. Реальным физическим носителем сигнала в пространстве может быть гармоническое колебание, какие-либо параметры которого изменяются по закону формирования элементов комплекснозначной кодовой последовательности с РЭС. Способ кодирования обуславливает алгоритм формирования и обработки сигнала и выделения из него элементов кодирующей последовательности, аппаратную реализацию системы, и, в конечном счете, ее эффективность. В данной работе рассмотрены свойства физических носителей комплекснозначных кодовых последовательностей в виде их амплитудно-фазового и полигармонического представления. Было получено, что наибольшей устойчивостью к флуктуационному шуму обладает амплитудно-фазовое представление кодовых последовательностей с равномерным энергетическим спектром.

Список литературы

1. Варакин, Л. Е. Системы связи с шумоподобными сигналами / Л. Е. Варакин. – М.: Радио и связь, 1985.
2. Теория электрической связи: Учебник для вузов / А. Г. Зюко и др.; Под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 1998.

3. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Физматлит, 2002.

4. Хафизов, Р. Г. Исследование физических носителей комплекснозначных сигналов / Р. Г. Хафизов, А. В. Смирнов, Н. А. Добрынская // Вестник Вятского научного центра Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук РФ. – 2004. – №1(5). – С. – 67–73.

5. Фурман, Я. А. Комплекснозначные сигналы и их применение в связи: учеб. пособие / Я. А. Фурман, А. А. Роженцов, Р. Г. Хафизов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2001.

Статья поступила в редакцию 28.03.08

Ye. A. Grigoryevykh

**RESEARCH INTO THE NOISE STABILITY OF PHYSICAL CARRIERS
OF COMPLEX-VALUED CODE SEQUENCES WITH UNIFORM POWER SPECTRUM**

Properties of complex-valued code sequences physical carriers as their amplitude-phase and polyharmonic representation are considered. The estimation of a noise stability of the complex-valued code sequences physical carriers received as their amplitude-phase and polyharmonic representation has been carried out.

ГРИГОРЬЕВЫХ Елена Андреевна – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – телекоммуникации, обработка радиосигналов. Автор 13 научных публикаций.

УДК 621.291.266

Ю. А. Ипатов, А. В. Кревецкий

СЕГМЕНТАЦИЯ ЦВЕТНЫХ АЭРОФОТОСНИМКОВ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА СЕЛЕКТИВНОГО ОБУЧЕНИЯ

Проанализированы статистические характеристики цветных аэрофотоснимков неоднородных ландшафтов. Разработан эффективный в вычислительном плане и по качеству решений алгоритм сегментации данного класса изображений. Адаптация к условиям наблюдения и типам ландшафтов достигается за счет предварительного селективного обучения.

Введение. Одной из основных проблем в области обработки изображений и распознавания образов является выделение объектов на сложном и статистически не однородном фоне [1]. В частности, при обработке мультиспектральных ландшафтных снимков необходимо знать относительную площадь растительного покрова и положение границ участков определенного типа, т.е. выполнить сегментацию цветных изображений. В научной литературе методы сегментации представлены достаточно широко, однако большинство являются эвристическими, не дают удовлетворительных результатов на реальных сложных неоднородных фонах и не имеют реализаций в виде законченных программных продуктов [2].

1. Постановка задачи

В данной работе синтезируется оптимальный в байесовском смысле алгоритм цветовой сегментации изображений «с учителем» и приводятся результаты работы его законченной программной реализации. На рис. 1 представлен ландшафтный снимок со спутника серии SPOT в диапазоне от 0,5 до 0,6 мкм. Характерными текстурными элементами здесь являются: растительный покров полей, неоднородный рельеф местности и развитая дорожная сеть.



Рис. 1. Изображение со SPOT спутника в видимом диапазоне спектра

2. Статистические характеристики наблюдаемых изображений

Современные спутники дистанционного зондирования, используемые сегодня для регистрации изображений растительного покрова, имеют высокую разрешающую способность по яркости и цветовому тону. Флуктуационный шум, возникающий в этом случае, можно аппроксимировать центрированным независимым нормальным шумом по каждой цветовой компоненте. При невозможности накопления нескольких кадров и крупных размерах, представляющих интерес однородных по цвету участков, оптимальным устройством оценки яркости или цвета при таком шуме является низкочастотный пространственный фильтр скользящего среднего [3]. Нарушение оптимальности характерно лишь на незначительной площади изображения в области резких перепадов яркости (цвета) между участками с разными текстурами.

На рис. 2 дана оценка яркостной составляющей фона для данного снимка в виде трехмерного графика. Из графика видно, что яркость фона обладает значительным статистическим разбросом значений, а также пространственной неоднородностью статистических характеристик. На рис. 3 приведен двухмерный график градиентной проекции яркости. Сравнение рис. 2 и рис. 3 позволяет сделать вывод о том, что яркостная составляющая не является существенным селективным признаком для объектов исследуемого изображения.

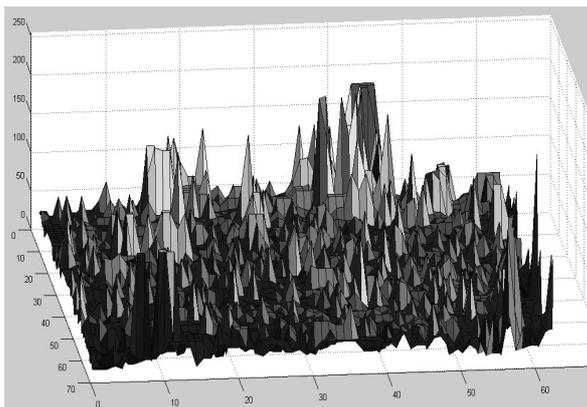


Рис. 2. Оценка яркости фона для полученного снимка

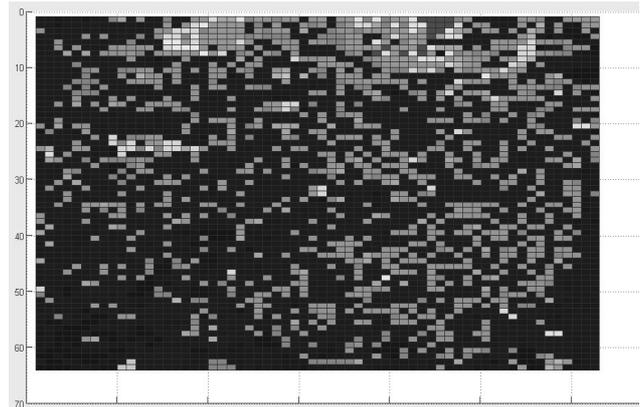


Рис. 3. Градиентная проекция трехмерной сцены в двухмерном пространстве (рис. 2)

Для вычисления относительной площади растительных насаждений по их аэрокосмическому изображению необходимо относительно каждого элемента разрешения проверить сложную гипотезу и принять обоснованное решение – отнести элемент к фрагменту заданной растительности (гипотеза H_1) или к остальным текстурам (гипотеза H_2).

При использовании в качестве дискриминационных признаков данных о цвете пикселей для построения оптимального или квазиоптимального в байесовском смысле алгоритма принятия решения важно знать законы распределения вероятностей цвета $\mathbf{I} = \{I_R, I_G, I_B\}$ полезных и мешающих пикселей в цветовом пространстве.

На рис. 4 приведены выборочные условные законы распределений цвета $W(\mathbf{I}/H_1)$ и $W(\mathbf{I}/H_2)$ для обеих гипотез в RGB пространстве. Видно, что статистически неоднородный фон и растительные насаждения выделяются в слабо перекрывающиеся пространственные кластеры. Их вытянутый вдоль диагонали цветового куба характер объясня-

ется неравномерной освещенностью полезных объектов и фона, что говорит о неинформативности яркости. В связи с этим для упрощения алгоритма сегментации предлагается использовать проекции данных распределений $W(\mathbf{I}'|H_1)$ и $W(\mathbf{I}'|H_2)$ на плоскость, перпендикулярную вектору серого (255,255,255) (см. рис.5).

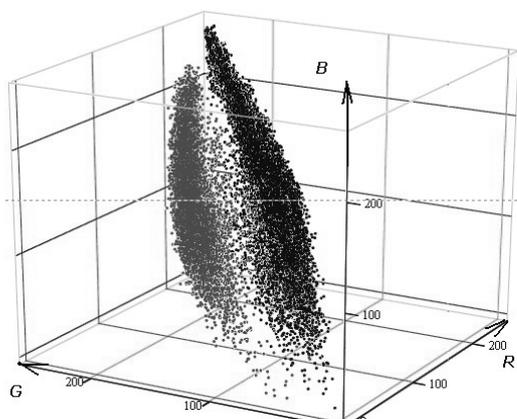


Рис. 4. Кластерная модель растительного покрова и фона в RGB пространстве

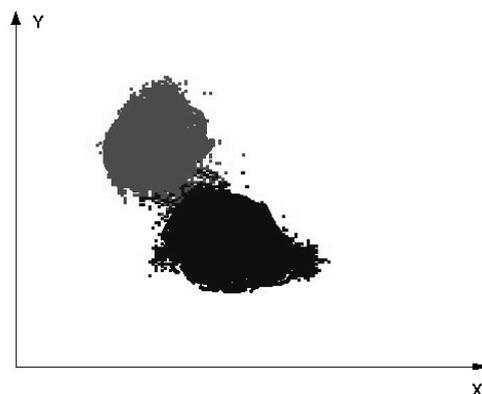


Рис. 5. Проекция на секущую плоскость

Как видно из рис. 5, данные двумерные условные распределения вероятностей имеют близкую дисперсию σ^2 .

3. Синтез оптимального алгоритма сегментации

Для возможности синтеза байесовского алгоритма сегментации аналитически аппроксимируем указанные распределения $W(\mathbf{I}'|H_1)$ и $W(\mathbf{I}'|H_2)$ нормальным законом [5]:

$$W(\mathbf{I}', i) = c \exp \left\{ -\frac{\|\mathbf{I}' - \mathbf{I}_i\|^2}{2\sigma^2} \right\} \quad (1)$$

где \mathbf{I}' – вектор двумерной проекции цвета анализируемого пиксела, i – номер проверяемой гипотезы (рис.6), \mathbf{I}_i – координаты центра соответствующего распределения цвета, $\|\cdot\|$ – норма вектора, c – нормировочный множитель.

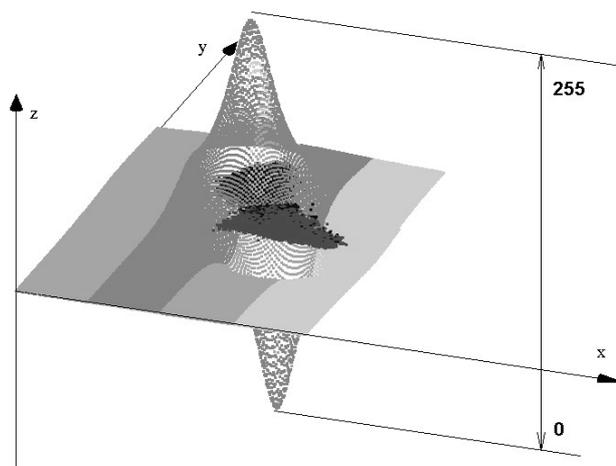


Рис. 6. Аппроксимация выборочных распределений гауссовскими функциями

Для выбранной формы аппроксимации распределений оптимальный по критерию максимального правдоподобия (или минимального расстояния в цветовом пространстве) сводится к следующим шагам:

1) определению проекции цвета \mathbf{I}' текущей точки на выбранную плоскость цветового пространства,

2) вычислению для нее величины отношения правдоподобия

$$\lambda(x, y) = \frac{W(\mathbf{I}'(x, y) / H_1)}{W(\mathbf{I}'(x, y) / H_2)}, \quad (2)$$

где (x, y) — координаты пиксела в кадре наблюдаемого изображения,

3) нормировке поля отношений правдоподобия к 255 градациям серого для возможности визуализации (рис. 7),

4) пороговой обработке нормированного изображения $\lambda(x, y)$ (рис.8),

$$U(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } \lambda(x, y) \geq \lambda_{\text{пор}} \\ 0, & \text{если } \lambda(x, y) < \lambda_{\text{пор}} \end{cases}, \quad (3)$$

где порог сегментации $\lambda_{\text{пор}}$ назначается согласно заданному критерию оптимальности.

Следует отметить, что результат сегментации содержит статистические ошибки, вызванные случайным характером шумов и фона. С целью снижения вероятности ошибок в программной реализации рассмотренных алгоритмов введена возможность ручной коррекции результатов сегментации.



Рис. 7. Изображение нормированных значений отношения правдоподобия в кадре

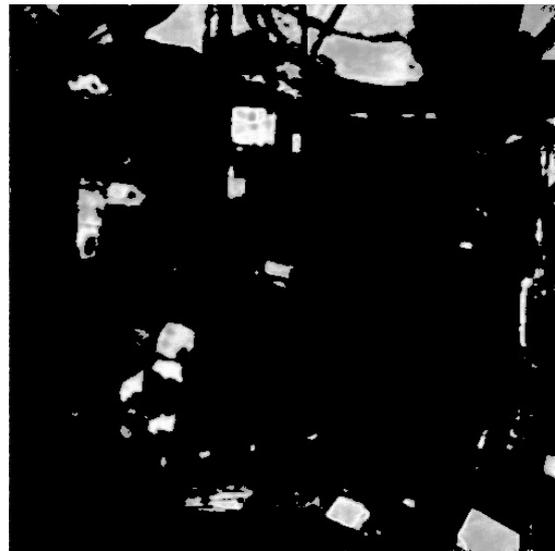


Рис. 8. Результирующее изображение после пороговой обработки

4. Характеристики работы алгоритма

Для оценки эффективности функционирования программной реализации алгоритма необходимо знать его статистические характеристики работы на исследуемом классе изображений. Проведена серия экспериментов для нахождения средних ошибок первого и второго рода [6].

Методом экспертных оценок было получено эталонное изображение \mathbf{G} , с которым сравнивались результаты автоматической сегментации \mathbf{T} . Нужно отметить, что погрешность сегментации составила 1–3%, что является допустимым значением. При

этом вероятность ошибки первого рода составила $F = 0,012$ (4), а вероятность ошибки второго рода – $M = 0,08$ (5):

$$F = \frac{S_1(\mathbf{T})}{S_2(\mathbf{G})}, \quad (4)$$

где $S_1(\mathbf{T})$ – площадь участков фона ошибочно отнесенных к интересующему типу объектов в \mathbf{T} , $S_2(\mathbf{G})$ – площадь фона эталонного изображения,

$$M = 1 - \frac{S_3(\mathbf{T}, \mathbf{G})}{S_4(\mathbf{G})}, \quad (5)$$

где $S_3(\mathbf{T}, \mathbf{G})$ – площадь правильно сегментированных полезных объектов \mathbf{T} в \mathbf{G} , $S_4(\mathbf{G})$ – площадь полезных объектов в эталонном изображении.

Заключение. Предложенный алгоритм и его программная реализация позволяют автоматизировать процесс сегментации ландшафтных сцен и могут служить готовым инструментом при решении исследовательских и инженерных задач.

Реализуемый в программе алгоритм является оптимальным по критерию максимального правдоподобия. Он обеспечивает для критерия максимального правдоподобия при отсутствии облачности на аэрофотоснимках среднюю вероятность 0,92 правильных решений для рассмотренных классов объектов и при этом обладает высокой вычислительной эффективностью (порядка 145 млн. операций типа сложение/умножение для цветного изображения 1024 x 768, что на современном процессоре Intel Core составляет менее 1 секунды). Для исключения выбросов, связанных с неоднородностью фона, на котором производится выделение искомым объектов, в программе предусматривается ручная коррекция результатов автоматического анализа, а для инвариантности к классу сегментируемых объектов и условиям наблюдения введена процедура интерактивного обучения.

Список литературы

1. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт. Кн.1,2. – М.: Мир, 1982.
2. John, A. R. Remote Sensing Digital Image Analysis / A. R. John, J. Xiuping. – Heidelberg: Springer, 2006. – 455 p.
3. Кревецкий, А. В. Обработка изображений в системах ориентации летательных аппаратов / А. В. Кревецкий. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 1998. – 149 с.
4. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
5. Ту, Дж. Принципы распознавания образов / Дж. Ту, Р. Гонсалес. – М.: Мир, 1978. – 401 с.
6. Корн, Г. Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1984. – 832с.

Статья поступила в редакцию 04.09.2008.

Yu. A. Ipatov, A. V. Krevetsky

SEGMENTATION OF COLOR AERIAL PHOTOGRAPHS ON THE BASIS OF SELECTIVE TRAINING ALGORITHM

Statistical characteristics of color aerial photographs of non-uniform landscapes are analyzed. An efficient from the point view of calculation and decision quality segmentation algorithm for the given class of images is developed. Adaptation to monitoring conditions and types of landscapes is achieved at the expense of preliminary selective training.

ИПАТОВ Юрий Аркадьевич – аспирант кафедры информатики МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка и анализ изображений, распознавание образов и классификация на основе нейронных сетей. Автор 25 публикаций.

КРЕВЕЦКИЙ Александр Владимирович – кандидат технических наук, профессор кафедры информатики МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка и синтез сигналов, анализ изображений и распознавание образов. Автор 155 публикаций.

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 621.391.266

Р. Г. Хафизов, Ю. Е. Третьякова

ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ И МНОГОЦЕЛЕВОГО АНАЛИЗА ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ПРЕДСТАТЕЛЬНОЙ ЖЕЛЕЗЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ И ПРОВЕДЕНИЯ ТРАНСУРЕТРАЛЬНОЙ ОПЕРАЦИИ

Рассмотрена возможность построения многоцелевой информационной технологии на базе кватернионных сигналов, предназначенной для выполнения трансуретральной резекции предстательной железы. Показана возможность восстановления трехмерного контура капсулы предстательной железы методом «сэндвича».

Введение. Современная медицинская практика все более нуждается в применении технических средств диагностики, лечения и принятия решения [1]. Применение информационных технологий, способных учитывать все трудности, возникающие при проведении хирургического вмешательства, позволит улучшить качество проводимых операций. В урологии, например, распространена гиперплазия предстательной железы, т.е. увеличение ее массы и объема с наступлением определенного возраста или при возникновении раковых опухолей [2]. При этом возникает затрудненное мочеиспускание, связанное с сужением мочеиспускательного канала.

В хирургической урологии имеется ряд методик, позволяющих восстановить нормальное мочеиспускание, одной из которых является трансуретральная резекция простаты при доброкачественной гиперплазии предстательной железы. Сущность метода заключается в удалении некоторого объема простаты с целью восстановления мочеиспускательной функции. Операция выполняется при помощи резектоскопа. Ряд сложностей, возникающих при проведении данной операции, например, плохая видимость вследствие обильного кровотечения при работе резектоскопом и отсутствие видимости капсулы предстательной железы, при повреждении которой могут возникнуть серьезные осложнения, связанные с большим риском для жизни пациента, обосновывают актуальность создания новых информационных технологий, предназначенных как для проведения тренировочных операций, так и для помощи хирургам при самой операции.

При выполнении операции трансуретральной резекции простаты хирург управляет движениями резектоскопа в пределах изображения операционного поля, наблюдаемого на экране монитора. Изображение формируется камерой, оптически связанной с резектоскопом. Вследствие движения резектоскопа наблюдаемая на мониторе сцена носит

динамический характер. При этом процесс операции нуждается в объективном контроле положения режущей кромки резектоскопа относительно стенок капсулы простаты.

Мировой уровень информационных технологий в настоящее время представлен виртуальными тренажерами (симуляторами). Такие системы моделируют реальную операцию и имитируют реакцию тканей на действие хирурга. Востребованность симуляторов объясняется тем, что получение хирургом практических навыков всегда трудно достижимо, а главное, сопряжено с риском для пациента.

Простейшие муляжи и тренажеры не способны представить реальную картину операционного поля и оценить качество и точность движений начинающего врача. В то же время при выполнении реальной операции врач должен обладать приобретенными базовыми моторными навыками.

Примером виртуального симулятора по урологии является URO-MENTOR (США – Израиль), производитель Симбионикс [3]. Данная система позволяет будущим хирургам овладеть практическими навыками проведения широкого класса урологических операций и приобрести опыт работы с современным хирургическим инструментарием. Также существуют системы, позволяющие получить практические навыки для более широкого класса операций. Подобной системой является виртуальный симулятор для лапароскопии Lap Mentor (США – Израиль). По состоянию на июль 2007 года единственным тренажером с русскоязычным интерфейсом является SEP SimSurgery (Норвегия). Особенность данного тренажера заключается в возможности отработки навыков трехмерной эндохирургии и роботохирургии (робот Da Vinci).

Представленная в данной работе технология является узкоспециализированной, направленной на выполнение практически одной, но чрезвычайно важной и востребованной операции. Одной из основных **целей** представленной в данной работе информационной технологии является индикация на мониторе капсулы железы, изображение которой сформировано в предоперационный период по результатам томографического исследования пациента или во время операции по данным ультразвукового сканирования.

1. Структура информационной технологии

Структура информационной технологии визуализации и многоцелевого анализа пространственных динамических изображений предстательной железы для подготовки и проведения трансуретральной операции представлена на рис. 1.

Подготовка к операции

На данном этапе выполняется обследование пациента, описание истории болезни, предусматривающее анализ структуры предстательной железы при помощи интроскопических методов исследования, например, компьютерной томографии. Далее осуществляется построение трехмерной модели капсулы предстательной железы на основе данных компьютерного томографа (рис. 2) или посредством анализа размеров и формы простаты на УЗ-изображениях. В формирователе 3D-модели осуществляется анализ границ исследуемого органа методами контурного анализа в каждом отдельном срезе. С учетом расстояния между срезами производится расчет координат каждой точки, принадлежащей капсуле предстательной железы, в трехмерном пространстве. Также производится расчет критических точек, которые впоследствии сигнализируют о достижении хирургом капсулы железы.

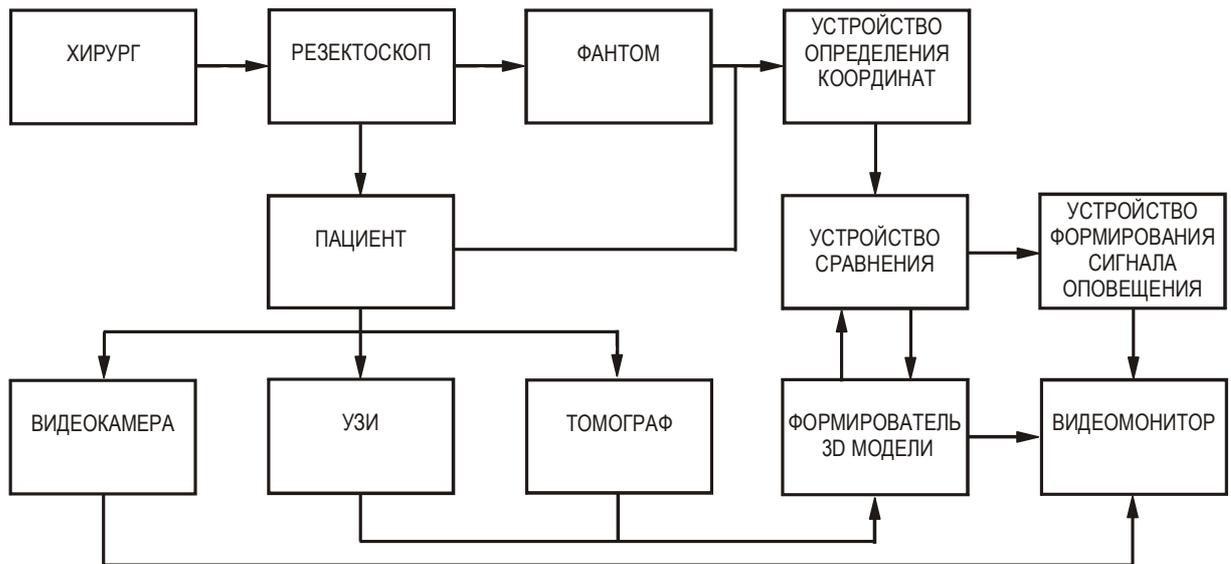


Рис.1. Структура информационной технологии

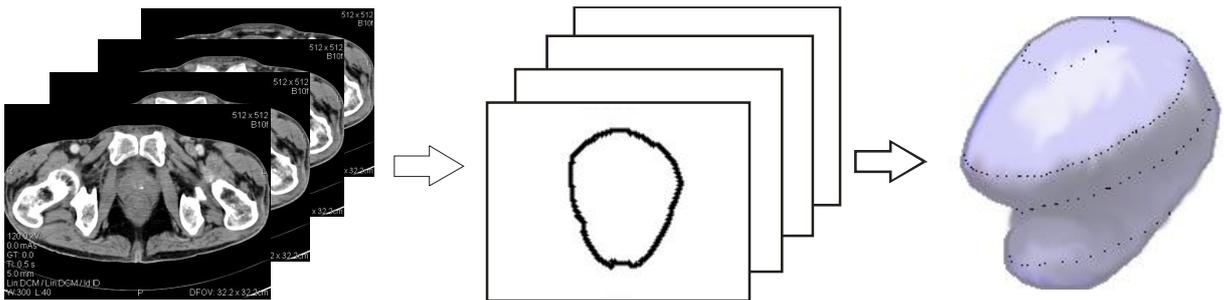


Рис. 2. Этапы формирования 3D-модели изображения предстательной железы

Виртуальная операция

На данном этапе осуществляется проведение тренировочных операций с использованием моделей тела пациента как виртуальной, так и физической. При воздействии хирурга на физический фантом осуществляется изменение виртуальной модели подобно тому, как это происходит с живыми тканями во время хирургического вмешательства.

В режиме виртуальной операции информация с датчиков положения, размещенных в фантоме, поступает в устройство определения координат манипулятора, имитирующего резектоскоп. В устройстве сравнения анализируется смещение координат тех или иных «тканей» относительно первоначальной модели. Новые координаты подаются одновременно на формирователь 3D-модели и устройство формирования сигнала оповещения. В формирователе 3D-модели осуществляется изменение первоначальной модели с учетом «чувствительности» тканей, т.е. здесь осуществляется имитация кровотоков, ухудшенной видимости.

Реальная операция

Во время хирургического вмешательства осуществляется обратная связь с пациентом. Контроль за проведением операции производится программно, используя построенную виртуальную модель предстательной железы. В режиме реальной операции изображение с микроскопической видеокамеры подается на монитор. Здесь также осуществляется анализ местоположения резектоскопа при помощи устройства определения координат. В данном режиме устройство сравнения анализирует разницу между координатами резектоскопа и стенки предстательной железы, которые вычисляются при построении виртуальной модели органа. Если разница достигает критического уровня, устройство формирования сигнала оповещения извещает хирурга о достижении им критической зоны.

Таким образом, при создании информационной технологии визуализации и многоцелевого анализа пространственных динамических изображений предстательной железы для подготовки и проведения трансуретральной резекции в программной части необходимо решить три задачи: визуализация 3D-изображения предстательной железы, аналитическое описание ее формы и сопоставление 3D-модели изображения предстательной железы с реально наблюдаемым изображением, поступаемым с видеокамеры.

2. Аналитическое описание трехмерной модели органов по результатам компьютерной томографии на основе аппарата кватернионных сигналов

Трехмерные изображения по сравнению с плоскими изображениями содержат значительно больший объем полезной для пользователей информации. Обработка этой информации тормозится отсутствием необходимых алгоритмов и вычислительных ресурсов для получения результатов в реальном масштабе времени.

Такая ситуация объясняется сложностью и статистической неоднородностью фонов и изображений объектов реальных сцен, что приводит к необходимости статистической «разметки» сцены, в результате которой она разбивается на локально однородные области. В трехмерном пространстве статистическая разметка связана с трудоемкими операциями вычисления оценок трехмерных случайных величин, их законов распределения вероятностей и определением границ областей, в которых эти характеристики незначительно отличаются друг от друга. Далее процедура обработки изображений в плане выбора алгоритмов проводится отдельно для каждой статистически однородной области. Как правило, используемые алгоритмы обнаружения и распознавания неинвариантны к масштабу и углу поворота изображения объекта. Поэтому изображения должны быть нормализованы по этим параметрам.

Ряд важных процедур для трехмерных сцен в настоящее время не имеет удовлетворительных решений, например, такие, как разрешение перекрывающихся изображений, селекция изображений теней от изображений самих объектов. Даже хорошо зарекомендовавшие себя алгоритмы неэффективны в областях с медленно изменяющейся яркостью. Аналогии с восприятием трехмерных сцен человеком приводят к выводу, что процесс обработки таких сцен неразрывно связан с пониманием их содержания и накоплением уровня знаний об окружающем мире. Таким образом, несмотря на актуальность проблемы обработки трехмерных сцен, на современном уровне она не имеет удовлетворительного решения как с позиции имеющихся теоре-

тических, так и с позиции существующих технических возможностей. Поэтому процесс ее решения будет постепенным и длительным. При этом важно, чтобы применяемые методы не носили бы исключительно эвристический или эмпирический характер, а базировались на строгих теоретических подходах, например, на теории сигналов и использовали хотя и упрощенные, но достаточно адекватные модели. Именно с этих позиций рассматривается разрабатываемая технология. Она базируется на применении нового для обработки изображений математического инструментария – кватернионного анализа. Кватернионы наиболее экономно задают трехмерные геометрические образы и их преобразования, в первую очередь, вращения. В работе [4] был разработан отдельный аспект теории сигналов – обработка кватернионных сигналов, который является основой нового подхода к обработке трехмерных сцен.

Для описания формы пространственных изображений наиболее перспективным видится применение аппарата кватернионов. Так, в работе [4] для описания изображения пространственного объекта были использованы кватернионные сигналы $\mathbf{Q} = \{q(n)\}_{0,s-1}$. К кватернионным сигналам приводит упорядоченное в трехмерном пространстве множество s точек $\Xi = \{\xi(n)\}_{0,s-1}$, задающее групповой точечный объект.

Если в пространстве выбрать некоторую точку O и принять ее в качестве начала системы отсчета, то, сформировав пучок из векторов $\mathbf{Q} = \{q(n)\}_{0,s-1}$, соединяющих точку O с точками множества Ξ , каждый из этих векторов можно рассматривать как чисто векторный кватернион

$$q(n) = q_1(n)i + q_2(n)j + q_3(n)k, \quad n = 0, 1, \dots, s-1,$$

где i, j и k – мнимые единицы. Заданное таким образом множество точек $\Xi = \{\xi(n)\}_{0,s-1}$ называется кватернионным сигналом (КТС) $\mathbf{Q} = \{q(n)\}_{0,s-1}$.

В результате компьютерной томографии имеется ряд плоских изображений внутренних органов и тканей. Градации яркости на исходных изображениях соответствуют уровням абсорбции тех или иных тканей организма человека. Процесс визуализации медицинских объектов состоит из следующих этапов:

- 1) анализ плоских двумерных срезов, получение контурных сцен;
- 2) оценка степени корреляции между срезами, получение множеств последовательно изменяющихся контуров органов и тканей на разной глубине сканирования;
- 3) формирование кватернионных сигналов на основе полученных множеств.

Таким образом, при построении трехмерной модели первостепенной задачей является контурный анализ срезов компьютерного томографа.

На подготовительном этапе необходимо провести улучшение изображений. Наиболее предпочтительными в этом случае являются методы предварительной обработки, связанные с преобразованием функции яркости, т.к. здесь не возникают искажения форм объектов на изображении.

На основе пороговой обработки изображения получаем контурные сцены I^r , состоящие из R отдельных замкнутых контуров $\Gamma^r = \{\gamma^r(n)\}_{0,s^r-1}$, где s^r – размерность контура на срезе r , $r=0, 1, \dots, R$, R – количество срезов. Для определения изменения формы того или иного объекта в зависимости от контурной сцены (томографиче-

ского среза) производится корреляционный анализ. Данная процедура осуществляется посредством вычисления взаимнокорреляционной функции двух эквализированных контуров, принадлежащих соседним контурным сценам I^r и I^{r-1} . Пособредством анализа двумерных сцен мы получаем координаты контура капсулы предстательной железы в последовательно следующих плоскостях. Формирование трехмерного изображения капсулы предстательной железы осуществляется на основе упорядоченного набора параллелей и меридианов, заданных кватернионами, и, соответственно, предполагает наличие трех координат. Так как толщина срезов компьютерного томографа является постоянной величиной, третья координата будет пропорциональна номеру среза.

Восстановление трехмерного контура капсулы предстательной железы осуществляется методом «сэндвича», т.е. посредством наложения полученных контуров $\Gamma^r = \{\gamma^r(n)\}_{0, s^r-1}$ последовательно друг на друга в соответствии с номером среза r . При этом начало системы отсчета определяется однозначно из томографических изображений, т.к. тело пациента неподвижно во время обследования и вид проекции (фронтальная, аксиальная) строго зафиксирован.

Для описания полученной трехмерной модели удобно использовать аппарат кватернионных сигналов, т.к. кватернионы более информативны и позволяют упростить некоторые процедуры, в частности, вращения. Преобразование комплекснозначного кода в кватернионные сигналы показано на рис. 3.

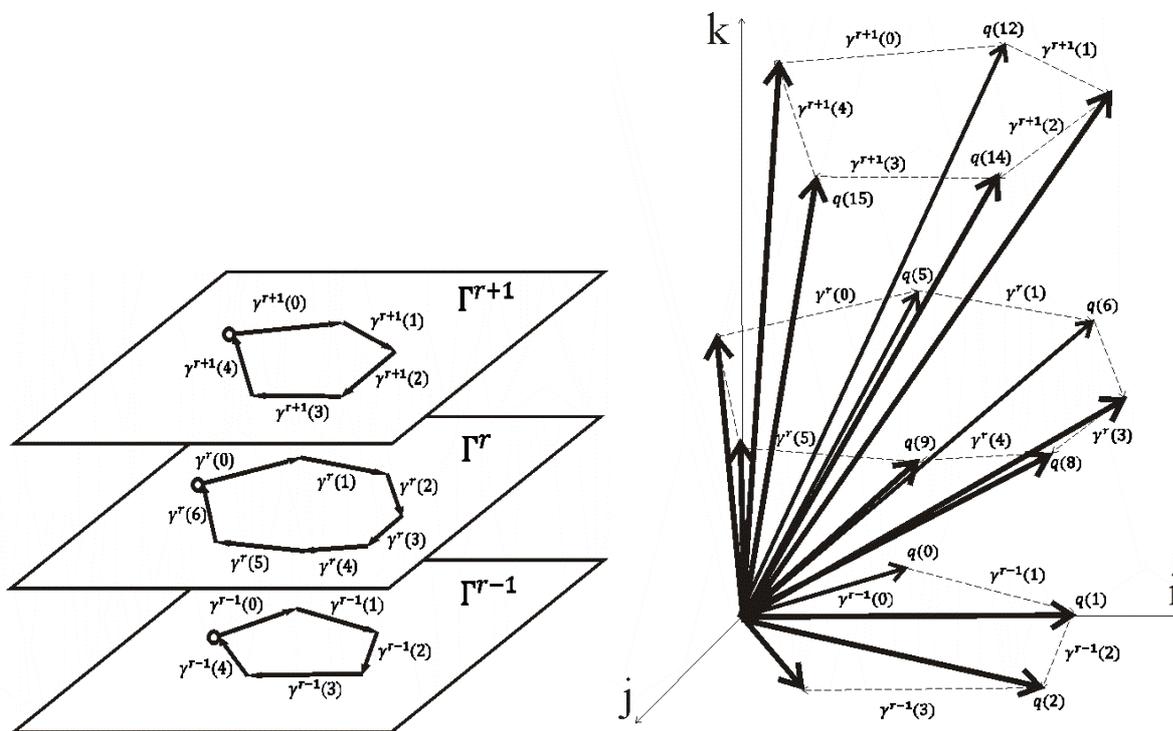


Рис.3. Восстановление трехмерного контура капсулы предстательной железы методом «сэндвича»

Элементарные векторы контура $\Gamma^r = \{\gamma^r(n)\}_{0, S^r-1}$ являются комплексными числами, т.е. $\gamma^r(n) = \gamma_0^r(n) + \gamma_1^r(n)i$. Тогда кватернионы сигнала $\mathbf{Q} = \{q(m)\}_{0, N-1}$ определяются по формуле:

$$q(m) = \gamma_0^r(w)i + \gamma_1^r(w)j + rk,$$

где $w = m - \sum_{h=0}^r s(h)$, $m = 0, 1, \dots, \sum_{h=0}^R s(h)$.

Таким образом, каждая элементарная площадка восстановленного трехмерного изображения поверхности предстательной железы задается кватернионом $q(m)$ в унитарном пространстве.

Работа по данному направлению будет выполняться коллективом Региональной научной лаборатории по обработке изображений групповых точечных объектов и точечных полей.

Заключение. На сегодняшний день проблема создания автоматизированных систем, способных оказывать помощь врачу в проведении лабораторных исследований, при постановке диагнозов и лечении, является актуальной и решается многими исследовательскими институтами мира. При создании подобных аппаратно-программных комплексов возникает ряд задач исследовательского характера. Применение в этом случае аппарата кватернионов позволяет построить эффективные алгоритмы. Его основные достоинства заключаются в том, что мера схожести изображений, по величине которой принимается решение при распознавании образов, в кватернионном пространстве обладает большей информативностью по сравнению с мерой схожести этих же изображений, заданных в действительном или комплексном пространствах. Кроме того, алгебра кватернионов адекватно отражает свойства трехмерного пространства, в частности, некоммутативность процедуры вращения изображений. По сравнению с известными системами близкого назначения предлагаемая система имеет следующие преимущества и особенности:

- специализирована для проведения операций на предстательной железе;
- в режиме выполнения виртуальной операции синтезируется трехмерное изображение железы именно того пациента, которому будет сделана реальная операция, что дает возможность учесть особенности оперируемого органа и позволяет выработать стратегию проведения операции;
- по томографическим снимкам формирует трехмерное изображение капсулы (контура) железы конкретного пациента и обеспечивает сопряжение изображений этого контура с реальным изображением железы при проведении операции;
- в режиме проведения реальной операции обеспечивает в реальном масштабе времени получение информации о текущем положении резектоскопа относительно капсулы и формирует предупреждающий сигнал о возможном ее нарушении.

Информационные технологии, подобные представленной, отсутствуют, хотя их создание в настоящее время не только востребовано в каждом хирургическом центре, но и возможно.

Список литературы

1. Попечителей, Е. Ф. Анатомические исследования в медицине, биологии и экологии: Учеб. пособие для вузов / Е. Ф. Попечителей. – М.: Высшая школа, 2003.
2. Дубровин, В. Н. Малоинвазивные операции с использованием лапароскопического и мини-доступа в урологии / В. Н. Дубровин, А. В. Табаков, Г. А. Мельник и др. // Материалы Уральской межрегиональной конференции хирургов «Хирургия мини-доступа». – Екатеринбург, 2005.
3. www.laparoscopic.ru
4. Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004.

Статья поступила в редакцию 12.02.08

R. G. Khafisov, Yu. Ye. Tretyakova

**INFORMATION TECHNOLOGY FOR VISUALIZATION AND MULTIPURPOSE
ANALYSIS OF A PROSTATE SPATIAL DYNAMIC IMAGE FOR PREPARATION
AND CONDUCTING A TRANSURETHRAL OPERATION**

The possibility of creating a multipurpose information technology on the basis of quaternion signals for transurethral resection of prostate is considered. The possibility of a prostate capsule three-dimensional contour restoring with a "sandwich" method is given.

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

ТРЕТЬЯКОВА Юлия Евгеньевна – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений. Автор трех научных публикаций.

УДК 519.2

Д. Г. Хафизов

ПОЛУЧЕНИЕ АНАЛИТИЧЕСКОГО ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФОРМЫ ПРОСТРАНСТВЕННОГО ГРУППОВОГО ТОЧЕЧНОГО ОБЪЕКТА*

Рассмотрены вопросы получения формы пространственных групповых точечных объектов на основе применения метода главных компонент. Применение метода главных компонент позволяет получить инвариантное к параметрам вращения представление кватернионного сигнала, задающего пространственный групповой точечный объект. Достоинством данного подхода является возможность оценки параметров вращения при отсутствии информации о нумерации точек в объекте.

Введение. Применение теории кватернионных сигналов (КТС) для задач обработки пространственных групповых точечных объектов (ПГТО) рассматривалось в [1,2]. В этих работах было показано, что величина скалярного произведения кватернионных сигналов, как мера схожести и базовая операция, применяемая при их обработке, является неинвариантной к углу поворота (пространственному положению) сигнального КТС по отношению к эталонному сигналу. В качестве подходов к решению данной задачи применялись такие, как: совмещение сигнального и эталонного КТС, при этом необходимо знать порядок кватернионов в сигнале [1,3]; применение собственной системы отсчета [4]; использование амплитудно-фазового представления КТС, при котором нет необходимости нумерации кватернионов в пространственном групповом точечном объекте (ПГТО) [5]; использование сферических гармоник [1,6], метод оценки параметров вращения по результатам фильтрации [7].

Рассматриваемое в данной работе решение проблемы неинвариантности скалярного произведения к углу поворота основано на известном методе, используемом в многомерном статистическом анализе данных – методе главных компонент [8,9].

К тому же в задачах обработки изображений и распознавания образов широко используется понятие геометрической формы объекта или его изображения как некоторой инварианты к ряду преобразований. В то же время в научной литературе не существует общепринятого определения понятия формы. Существуют лишь некоторые подходы к формализации этого понятия. Причем эти подходы во многом зависят от используемых моделей представления изображений объектов. В качестве одного из таких подходов в работе [1] было предложено вводить понятие формы как инварианту к операциям вращения, масштабирования и сдвига начальной точки, которая определялась относительно некоторого тестового изображения, обладающего особыми свойствами. Такое представление формы приводит к относительности самого понятия «форма».

Целью работы является получение аналитического описания пространственного группового точечного объекта, представленного в виде КТС, являющегося инвариантным к преобразованию вращения, что позволит ввести понятие формы ПГТО.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 07-01-00058-а) и государственного контракта от 14.12.2007 г. №5430р/7983.

Постановка задачи. Имеется исходный (эталонный) кватернионный сигнал \mathbf{Q} и сигнальный КТС $\mathbf{Q}^{(c)}$, который получен из \mathbf{Q} путем поворота вокруг произвольной оси $r = r_1i + r_2j + r_3k$ на произвольный угол 2φ . Необходимо показать, что \mathbf{Q} и $\mathbf{Q}^{(c)}$ – это один и тот же ГТО, а также оценить параметры вращения.

1. Метод главных компонент

Анализ главных компонент – это метод преобразования одной последовательности наблюдаемых переменных в другую последовательность переменных и заключается в получении новых показателей – главных компонент, являющихся линейными комбинациями исходных. Главные компоненты упорядочиваются в порядке убывания той дисперсии, которую они «объясняют». Первая главная компонента объясняет большую часть дисперсии, чем вторая, вторая – большую, чем третья и т.д.

Метод главных компонент (МГК) осуществляет переход к новой системе координат y_1, \dots, y_p в исходном пространстве признаков x_1, \dots, x_p , которая является системой ортонормированных линейных комбинаций

$$\begin{cases} y_j(\mathbf{x}) = w_{1j}(x_1 - m_1) + \dots + w_{pj}(x_p - m_p); \\ \sum_{i=1}^p w_{ij}^2 = 1, \quad (j = \overline{1, p}); \\ \sum_{i=1}^p w_{ij}w_{ik} = 0, \quad (j, k = \overline{1, p}, j \neq k), \end{cases} \quad (1)$$

где m_i – математическое ожидание признака x_i .

Линейные комбинации выбираются таким образом, что среди всех возможных линейных нормированных комбинаций исходных признаков первая главная компонента $y_1(\mathbf{x})$ обладает наибольшей дисперсией. Геометрически это выглядит как ориентация новой координатной оси y_1 вдоль направления наибольшей вытянутости эллипсоида рассеивания объектов исследуемой выборки в пространстве признаков x_1, \dots, x_p . Вторая главная компонента имеет наибольшую дисперсию среди всех оставшихся линейных преобразований, некоррелированных с первой главной компонентой. Она интерпретируется как направление наибольшей вытянутости эллипсоида рассеивания, перпендикулярное первой главной компоненте и т.д.

Вычисление коэффициентов главных компонент w_{ij} основано на том факте, что векторы $\mathbf{w}_1 = (w_{11}, \dots, w_{p1})^T, \dots, \mathbf{w}_p = (w_{1p}, \dots, w_{pp})^T$ являются собственными (характеристическими) векторами ковариационной матрицы \mathbf{S} . В свою очередь соответствующие собственные числа этой матрицы равны дисперсиям проекций множества объектов на оси главных компонент.

Метод главных компонент допускает следующую геометрическую интерпретацию:

- вначале производится перенос начала координат в точку, являющуюся центром эллипсоида рассеивания;
- затем производится поворот осей координат таким образом, чтобы новые оси координат были направлены вдоль осей эллипсоида рассеивания точек, причем разброс

точек вокруг первой выбранной оси должен быть не меньше, чем вдоль второй выбранной оси и т.д. (рис. 1).

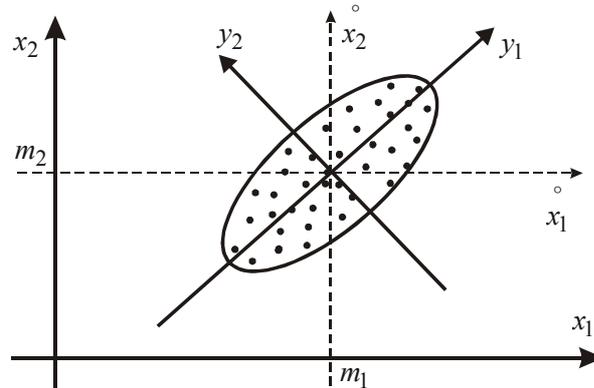


Рис. 1. Геометрическая интерпретация метода главных компонент для двумерного случая

2. Применение МГК для анализа КТС

Пусть имеется векторный КТС \mathbf{Q} размерности s . Каждая компонента кватернионов, входящих в состав сигнала, есть проекция на соответствующую ось в декартовой системе координат. Применение МГК подразумевает переход к другой ориентации осей координат, в которых координаты исходного объекта при пересчете координат не будут изменяться в зависимости от их исходного положения.

Представим КТС в виде матрицы с тремя столбцами и s строками

$$\mathbf{Q} = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ \dots \\ s-1 \end{matrix} & \begin{bmatrix} q_1(0) & q_2(0) & q_3(0) \\ q_1(1) & q_2(1) & q_3(1) \\ \dots & \dots & \dots \\ q_1(s-1) & q_2(s-1) & q_3(s-1) \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (2)$$

Здесь столбцы в терминах МГК – это переменные, т.е. $p = 3$. Тогда ковариационная матрица $\mathbf{S} = \{s_{ij}\}$

$$s_{i,j} = \frac{1}{s} \sum_{k=0}^{s-1} (q_i(k) - \bar{q}_i)(q_j(k) - \bar{q}_j), \quad i, j = 0, 1, 2, \quad (3)$$

где \bar{q}_i и \bar{q}_j – математические ожидания i и j столбца матрицы (2).

Коэффициент ковариации называют также центральным моментом второго порядка [10], а матрицу $\mathbf{S} = \{s_{ij}\}$ – матрицей моментов.

Для определения главных компонент необходимо определить собственные числа и собственные векторы ковариационной матрицы (3).

Собственные числа λ находятся из уравнения:

$$\begin{vmatrix} s_{0,0} - \lambda & s_{0,1} & s_{0,2} \\ s_{1,0} & s_{1,1} - \lambda & s_{1,2} \\ s_{2,0} & s_{2,1} & s_{2,2} - \lambda \end{vmatrix} = 0. \quad (4)$$

Данное уравнение имеет три решения $\lambda_0, \lambda_1, \lambda_2$, причем $\lambda_0 > \lambda_1 > \lambda_2$. Для нахождения собственных векторов матрицы \mathbf{S} необходимо решить три системы однородных уравнений (для каждого из $\lambda_i, i=0,1,2$)

$$\begin{cases} (s_{00} - \lambda_0)w_{00} + s_{01}w_{10} + s_{02}w_{20} = 0; \\ s_{10}w_{00} + (s_{11} - \lambda_0)w_{10} + s_{12}w_{20} = 0; \\ s_{20}w_{00} + s_{21}w_{10} + (s_{22} - \lambda_0)w_{20} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

После решения данной системы найдем $\mathbf{w}_0 = (w_{00}, w_{10}, w_{20})$. Аналогичным образом для λ_1 и λ_2 определим $\mathbf{w}_1 = (w_{01}, w_{11}, w_{21})$ и $\mathbf{w}_2 = (w_{02}, w_{12}, w_{22})$ соответственно. Таким образом, \mathbf{w}_0 соответствует первой новой координатной оси, \mathbf{w}_1 – второй, \mathbf{w}_2 – третьей. Теперь, выполнив пересчет координат исходного кватернионного сигнала

$$\Phi_{\mathbf{Q}} = \{\Phi_{\mathbf{Q}}(n)\}_{0,s-1},$$

где $\Phi_{\mathbf{Q}} = \Phi_{\mathbf{Q},1}i + \Phi_{\mathbf{Q},2}j + \Phi_{\mathbf{Q},3}k$;

$$\begin{aligned} \Phi_{\mathbf{Q},1}(n) &= w_{00}(q_1(n) - \bar{q}_1) + w_{10}(q_2(n) - \bar{q}_2) + w_{20}(q_3(n) - \bar{q}_3); \\ \Phi_{\mathbf{Q},2}(n) &= w_{01}(q_1(n) - \bar{q}_1) + w_{11}(q_2(n) - \bar{q}_2) + w_{21}(q_3(n) - \bar{q}_3); \\ \Phi_{\mathbf{Q},3}(n) &= w_{02}(q_1(n) - \bar{q}_1) + w_{12}(q_2(n) - \bar{q}_2) + w_{22}(q_3(n) - \bar{q}_3); \end{aligned} \quad (6)$$

получим изображение КТС в новых координатных осях, причем данное изображение по определению не будет зависеть от исходного положения КТС (параметров его вращения), т.е.

$$\Phi_{\mathbf{Q}} = \Phi_{b\mathbf{Q}b^{-1}}. \quad (7)$$

Рассмотрим основные свойства, связанные с использованием собственных значений и собственных векторов.

1. Собственные значения линейного оператора выражают его свойства и их значения не зависят от используемой системы координат [10]. Это означает, что и для исходного КТС \mathbf{Q} , и для повернутого $b\mathbf{Q}b^{-1}$ сигнала собственные значения ковариационной матрицы будут одинаковы.

2. Использование собственных векторов означает использование в качестве координатных базисных векторов, направление которых зависит только от конфигурации группового точечного объекта.

3. Собственные векторы – попарно ортогональны, т.е. собственные векторы задают ортонормированную систему координат.

4. Совокупность собственных векторов образует невырожденную модальную матрицу \mathbf{T} , определитель которой равен 1 и с помощью которой задается преобразование координат, т.е. является оператором вращения [1]

$$p = \mathbf{T}q,$$

здесь $q = q_1i + q_2j + q_3k$ и $p = p_1i + p_2j + p_3k$, соответственно исходный и повернутый кватернион, причем $q = \mathbf{T}^{-1}p$. Следует отметить, что при представлении вращения при помощи вращающего кватерниона можно также перейти к матрице вращения

$$\mathbf{P} = b\mathbf{Q}b^{-1} = \{bq(n)b^{-1}\}_{0,s-1} = \left\{ \left[(b_0^2 + b_1^2 - b_2^2 - b_3^2)q_1(n) + 2(b_1b_2 - b_0b_3)q_2(n) + 2(b_1b_3 + b_0b_2)q_3(n) \right] i + \right.$$

$$\left. \begin{aligned} & \left[2(b_1b_2 + b_0b_3)q_1(n) + (b_0^2 + b_2^2 - b_1^2 - b_3^2)q_2(n) + 2(b_3b_2 - b_0b_1)q_3(n) \right] j + \\ & \left[2(b_1b_3 - b_0b_2)q_1(n) + 2(b_3b_2 + b_0b_1)q_2(n) + (b_0^2 + b_3^2 - b_2^2 - b_1^2)q_3(n) \right] k \end{aligned} \right\}_{0,s-1},$$

или

$$p(n) = \begin{pmatrix} p_1(n) \\ p_2(n) \\ p_3(n) \end{pmatrix} = \mathbf{T} \cdot q(n) = \mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} q_1(n) \\ q_2(n) \\ q_3(n) \end{pmatrix},$$

где

$$T = \begin{bmatrix} b_0^2 + b_1^2 - b_2^2 - b_3^2 & 2(b_1b_2 - b_0b_3) & 2(b_3b_1 + b_0b_2) \\ 2(b_1b_2 + b_0b_3) & b_0^2 + b_2^2 - b_1^2 - b_3^2 & 2(b_3b_2 - b_0b_1) \\ 2(b_3b_1 - b_0b_2) & 2(b_3b_2 + b_0b_1) & b_0^2 + b_3^2 - b_2^2 - b_1^2 \end{bmatrix}.$$

Это обстоятельство позволяет считать данную матрицу как оценку параметров вращения КТС.

Пример.

Имеется КТС \mathbf{Q} :

$$\mathbf{Q} = \{i + 6j + 5k; 2i + j - 3k; i + 3j + 3k; 8i - 5j + 2k; 3i + 6j + k\}.$$

Найдем согласно (3) ковариационную матрицу:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 6,8 & -8,8 & -0,6 \\ -8,8 & 16,56 & 2,88 \\ -0,6 & 2,88 & 7,04 \end{pmatrix}.$$

Собственные числа данной матрицы будут иметь следующие значения:

$$\lambda_0 = 22,25418; \lambda_1 = 6,69952; \lambda_2 = 1,4463.$$

Каждому из этих собственных значений соответствует свой собственный вектор:

$$\mathbf{w}_0 = (-0,49197; 0,85167; 0,18062);$$

$$\mathbf{w}_1 = (0,24561; -0,06314; 0,96726);$$

$$\mathbf{w}_2 = (-0,83519; -0,52026; 0,17828).$$

Далее, выполнив пересчет координат по (6), получаем следующее изображение КТС в осях главных компонент

$$\Phi_{\mathbf{Q}} = \{4,83439i + 2,55713j + 0,29953; -1,36088i - 4,61943j + 0,63942;$$

$$1,918i + 0,81j + 1,5037k; -8,5196i + 2,071j - 0,3587k; 3,128i - 0,82j - 2,084k\}.$$

Пусть теперь КТС повернут на произвольный угол α вокруг произвольной оси

$$r = r_1i + r_2j + r_3k, |r| = 1, \text{ т.е. вращающий кватернион равен } b = \cos \frac{\alpha}{2} + r \cdot \sin \frac{\alpha}{2} :$$

$$b\mathbf{Q}b^{-1} = \{4,5311i + 2,6961j + 5,848k; 0,683i + 2,366j - 2,8169k;$$

$$2,915i + 1,098j + 3,049k; 6,544i - 5,33j - 4,665k; 4,531i + 4,696j + 1,848k\}.$$

Ковариационная матрица такого КТС

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} 3,818 & -3,559 & -0,2453 \\ -3,559 & 11,6858 & 8,4775 \\ -0,2453 & 8,4775 & 14,896 \end{pmatrix}.$$

Собственные числа данной матрицы будут иметь следующие значения:

$$\lambda_0 = 22,25418; \lambda_1 = 6,69952; \lambda_2 = 1,4463.$$

Видим, что собственные значения получились такими же, как и в предыдущем случае.

Каждому из этих собственных значений также соответствует свой собственный вектор:

$$\mathbf{w}_0 = (-0,13493; 0,64726; 0,75023);$$

$$\mathbf{w}_1 = (0,61592; -0,53831; 0,5752);$$

$$\mathbf{w}_2 = (-0,77616; -0,5397; 0,32602).$$

Далее, выполнив пересчет координат по (6), получаем следующее изображение КТС в осях главных компонент

$$\Phi_{bQb^{-1}} = \{4,83439i + 2,55713j + 0,29953; -1,36088i - 4,61943j + 0,63942; 1,918i + 0,81j + 1,5037k; -8,5196i + 2,071j - 0,3587k; 3,128i - 0,82j - 2,084k\}.$$

Таким образом, получено такое же изображение объекта, как и для исходного кватернионного сигнала Q .

Заключение. Применение метода главных компонент, основанного на использовании характеристических чисел и векторов, позволяет получить инвариантное по отношению к параметрам вращения изображение группового точечного объекта в пространстве. При этом получение модальной матрицы на основе собственных векторов матрицы ковариации S означает определение параметров вращения кватернионного сигнала. К достоинству метода можно отнести тот факт, что для получения изображения объекта в новых координатах нет необходимости в упорядочении точечных отметок ПГТО в соответствии с эталонным сигналом, а также не требуется знание самого эталонного сигнала.

Таким образом, можно говорить о понятии формы группового точечного объекта, представленного кватернионным сигналом. Далее предполагается рассмотрение следующих вопросов:

- 1) влияние координатных шумов на величину меры схожести сигналов;
- 2) влияние координатных шумов на оценку параметров вращения ГТО;
- 3) эффективность использования данной методики для решения задачи распознавания пространственных ГТО с неизвестными параметрами линейных преобразований.

Список литературы

1. Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 456 с.
2. *Furman, Ya. A.* Processing of Quaternion Signals Specifying Spatially Located Group Point Objects / Ya. A. Furman // Pattern Recognition and Image Analysis. – Vol.12, No.2, 2002. – Pp.175–193.
3. *Хафизов, Д. Г.* Совмещение кватернионных сигналов при решении задачи обработки изображений группового точечного объекта / Д. Г. Хафизов // Вестник Вятского научного центра Верхне-Волжского отделения Академии технологических наук Российской Федерации. – 2002. – №1. – С. 176–180.
4. *Хафизов, Д. Г.* Распознавание групповых точечных объектов на основе представления в собственной системе отсчета кватернионных сигналов / Д. Г. Хафизов, Р. Г. Хафизов // Автотметрия. – 2005. – №3. – С. 19–30.
5. *Хафизов, Д. Г.* Упорядочение точек пространственного изображения группового точечного объекта на базе амплитудно-фазового представления / Д. Г. Хафизов // Автотметрия. – 2007. – Том 43. – №1. – С. 10–23.

6. *Леухин, А. Н.* Оценка параметров вращений трехмерного группового точечного объекта без предварительной нумерации формирующих точек / А. Н. Леухин, Д. Г. Хафизов // Математические методы распознавания образов: Доклады 11-й Всероссийской конференции. – М., 2003. – С. 130–133.
7. *Фурман, Я. А.* Нахождение параметров вращения пространственного группового точечного объекта по результатам его фильтрации / Я. А. Фурман, К. Б. Рябинин // Радиотехника и электроника. – 2008. – Том 53. – №1. – С. 86–97.
8. *Дронов, С. В.* Многомерный статистический анализ: Учеб. пособие / С. В. Дронов. – Барнаул: Изд-во Алт. гос. ун-та, 2003. – 213 с.
9. *Калинина, В. Н.* Введение в многомерный статистический анализ: Учеб. пособие / В. Н. Калинина, В. И. Соловьев / ГУУ. – М., 2003. – 66 с.
10. *Корн, Г.* Справочник по математике для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1968. – 720 с.

Статья поступила в редакцию 18.04.08

D. G. Khafisov

GETTING AN ANALYTICAL REPRESENTATION OF THE SPATIAL GROUP POINT OBJECTS FORM

The problems of getting a spatial group point objects form on the basis of the method of principal components are considered. Application of the method of the method of principal components allows to receive invariant to rotation parameters representation of quaternion signals setting a spatial group point object. The advantage of the approach given is the opportunity to estimate rotation parameters when the information on points numbers in the object is missing.

ХАФИЗОВ Динар Гафиятуллович – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – радиолокационные изображения, распознавание образов, анализ сцен, контуры, синтез оптимальных алгоритмов, фильтрация, искусственный интеллект, сложные сигналы. Автор 50 публикаций.

УДК 621.391.25

*Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова, А. Ю. Чернышев***НЕПОСРЕДСТВЕННОЕ ФОРМИРОВАНИЕ ПОРОЖДАЮЩИХ МАТРИЦ И ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ КОДОВ АДАМАРА**

Рассмотрены вопросы синтеза кодов Адамара и их порождающих матриц. Получен обобщенный метод прямого формирования порождающих матриц для кодов Адамара произвольного порядка. Сделана оценка возможностей практического применения кодов Адамара.

Введение. В цифровых системах передачи информации с целью обнаружения и исправления ошибок широко применяются блочные помехоустойчивые (корректирующие) коды. В настоящее время известно и исследовано достаточно большое количество целых классов таких кодов, в том числе коды Адамара [1, 2]. Классический метод синтеза линейных блочных кодов Адамара основан на использовании хорошо известных одноименных матриц и позволяет получить в первую очередь исходные матрицы кодов. Однако для практической реализации кодиров и декодеров более значимыми являются порождающие матрицы, принципы построения которых для кодов Адамара в общем случае неизвестны.

Цель работы – получить обобщенный метод непосредственного формирования порождающих матриц кодов Адамара произвольного порядка и оценить возможности практического применения кодов Адамара.

Типовая модель синтеза кодов Адамара и её обобщенный анализ

Избыточный помехоустойчивый код, называемый кодом Адамара [1] M -го порядка и формируемый при помощи соответствующей матрицы Адамара \mathbf{A}^M , определяется выражением

$$\mathbf{S}^M = \begin{bmatrix} \overline{\mathbf{A}^M} \\ \mathbf{A}^M \end{bmatrix}, M = 0, 1, 2, \dots \quad (1)$$

Матрица Адамара M -го порядка \mathbf{A}^M является симметричной квадратной, имеет размеры $N \times N = 2^M \times 2^M$ и состоит из четырех подматриц, три из которых идентичны друг другу. Именно благодаря идентичности подматриц меньшего порядка \mathbf{A}^{M-1} и их симметричному расположению относительно главной диагонали достигается общая симметрия матрицы \mathbf{A}^M . В двоичном пространстве $GF2$ матрицы Адамара можно получить при помощи выражений

$$\mathbf{A}^0 = [0]; \mathbf{A}^M = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{M-1} & \mathbf{A}^{M-1} \\ \mathbf{A}^{M-1} & \overline{\mathbf{A}^{M-1}} \end{bmatrix}, M = 1, 2, 3, \dots, \quad (2)$$

где $\overline{\mathbf{A}^{M-1}}$ означает поэлементную инверсию элементов матрицы \mathbf{A}^{M-1} .

Анализ выражения (1) с учетом структурных особенностей матриц Адамара (2) приводит к выводу, что в состав кода Адамара входят следующие кодовые комбинации (кодовые слова) длиной $N=2^M$: одно слово с нулевым весом Хэмминга (нулевое слово);

одно слово с весом Хэмминга, равным N , получаемое в результате инверсии нулевого слова; $2N-2$ различных слов с весом Хэмминга, равным $N/2$, образующих взаимно инверсные пары. Полный код Адамара, таким образом, включает $2N=2^{M+1}$ слов.

Как линейному блоковому коду, коду Адамара соответствует обозначение $(N, K)=(2^M, M+1)$, где N – длина кодового слова, K – длина информационного блока. Код S^M действительно является линейным блоковым кодом, так как обладает свойством замкнутости относительно операции поразрядного сложения по модулю 2 символов кода [3]. Для кодов любого порядка M , формируемых в соответствии с выражениями (1) и (2), это обусловлено выполнением следующих условий:

а) результатом сложения взаимно инверсных слов x и \bar{x} является принадлежащее коду S^M единичное слово, т.е. $x \oplus \bar{x} = \mathbf{1}$;

б) результатом сложения любого кодового слова x с нулевым является то же самое слово, т.е. $x \oplus \mathbf{0} = x$;

в) в результате сложения любого кодового слова x с единичным словом образуется инверсное слово, т.е. $x \oplus \mathbf{1} = \bar{x}$;

г) в результате сложения двух произвольных слов, принадлежащих одной и той же матрице (A^M или \bar{A}^M), за исключением нулевого и единичного, образуется слово, принадлежащее матрице A^M , а значит и коду S^M ;

д) в результате сложения двух произвольных слов, принадлежащих различным матрицам (A^M и \bar{A}^M), образуется слово, принадлежащее матрице \bar{A}^M , а значит и коду S^M .

Так как для линейных блоковых кодов минимальное кодовое расстояние не превышает минимального из весов Хэмминга кодовых слов [3], оно равно

$$d = N/2 = 2^{M-1} = 2^{K-2}. \quad (3)$$

Следовательно, кратности обнаружения и исправления ошибок составляют

$$t_0 \leq d-1 = 2^{M-1}-1; t_{\text{И}} \leq (d-1)/2 = (2^{M-1}-1)/2. \quad (4)$$

Скорость кода Адамара, как и любого (N, K) -кода, определяется формулой

$$R = K/N = (M+1)/2^M = K/2^{K-1}. \quad (5)$$

Зная предельную исправляющую способность кода, определяемую выражением (4), можно также оценить максимально допустимую вероятность одиночной ошибки, при которой передача информации в двоичном симметричном канале остается устойчивой, по формуле

$$p_0 = t_{\text{И}}/N. \quad (6)$$

Из табл. 1, в которой представлены основные параметры кодов Адамара 0...10-х порядков, видно, что коды 0-го и 1-го порядка, (1, 1) и (2, 2) соответственно, являются примитивными, т.е. не имеют избыточности, и вследствие этого не обладают никакими помехоустойчивыми свойствами. Для остальных кодов характерны снижение скорости и усиление способности к обнаружению и исправлению ошибок по мере увеличения порядка M . Так, например, для кода 10-го порядка (1024, 11) допустимая вероятность одиночных ошибок достигает практически 25%. В связи с этим интерес представляет структура отдельных кодов, а также их порождающих и проверочных матриц.

Таблица 1

Основные параметры кодов Адамара

| Параметры кода | | Значения параметров | | | | | | | | | | |
|---|-------|---------------------|---|-----|-----|------|------|-----------------|------------------|------------------|-------------------|--------------------|
| Порядок кода | M | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Длина кода (слова) | N | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 |
| Длина информационного блока | K | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Минимальное кодовое расстояние | d | 1 | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 |
| Кратность обнаружения ошибок, не более | t_0 | - | - | 1 | 3 | 7 | 15 | 31 | 63 | 127 | 255 | 511 |
| Кратность исправления ошибок, не более | t_H | - | - | - | 1 | 3 | 7 | 15 | 31 | 63 | 127 | 255 |
| Скорость кода | R | 1 | 1 | 3/4 | 1/2 | 5/16 | 3/16 | 7/64 | 1/16 | 9/256 | 5/256 | 1/256 |
| Допустимая вероятность одиночных ошибок | p_0 | - | - | - | 1/8 | 3/16 | 7/32 | $\frac{15}{64}$ | $\frac{31}{128}$ | $\frac{63}{256}$ | $\frac{127}{512}$ | $\frac{255}{1024}$ |

Прямой синтез порождающих матриц кодов Адамара

Наиболее простыми являются систематические коды (4, 3) и (8, 4), определяемые каноническими порождающими матрицами

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

для кода (4, 3) и

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

для кода (8, 4).

Следует отметить, что код (4, 3) изначально является систематическим, так как первые три бита кодовых слов образуют уникальные комбинации. В отличие от него в первичном коде (8, 4) первые четыре бита не образуют уникальные комбинации. Систематизация может быть достигнута перестановкой 4-го и любого из следующих за ним столбцов (с 5-го по 8-й). В частности, матрица (8) получена в результате перестановки 4-го и 5-го столбцов.

Из результатов анализа порождающих матриц кодов (4, 3) и (8, 4), представленных выражениями (7) и (8), видно, что они состоят из столбцов, веса Хэмминга которых имеют только нечетные значения (1 и 3). При этом столбцы с единичным весом Хэмминга образуют единичные подматрицы, а проверочные подматрицы образованы столбцами с весом Хэмминга 3. Очевидно, что это свойство характерно также и для кодов Адамара более высокого порядка.

Для проверки этой гипотезы в среде Delphi на языке программирования Pascal разработана специальная прикладная программа для моделирования и исследования свойств кодов Адамара (N, K) с $K \leq 10$. В результате моделирования установлено, что действительно для кодов Адамара (16, 5) и (32, 6) столбцы порождающих матриц имеют вес 1, 3, 5 для кодов (64, 6) и (128, 7) – 1, 3, 5, 7, и т.д. Обобщенные результаты моделирования приведены в табл. 2, где предполагается, что $C(K, J) = K! / (J!(K - J)!)$ – количество комбинаций из K по J .

Таблица 2

Характеристики порождающих матриц кодов Адамара

| Параметры кода | | Значения параметров | | | | | | | | | | |
|----------------------------------|-----|---------------------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|------------|------------|------------|-------------|
| Порядок кода | M | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| Число строк в матрице | K | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Число столбцов в матрице, | N | 1 | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 |
| в том числе $C(K, 1)$ | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| $C(K, 3)$ | | - | - | 1 | 4 | 10 | 20 | 35 | 56 | 84 | 120 | 165 |
| $C(K, 5)$ | | - | - | - | - | 1 | 6 | 21 | 56 | 126 | 252 | 462 |
| $C(K, 7)$ | | - | - | - | - | - | - | 1 | 8 | 36 | 120 | 330 |
| $C(K, 9)$ | | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 | 10 | 55 |
| $C(K, 11)$ | | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |

Анализ структуры порождающих матриц, согласно табл. 2, приводит к выводу, что столбцы порождающей матрицы кода Адамара произвольного порядка M представляют собой совокупность всех возможных K -разрядных (где $K=M+1$) комбинаций с нечетными значениями веса Хэмминга. С учетом этого длина кода вычисляется не только как $N=2^M$, но и по формуле

$$N = \sum_{j=0}^{M \operatorname{div} 2} \frac{K!}{(2j+1)!(K-2j-1)!} \quad (9)$$

В выражении (9) использование только нечетных значений веса Хэмминга обеспечивается за счет определения текущего веса по формуле $J=2j+1$ при $0 \leq j \leq (M \operatorname{div} 2)$, где $(M \operatorname{div} 2)$ – операция вычисления целой части от деления M на 2.

Собственно, показанное выше свойство легко объясняется. Во-первых, в любом коде Адамара обязательно присутствует кодовая комбинация, состоящая из одних единиц. Такая комбинация может быть получена только в результате сложения нечетного числа единиц в каждом из разрядов. Это в свою очередь возможно лишь при условии, что информационный блок состоит только из единичных элементов, а каждый из столбцов порождающей матрицы имеет нечетное значение веса Хэмминга.

Следует отметить, что возможность приведения порождающей матрицы к канонической форме обусловлена наличием в исходной матрице \mathbf{G} всех возможных столбцов единичного веса.

Возможности применения кодов Адамара

Практическая значимость и эффективность применения помехоустойчивых кодов зависит от комплекса параметров, в первую очередь – от величины минимального кодового расстояния d и кодовой скорости R . Как известно, крайние положения в рейтинговой оценке кодов занимают, с одной стороны, коды с общей проверкой на четность (как самые «быстрые», но самые «неустойчивые») и коды на основе псевдослучайных последовательностей максимальной длины, с другой [3] (как самые «медленные», но самые «устойчивые»). Промежуточное положение занимают широко распространенные коды Хэмминга [1, 3]. Поэтому оценку практической значимости и эффективности кодов Адамара целесообразно провести с перечисленными выше кодами. В качестве общего параметра для всех кодов выбрана длина информационного блока K . Результаты сравнения представлены в табл. 3.

Таблица 3

Основные параметры помехоустойчивых кодов

| Параметр кода | Код | Длина информационного блока K | | | | | | | | |
|---------------------------------------|-----|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|
| | | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| Длина кода N | A | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| | B | - | 7 | - | - | - | - | - | - | 15 |
| | C | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 |
| | D | 7 | 15 | 31 | 63 | 127 | 255 | 511 | 1023 | 2047 |
| Миним. кодвое расстояние d | A | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 2 |
| | B | - | 3 | - | - | - | - | - | - | 3 |
| | C | 2 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 |
| | D | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | 512 | 1024 |
| Скорость кода R | A | 0,750 | 0,800 | 0,833 | 0,857 | 0,875 | 0,889 | 0,900 | 0,909 | 0,917 |
| | B | - | 0,429 | - | - | - | - | - | - | 0,733 |
| | C | 0,750 | 0,500 | 0,313 | 0,188 | 0,109 | 0,063 | 0,035 | 0,020 | 0,011 |
| | D | 0,429 | 0,267 | 0,161 | 0,095 | 0,055 | 0,031 | 0,018 | 0,0098 | 0,0054 |

Поскольку коды Адамара (1, 1) и (2, 2) являются примитивными, сравнение проведено только для кодов с $K \geq 3$. Следует отметить, что известны коды Хэмминга только с $K=4$ и $K=11$, т.е. коды (7, 4) и (15, 11), что также отражено в структуре табл. 3. Различные коды условно обозначены символами латинского алфавита: А – коды с общей проверкой на четность; В – коды Хэмминга; С – коды Адамара; D – коды на основе псевдослучайных последовательностей максимальной длины (М-последовательностей). Как видно из табл. 3, коды Адамара во многом схожи с кодами на основе М-последовательностей: для них характерно увеличение минимального кодвоего расстояния и уменьшение скорости кода с ростом длины информационного блока.

Как показывает сравнение по комплексному показателю $S=d \cdot R$, представленное в табл. 4, коды Адамара можно рассматривать в качестве эквивалентной замены кодам на основе М-последовательностей.

Таблица 4

Комплексные показатели помехоустойчивых кодов

| Коды | Длина информационного блока K | | | | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
| с общей проверкой на четность | 1,500 | 1,600 | 1,667 | 1,714 | 1,750 | 1,778 | 1,800 | 1,818 | 1,833 |
| Адамара | 1,500 | 2,000 | 2,500 | 3,000 | 3,500 | 4,000 | 4,500 | 5,000 | 5,500 |
| на основе М-последовательностей | 1,714 | 2,133 | 2,581 | 3,048 | 3,528 | 4,016 | 4,509 | 5,005 | 5,503 |

Заключение. Порождающую матрицу кода Адамара произвольного M -го порядка можно сформировать как совокупность N различных K -разрядных столбцов только с нечетными весами Хэмминга. За счет перестановок столбцов порождающая матрица всегда может быть преобразована в каноническую, а определяемый ею код – в систематический. Для этого достаточно осуществить перестановку столбцов.

Коды Адамара по своим свойствам близки к кодам на основе псевдослучайных последовательностей максимальной длины и могут стать их эквивалентной заменой, обладая вдвое меньшей кодвоей скоростью.

Список литературы

1. *Прокис, Д.* Цифровая связь / Д. Прокис; пер с англ.; под ред. Д. Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
2. *Степанов, С. А.* Нелинейные коды, построенные по модифицированным матрицам Батсона – Адамара // Дискретная математика. – 2006. – Том 18, вып. 4. – С. 137–147.
3. *Золотарев, В. В.* Помехоустойчивое кодирование: методы и алгоритмы: справочник / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 126 с.

Статья поступила в редакцию 02.07.08

Ye. V. Petukhova, Yu. V. Sushentsova, A. Yu. Chernyshov

**DIRECT FORMING OF GENERATING MATRICES AND PRACTICAL
APPLICATION OF ADAMAR CODES**

The problems of Adamar codes synthesis and their generating matrices are considered. A generalized method of generating matrices direct forming for Adamar codes of arbitrary order is obtained. The estimation of possible practical application of Adamar codes is made.

ПЕТУХОВА Елена Витальевна – студентка радиотехнического факультета МарГТУ. Область научных интересов – сети и системы телекоммуникаций; теория и методы помехоустойчивого кодирования.

СУШЕНЦОВА Юлия Владимировна – студентка радиотехнического факультета МарГТУ. Область научных интересов – сети и системы телекоммуникаций; теория и методы помехоустойчивого кодирования.

ЧЕРНЫШЕВ Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи МарГТУ. Область научных интересов – системы и устройства радиотехники и связи; сверхширокополосные системы; теория и технологии защиты информации. Автор 79 научных публикаций.

УДК 621.391.266

А. А. Роженцов, С. Н. Крылов, А. А. Баев

РАСПОЗНАВАНИЕ ПЛОСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ГРУППОВЫХ ТОЧЕЧНЫХ ОБЪЕКТОВ С НЕУПОРЯДОЧЕННЫМИ ОТМЕТКАМИ*

Решена задача обработки изображений групповых точечных объектов с неупорядоченными отметками на базе методов теории функции комплексного переменного путем формирования вторичного описания изображений групповых точечных объектов в виде полиномиальных функций. Определено влияние параметров линейных преобразований на вид вторичного описания и предложены подходы к их оценке. Решена задача распознавания изображений групповых точечных объектов и получены оценки эффективности предложенных алгоритмов.

Введение. Необходимость обработки плоских изображений групповых точечных объектов (ГТО) возникает в системах астроориентации, системах радиолокационного обзора подстилающей поверхности и воздушного пространства, системах дефектоскопии и т.п. [1–4]. При этом в большинстве случаев отсутствует информация о нумерации отметок, что не позволяет использовать для обработки группового точечного объекта эффективные методы контурного анализа, базирующиеся на согласованной фильтрации комплекснозначных сигналов. Для их использования необходимо либо предварительно выполнять процедуру нумерации отметок в составе ГТО, либо использовать подходы, не требующие знания нумерации отметок в сцене. Эффективность первого подхода во многом определяется помехоустойчивостью процедуры нумерации отметок в сцене, а эффективность методов, инвариантных к нумерации, либо является недостаточной (как у метода угловых расстояний), либо они требуют значительных вычислительных затрат (как корреляционные методы).

Целью работы является разработка подходов к решению задачи распознавания изображений групповых точечных объектов, инвариантных к нумерации отметок, базирующихся на методах теории функции комплексного переменного. Эти подходы позволяют подходить к исследованию конфигураций объектов как к исследованию свойств функции, заданных на комплексной плоскости, свойства которых непосредственно связаны со свойствами групповых точечных объектов и поэтому могут служить основой для их обработки.

1. Формирование вторичного описания изображений ГТО, инвариантного к нумерации отметок в сцене

Конфигурация объекта, отсчеты которого заданы на плоскости в виде отдельных точек, может быть описана в виде функции комплексного переменного, проходящей либо непосредственно через эти точки, либо минимально отклоняющейся от них. Предпочтительное аналитическое представление такой функции определяется формой объекта, но в общем случае возможно использование полиномиального описания:

* Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ, проекты № 08-01-00854-а, № 07-01-00058-а, № 08-01-12000-офи.

$$u(z) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m z^m. \quad (1)$$

Здесь a_m – коэффициенты полинома, $u(z)$ – линия, проходящая вблизи или через точки группового точечного объекта, z – аргумент функции. В качестве аргумента удобно использовать отсчеты функции, лежащие на единичной окружности. Это позволяет, как будет показано далее, установить однозначную взаимосвязь между коэффициентами a_m эталонного объекта и соответствующими коэффициентами объекта, подвергнутого линейным преобразованиям.

Рассмотрим подход к вычислению коэффициентов a_m для случая, когда координаты точек объекта заданы в виде комплекснозначного вектора $\Gamma = \{\gamma(n)\}_{0,k-1} = \{\gamma_0(n) + i\gamma_1(n)\}_{0,k-1}$, где $\gamma(n)$, $n = 0, 1, \dots, k-1$ – координаты точек объекта на комплексной плоскости, k – количество отметок в составе объекта. Необходимо найти такие коэффициенты a_m , $m = 0, 1, \dots, M-1$, чтобы суммарная величина отклонений между аппроксимированными значениями функции $u(z(n))$, где $z(n) = \gamma(n)/|\gamma(n)|$ – векторы, проведенные из центра единичной окружности в направлении соответствующих отметок $\gamma(n)$, и координатами отметок $\gamma(n)$ была минимальной, т.е.

$$\sum_{n=0}^{k-1} |u(z(n)) - \gamma(n)|^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

Решение данной задачи базируется на методе наименьших квадратов. Запишем выражение (2) в следующем виде:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \sum_{n=0}^{k-1} \left| \sum_{m=0}^{M-1} a_m z(n)^m - \gamma(n) \right|^2 = \\ &= \sum_{n=0}^{k-1} \left(\sum_{m=0}^{M-1} a_m z(n)^m - \gamma(n) \right) \overline{\left(\sum_{m=0}^{M-1} a_m z(n)^m - \gamma(n) \right)} \rightarrow \min. \end{aligned}$$

После вычисления частных производных по коэффициентам a_m и перегруппировки слагаемых можно записать:

$$\sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} \left[\overline{z(n)^r} z(n)^m a_m - \overline{z(n)^r} \gamma(n) \right] \right) = 0, \quad r = 0, 1, \dots, M-1.$$

Данное выражение задает систему из M линейных уравнений и может быть преобразовано к виду:

$$\sum_{m=0}^{M-1} \left(\sum_{n=0}^{N-1} \overline{z(n)^r} z(n)^m \right) a_m = \sum_{n=0}^{N-1} \overline{z(n)^r} \gamma(n), \quad r = 0, 1, \dots, M-1.$$

Решение данной системы уравнений позволяет найти значения коэффициентов a_m полиномиальной функции, выполняющей отображение отсчетов единичной окружности в точки, соответствующие положению отметок группового точечного объекта. Поскольку при формировании коэффициентов вычисляются значения сумм, величина которых не зависит от порядка суммирования, то полученные значения коэффициентов a_m будут инвариантны к нумерации. На рис. 1 приведен пример изображения исходного группового точечного объекта размерностью $k = 15$, соответствующий ему набор еди-

ничных векторов и отсчеты аппроксимирующей функции. При совпадении степени полинома с размерностью объекта, как и следовало ожидать, положение отметок объекта и аппроксимированных отсчетов совпадают.

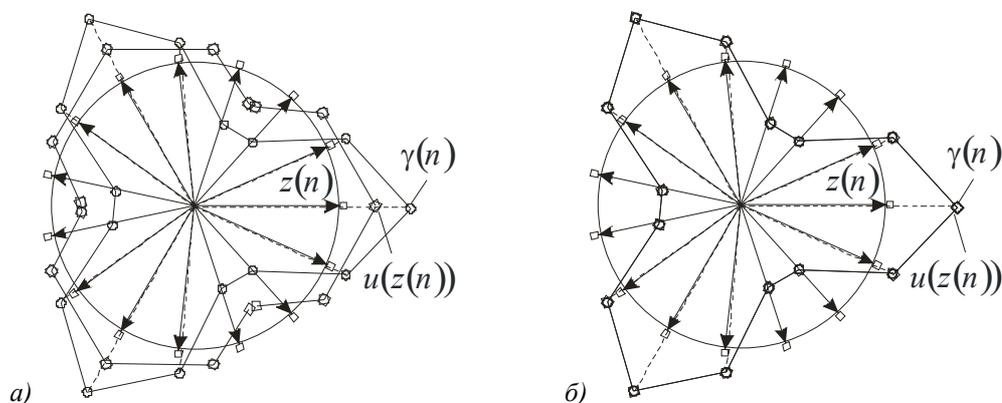


Рис. 1. Пример аппроксимации отсчетов группового точечного объекта с помощью полиномиальной функции комплексного переменного: а) аппроксимация при $M = 5$; б) аппроксимация $M = 15$

Таким образом, на базе методов теории функции комплексного переменного может быть получено вторичное описание группового точечного объекта, инвариантное к ну-мерации отметок в сцене.

2. Обработка изображений групповых точечных объектов с неизвестными параметрами линейных преобразований

2.1. Обработка изображения с неизвестным масштабом

При обработке изображений параметры линейных преобразований объектов – масштаб и угол поворота – могут быть неизвестны. В этом случае возникает задача обеспечения инвариантности алгоритмов обработки к изменению этих параметров, а в ряде случаев, и их оценки. Рассмотрим, как влияют преобразования поворота и масштабирования на вид коэффициентов отображающей функции a_m .

При изменении масштаба изображения каждый отсчет p_n умножается на некоторый масштабный множитель μ , т.е.

$$v(n) = \mu \gamma(n), \quad n = 0, 1, \dots, k-1.$$

В этом случае формула (1) примет следующий вид:

$$\sum_{m=0}^{M-1} z^m a_m^{(\mu)} = v(n) = \mu \gamma(n), \quad (3)$$

где $a_m^{(\mu)}$ – коэффициенты, полученные для объекта с измененным масштабом. Поскольку

$$\gamma(n) = \sum_{m=0}^{M-1} z^m a_m,$$

выражение (3) можно записать в виде

$$\sum_{m=0}^{M-1} z^m a_m^{(\mu)} = \mu \sum_{m=0}^{M-1} z^m a_m.$$

Тогда

$$\sum_{m=0}^{M-1} z^m \frac{a_m^{(\mu)}}{\mu} = \sum_{m=0}^{M-1} z^m a_m \Rightarrow \frac{a_m^{(\mu)}}{\mu} = a_m \Rightarrow \mu = \frac{a_m^{(\mu)}}{a_m}. \quad (4)$$

Таким образом, изменение масштаба в μ раз приводит к изменению в μ раз коэффициентов аппроксимирующей функции, что позволяет выполнять его оценку.

2.2. Обработка изображений с неизвестным углом поворота

При вращении объекта каждый его вектор поворачивается на некоторый угол $\Delta\varphi$, т.е.

$$v(n) = \gamma(n) \exp\{i\Delta\varphi\}, \quad n = 0, 1, \dots, k-1.$$

В этом случае формула (1) примет следующий вид:

$$\sum_{m=0}^{M-1} (z \exp\{i\Delta\varphi\})^m a_m^{(\Delta\varphi)} = v(n) = \gamma(n) \exp\{i\Delta\varphi\}, \quad (5)$$

где $a_m^{(\Delta\varphi)}$ – коэффициенты, полученные для повернутого объекта. Поскольку

$$\gamma(n) = \sum_{m=0}^{M-1} z^m a_m,$$

выражение (4) можно записать в виде

$$\sum_{m=0}^{M-1} (z \exp\{i\Delta\varphi\})^m a_m^{(\Delta\varphi)} = \exp\{i\Delta\varphi\} \sum_{m=0}^{M-1} z^m a_m.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \sum_{m=0}^{M-1} z^m (\exp\{i\Delta\varphi\})^{m-1} a_m^{(\Delta\varphi)} &= \sum_{m=0}^{M-1} z^m a_m \Rightarrow (\exp\{i\Delta\varphi\})^{m-1} a_m^{(\Delta\varphi)} = a_m \Rightarrow \\ \Rightarrow (\exp\{i\Delta\varphi\})^{m-1} &= \frac{a_m}{a_m^{(\Delta\varphi)}} \Rightarrow \Delta\varphi = \arg \left(m^{-1} \sqrt{\frac{a_m}{a_m^{(\Delta\varphi)}}} \right). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, поворот объекта на угол $\Delta\varphi$ приводит к соответствующему изменению коэффициентов аппроксимирующей функции, что позволяет выполнять по ним оценку параметров вращения.

3. Распознавание изображений групповых точечных объектов с неизвестной нумерацией отметок

Задача распознавания изображений ГТО с неупорядоченными отметками ставится следующим образом: задан алфавит эталонных изображений групповых точечных объектов. На вход системы распознавания поступают заданные в виде комплекснозначного вектора координаты наблюдаемого ГТО. Система распознавания должна принять обоснованное решение об отнесении наблюдаемого объекта к одному из классов.

Решение задачи распознавания изображений групповых точечных объектов с неупорядоченными отметками базируется на вычислении мер схожести эталонных ГТО с наблюдаемым путем формирования набора скалярных произведений между коэффициентами a_m и $a_m^{(s)}$ функций, описывающих эти объекты:

$$\eta = \operatorname{Re} \left(\sum_{m=0}^{M-1} a_m \cdot a_m^{*(\vartheta)} \right). \quad (7)$$

При неизвестном масштабе необходимо предварительно выполнить его оценку в соответствии с (4), затем привести коэффициенты к одному масштабу и после этого найти величину меры схожести в соответствии с (7). Аналогичный результат может быть получен при вычислении нормированного скалярного произведения коэффициентов

$$\eta = \frac{\operatorname{Re} \left(\sum_{m=0}^{M-1} a_m \cdot a_m^{*(\vartheta)} \right)}{\|a\| \cdot \|a^{(\vartheta)}\|}. \quad (8)$$

При неизвестном угле поворота необходимо предварительно найти его оценку в соответствии с (6), затем выполнить обратный поворот коэффициентов и после этого найти величину меры схожести в соответствии с (7). Аналогичный результат может быть получен при вычислении модуля скалярного произведения коэффициентов

$$\eta = \left| \sum_{m=0}^{M-1} a_m \cdot a_m^{*(\vartheta)} \right|. \quad (9)$$

Если совместно неизвестны угол поворота и масштаб, то в качестве меры схожести необходимо использовать модуль нормированного скалярного произведения коэффициентов:

$$\eta = \frac{\left| \sum_{m=0}^{M-1} a_m \cdot a_m^{*(\vartheta)} \right|}{\|a\| \cdot \|a^{(\vartheta)}\|}.$$

Возможность формирования отсчетов сигнала по коэффициентам аппроксимирующей функции позволяет использовать для решения задачи распознавания ГТО подходы, базирующиеся на формировании меры схожести их контурных описаний. Для этого необходимо вычислить аппроксимированные отсчеты эталонного $\Gamma^{(a)} = \{\gamma^{(a)}(n)\}_{0,k-1}$ и обрабатываемого $\mathbf{N}^{(a)} = \{v^{(a)}(n)\}_{0,k-1}$ объектов:

$$\gamma^{(a)}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m^{(\vartheta)} \left(\frac{\gamma(n)}{|\gamma(n)|} \right)^m, \quad n = 0, 1, \dots, k-1,$$

$$v^{(a)}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} a_m \left(\frac{\gamma(n)}{|\gamma(n)|} \right)^m, \quad n = 0, 1, \dots, k-1.$$

Поскольку в качестве аргумента в приведенных соотношениях используется одно и то же значение $\gamma(n)/|\gamma(n)|$, то в получаемых описаниях отсчеты будут иметь одинаковую нумерацию. Благодаря этому в качестве меры схожести может использоваться нормированное скалярное произведение аппроксимированных отсчетов:

$$\eta = \frac{\sum_{n=0}^{k-1} v^{(a)}(n) (\gamma^{(a)}(n))^*}{\|\mathbf{N}^{(a)}\| \|\Gamma^{(a)}\|}. \quad (10)$$

Эффективность работы предложенных алгоритмов распознавания была проверена путем моделирования. Алгоритм проведения эксперимента состоял в следующем:

1. Генерируется алфавит псевдослучайных эталонов заданного объема и заданной размерности.

2. Выполняется нормировка эталонов.
3. Вычисляются коэффициенты аппроксимирующей функции для всех эталонов.
4. Выполняется зашумление одного из эталонов нормальным Гауссовым шумом при заданном отношении сигнал/шум:

$$\sigma^2 = \frac{\|\Gamma\|^2}{q \cdot k},$$

где q – отношение сигнал/шум.

5. Вычисляются коэффициенты a_m для зашумленного эталона.
6. Выполняется формирование меры схожести между зашумленным и всеми эталонными объектами в соответствии с соотношениями (9) или (10).
7. В качестве результата распознавания принимается эталон с максимальным значением меры схожести.

Опыты в соответствии с приведенным алгоритмом выполняются N раз. При этом подсчитывается количество правильных распознаваний и выполняется оценка вероятности правильного распознавания N_{np} при заданном отношении сигнал/шум:

$$\hat{p} = N_{np} / N.$$

На рис. 2 приведены результаты оценок вероятностей правильного распознавания при обработке изображений на базе предложенных алгоритмов для различных условий. Оценки вероятностей были получены по результатам 250 опытов при каждом значении отношения сигнал/шум. Количество эталонов равно 10.



Рис.2. Графики зависимостей вероятности правильного распознавания по полиномиальным коэффициентам от отношения сигнал/шум при фиксированной степени полинома $M = 5$. Первый график – размерность $k = 50$, второй график – размерность $k = 100$

Из полученных графиков видно, что вероятность правильного распознавания $P_{np} = 0,9$ достигается при отношении сигнал/шум $q = 90 \div 100$ и при указанных условиях практически не зависит от размерности объекта. Дополнительные исследования показали, что при небольших размерностях объектов с ростом k вероятность правильного распознавания повышается.

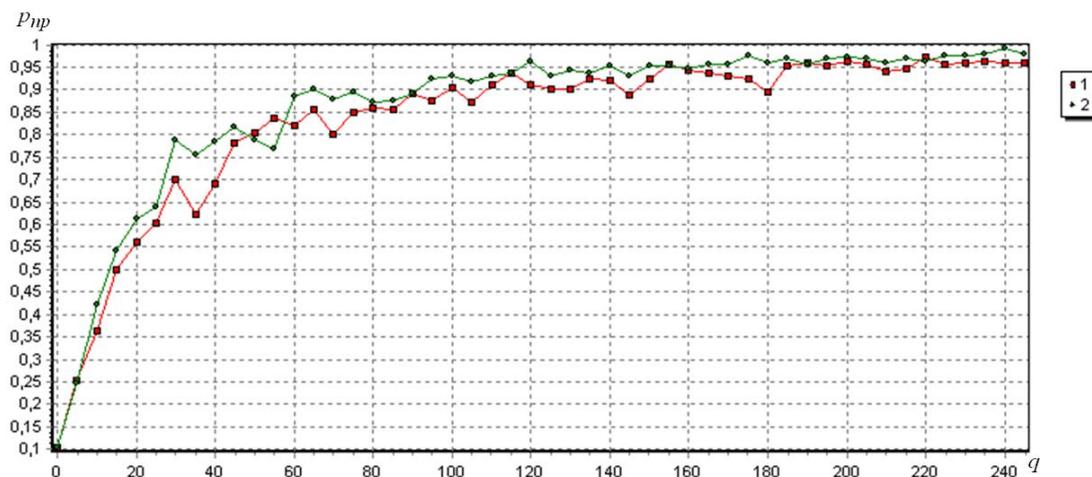


Рис.3. Графики зависимостей вероятности правильного распознавания по полиномиальным коэффициентам от отношения сигнал/шум при фиксированной размерности объекта $k = 50$. Первый график — $M = 10$, второй график — $M = 5$

Как видно из графиков на рис.3, при фиксированной размерности объекта увеличение степени полинома приводит к снижению вероятности правильного распознавания. Как показали исследования, наилучшие результаты распознавания достигаются при степенях полинома $M = 5 \div 7$.

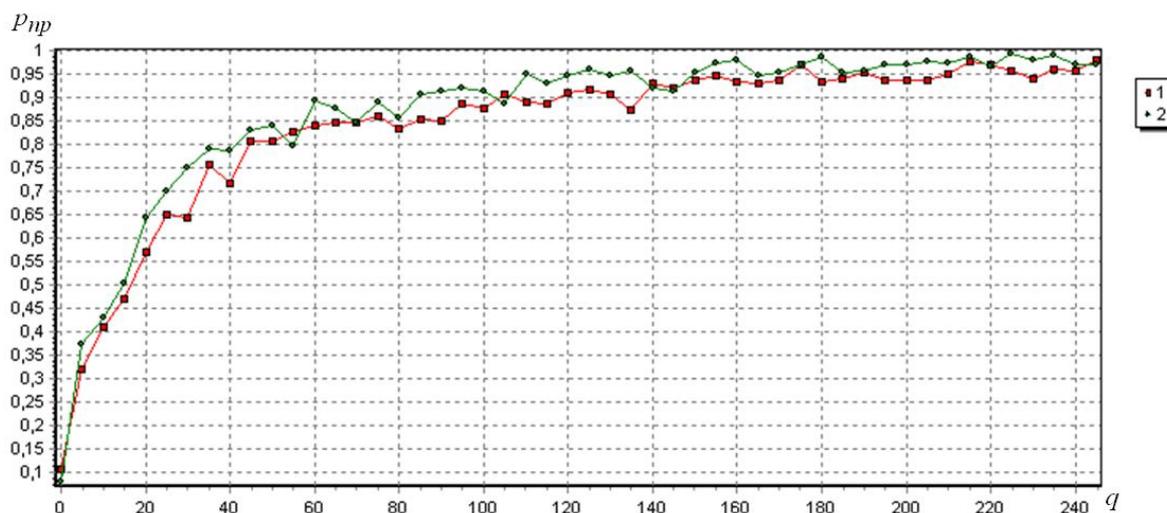


Рис.4. Графики зависимостей вероятности правильного распознавания по полиномиальным коэффициентам от отношения сигнал/шум при фиксированной размерности объекта $k = 50$ в условиях возникновения ошибок обнаружения. Первый график — $M = 5$, второй график — $M = 10$. Количество ложных отметок — 5, количество необнаруженных отметок — 5

Анализ результатов экспериментов с моделированием возникновения ошибок обнаружения отметок показал, что при этом происходит незначительное ухудшение характеристик правильного распознавания. Например, для объекта размерностью $k = 50$ при появлении 5 ложных и пропуск 5 сигнальных отметок требуемое для достижения вероятности $p_{пр} = 0,9$ значение отношения сигнал/шум увеличивается со значения $q = 90 \div 100$ до величины $q = 120 \div 130$.

Заключение. Решена задача обработки изображений групповых точечных объектов с неупорядоченными отметками на базе подходов, связанных с формированием их вторичного описания в виде полиномиальных функций комплексного переменного, аппрок-

симирующих отсчеты этих объектов. Показана независимость вида формируемого описания от нумерации отметок в сцене. Найдена взаимосвязь между параметрами линейных преобразований групповых точечных объектов и коэффициентами аппроксимирующих полиномов и показана возможность их оценки по полученным коэффициентам.

Решена задача распознавания изображений ГТО с неупорядоченными отметками путем формирования меры схожести объектов в виде скалярного произведения коэффициентов аппроксимирующих полиномов. Построены характеристики распознавания изображений неупорядоченных ГТО. Показано, что помехоустойчивость предложенных алгоритмов соизмерима с подходами к обработке на базе амплитудно-фазовых моделей [6, 7], но их трудоемкость существенно ниже, т.к. при этом не требуется выполнять процедуру свертки изображений для получения предварительной оценки угла поворота и формирования вторичного описания.

Список литературы

1. *Witman, R. L.* Automating clustering of synthetic aperture radar (SAR) target / Witman R. L., O. Rear R. L. – Jn: IEEE NAESON, 1980. P. 717–724
2. *Elachi, C.* Spaceborn Syntethic-Aperture Imaging Radars: Applications, Techniques and Technology / C. Elachi, T. Bicknell, R. L. Jardon, W. Chialin. – Proceedings IEEE, vol. 70. 1982. № 10 Oct.
3. *Анисимов, Б. В.* Распознавание и цифровая обработка изображений / Б. В. Анисимов, В. Ф. Курганов, В. К. Злобин. – М.: Высшая школа, 1983.
4. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передреев, А. А. Роженцов, Р. Г. Хафизов, И. Л. Егошина, А. Н. Леухин; Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Физматлит, 2002.
5. Комплекснозначные и гиперкомплексные системы в задачах обработки многомерных сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. А. Роженцов, Р. Г. Хафизов, А. Н. Леухин, И. Л. Егошина; Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Физматлит, 2004.
6. *Роженцов, А. А.* Распознавание плоских изображений групповых точечных объектов в условиях действия ошибок обнаружения / А. А. Роженцов, А. О. Евдокимов, А. В. Григорьев // Известия вузов. Приборостроение. – 2006. – №4. – С.59–64.
7. *Фурман, Я. А.* Распознавание групповых точечных объектов с неупорядоченными отметками / Я. А. Фурман, А. А. Роженцов, А. О. Евдокимов // Автометрия. – 2005. – №1. – С.19–28.

Статья поступила в редакцию 07.08.08

A. A. Rozhentsov, S. N. Krylov, A. A. Bayev

RECOGNITION OF GROUP POINT OBJECTS FLAT IMAGES WITH DISORDERED MARKS

The problem of processing of images of group point objects flat images with disordered marks is solved on the basis of methods of the theory of complex variable function by formation of the secondary description of images of group point objects as polynomial functions. The influence of parameters of linear transformations on a kind of the secondary description is determined and approaches to their estimation are offered. The problem of group point object images recognition is solved and estimations of efficiency of the algorithms suggested are received.

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

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

КРЫЛОВ Сергей Николаевич – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов.

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.316.8

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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ НА ВЫХОДНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РЕЗИСТИВНЫХ СБОРОК

Рассмотрены вопросы влияния различных видов подгонки величины сопротивления и последующих технологических операций на стабильность сопротивления толсто пленочных резистивных блоков типа Б19М. Исследовано в условиях реального производства влияние таких видов подгонки, как лазерная, электроискровая в сторону увеличения и уменьшения сопротивления. Определены коэффициенты корреляции между видом подгонки, режимами подгонки и дрейфом сопротивления.

Введение. Резистивные элементы, составляющие значительную долю в составе большинства электронных средств и ответственные за точность преобразования сигналов, могут выпускаться как в дискретном, так и в интегральном исполнении. В последнем случае они могут быть представлены набором тонко- или толсто пленочных резисторов или же как пленочные элементы на подложке микросборки. Требования, предъявляемые к точности номинала резисторов (в ряде случаев до 1 % и выше), значительно превышают возможности используемой технологии. Это требует введения в технологический процесс изготовления таких изделий корректирующих операций, именуемых «подгонка резисторов». Подгонка резисторов может осуществляться с использованием различных методов, чаще всего лазерного, обеспечивающего высокую производительность и точность процесса [1]. Но так как данный метод позволяет только увеличивать величину сопротивления, то расчетная величина сопротивления должна корректироваться на величину технологического разброса. Например, для толсто пленочной технологии при точности воспроизведения номиналов резисторов $\pm 20\%$ расчетная величина сопротивления должна быть сдвинута на $- 40\%$. Это приводит к значительному травмированию резисторов при лазерной подгонке.

Электроискровая подгонка (ЭИП) обеспечивает двунаправленное изменение величины сопротивления толсто пленочных резисторов и позволяет выработать совершенно иные подходы к организации технологического процесса изготовления много-резистивных изделий [2, 3].

Одним из факторов, влияющих на стабильность величины сопротивления резистивных элементов, является наличие высокотемпературных операций при их изготовлении, таких как припойка выводов, их облуживание.

Целью работы является определение влияния различных видов подгонки (лазерной в "+", электроискровой в "+" и "-") и высокотемпературных операций (облудка, пайка решетки, покрытие эмалью и ее сушка, лужение выводов) на стабильность сопротивления толсто пленочных резисторов и установление корреляционных связей между видами и режимами обработки и величиной дрейфа, а также анализ полученных результатов и предоставление рекомендаций по совершенствованию технологического процесса изготовления.

Решаемые задачи.

Для достижения обозначенной цели в работе решались следующие задачи:

1. Снятие численных величин интересующих параметров с резистивных блоков.
2. Определение степени влияния параметров различных видов подгонки на характеристики резисторов.
3. Определение степени влияния промежуточных технологических операций на характеристики резисторов.

Экспериментальные исследования.

Для оценки степени влияния типов подгонки и высокотемпературных операций на важнейшие параметры пленочных резисторов были проведены экспериментальные исследования на резистивных блоках в количестве 41 штуки. Группой резисторов для исследования послужили наборы блоков Б19М, располагающиеся на подложке с двух сторон в определенном порядке (по четыре с каждой стороны). Таким образом, в эксперименте участвовали 328 резисторов. На каждой подложке также располагалось по одному контрольному резистору, не подвергнувшемуся подгонке. Подгонка осуществлялась следующим образом.

Подложки 1-8 – подгонка осуществлялась в сторону уменьшения сопротивления на 6,8 кОм; метод – ЭИП.

Подложки 9-14 – подгонка в сторону увеличения или уменьшения сопротивления на 10 кОм, метод – ЭИП.

Подложки 15-23 – подгонка лазером в сторону увеличения сопротивления на 5,6 кОм.

Подложки 24-34 – подгонка в сторону увеличения сопротивления на 6,8 кОм, метод – ЭИП.

Подложки 35-40 – подгонка лазером в сторону увеличения сопротивления на 6,8 кОм.

Конструкция блока Б19М и размещение резисторов на подложке представлены на рис. 1.

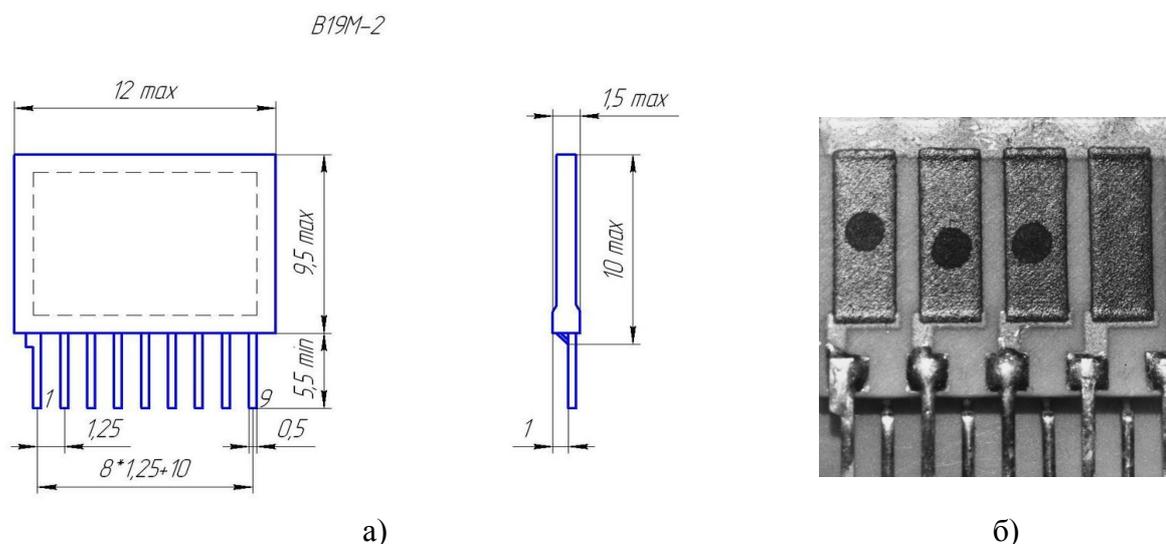


Рис. 1. Конструкция резистивного блока (а) и расположение резисторов на подложке (б)

Последовательность операций в соответствии с технологическим процессом изготовления блоков следующая:

- | | |
|---|--|
| 1. Очистка подложек | 19. Сушка |
| 2. Металлизация торцев | 20. Проверка качества припайки решетки |
| 3. Вжигание пасты | 21. Контроль ОТК |
| 4. Нанесение пасты СРПП-1А | 22. Сушка |
| 5. Вжигание пасты | 23. Покрытие эмалью ЭП-9 |
| 6. Нанесение резистивной пасты | 24. Сушка эмали (145 °С, 3 часа) |
| 7. Вжигание пасты | 25. Обрезка решетки |
| 8. Нанесение защитной пасты | 26. Облуживание выводов (230-245 °С, 2-3 с) |
| 9. Вжигание пасты | 27. Промывка |
| 10. Контроль ОТК | 28. Сушка |
| 11. Проверка электрических параметров | 29. Проверка номинала |
| 12. Контроль ОТК | 30. Маркировка |
| 13. Подгонка резистивных элементов | 31. Сушка |
| 14. Лужение плат (245-265 °С, 3-4 с) | 32. Контроль сопротивления изоляции между выводами резистора |
| 15. Отмывка от флюса | 33. Разбраковка по внешнему виду |
| 16. Сушка | 34. Выходной контроль ОТК |
| 17. Припайка решетки (420-440 °С) | |
| 18. Отмывка от флюса | |

В данной последовательности операций полужирным курсивом выделены операции, при которых температурные воздействия составляют 100 °С и более. Исходя из результатов эксперимента был вычислен ряд показателей индивидуально для каждого резистора:

а) точность подгонки: $\delta = \frac{R_n - R_0}{R_0} \cdot 100\%$;

б) коэффициент подгонки: $K_n = R_n / R_x$;

в) скорость подгонки: $V = \frac{R_n - R_x}{R_x \cdot t} \cdot 100\%$;

г) дрейф сопротивления по времени: $\sigma_t = \frac{R_t - R_n}{R_n} \cdot 100\%$;

д) дрейф сопротивления по операции: $\sigma_n = \frac{R_n - R_{on}}{R_n} \cdot 100\%$;

е) коэффициенты парной корреляции $r = \frac{\frac{1}{N} \sum [R_i \cdot R_i] - [\bar{R}_i - \bar{R}_i]}{\sqrt{D_i \cdot D_i}}$

В данных выражениях приняты следующие обозначения:

R_n – сопротивление резистора после подгонки;

R_0 – сопротивление эталонного резистора;

R_x – сопротивление резистора до подгонки;

t – время подгонки;

R_t – сопротивление резистора через определенный интервал времени (1; 24; 1000 и 5000 часов);

R_{on} – сопротивление резистора после определенной операции.

Фрагменты экспериментальных данных и расчетов коэффициентов корреляции представлены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Выборочные данные по экспериментальным исследованиям

| | | | | | | | Режимы подгонки | | | Сопротивление R, кОм через время t, часов | | | | Сопротивление после операции, кОм | | | | |
|-------|-----|--------------|---------|---------|------|---------|-----------------|--------|--------|--|--------|--------|--------|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------|-----------------|
| № бл. | № R | Вид подгонки | Rx(кОм) | Ro(кОм) | T, с | Rn(кОм) | U(кВ) | F(кГц) | τ, мкс | R1 | R24 | R1000 | R5000 | До облудки | После облудки | Пайка решетки | Сушка эмали | Дужение выводов |
| 1 | 8 | 4 | 7,176 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 7,175 | 7,176 | 7,176 | 7,716 | 7,175 | 7,171 | 0,000 | 7,154 | 7,174 |
| 1 | 4 | 1 | 6,980 | 6,800 | 0,2 | 6,779 | 3,0 | 0,750 | 200,0 | 6,775 | 6,769 | 6,754 | 6,773 | 6,767 | 6,763 | 0,000 | 6,740 | 6,753 |
| 1 | 2 | 1 | 7,195 | 6,800 | 0,5 | 6,807 | 3,0 | 0,750 | 200,0 | 6,778 | 6,795 | 6,771 | 6,771 | 6,792 | 6,781 | 0,000 | 6,758 | 6,770 |
| 1 | 1 | 1 | 7,233 | 6,800 | 0,8 | 6,797 | 3,0 | 0,750 | 200,0 | 6,790 | 6,785 | 6,762 | 6,761 | 6,782 | 6,779 | 0,000 | 6,752 | 6,761 |
| 1 | 5 | 1 | 7,152 | 6,800 | 0,5 | 6,797 | 3,0 | 0,750 | 200,0 | 6,792 | 6,786 | 6,765 | 6,765 | 6,783 | 6,780 | 0,000 | 6,750 | 6,764 |
| 1 | 6 | 1 | 7,333 | 6,800 | 1,4 | 6,786 | 3,0 | 0,750 | 200,0 | 6,778 | 6,711 | 6,743 | 6,743 | 6,767 | 6,764 | 0,000 | 6,727 | 6,741 |
| 1 | 3 | 1 | 7,168 | 6,800 | 0,4 | 6,802 | 3,0 | 0,750 | 200,0 | 6,795 | 6,789 | 6,765 | 6,764 | 6,785 | 6,781 | 0,000 | 6,751 | 6,764 |
| 1 | 7 | 1 | 7,193 | 6,800 | 0,6 | 6,803 | 3,0 | 0,750 | 200,0 | 6,796 | 6,791 | 6,768 | 6,776 | 6,788 | 6,784 | 0,000 | 6,753 | 6,767 |
| 10 | 8 | 4 | 19,925 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 19,780 | 19,745 | 19,744 | 19,782 | 19,782 | 0,000 | 19,556 | 19,735 |
| 10 | 5 | 1 | 19,558 | 10,000 | 3,7 | 9,989 | 4,0 | 0,750 | 200,0 | 0,000 | 9,802 | 9,543 | 9,548 | 9,777 | 9,777 | 0,000 | 9,510 | 9,546 |
| 10 | 6 | 1 | 19,445 | 10,000 | 6,2 | 9,971 | 4,0 | 0,750 | 200,0 | 0,000 | 9,825 | 9,583 | 9,583 | 9,801 | 9,801 | 0,000 | 9,541 | 9,581 |
| 10 | 7 | 1 | 18,882 | 10,000 | 4,7 | 9,987 | 4,0 | 0,750 | 200,0 | 0,000 | 9,873 | 9,660 | 9,660 | 9,854 | 9,854 | 0,000 | 9,613 | 9,657 |
| 10 | 1 | 2 | 7,185 | 10,000 | 88,8 | 10,087 | 4,0 | 8,330 | 80,0 | 0,000 | 10,596 | 10,802 | 10,797 | 10,705 | 10,705 | 0,000 | 10,806 | 10,795 |
| 10 | 2 | 2 | 6,959 | 10,000 | 25,5 | 10,057 | 4,0 | 8,330 | 80,0 | 0,000 | 10,461 | 10,634 | 10,630 | 10,519 | 10,519 | 0,000 | 10,620 | 10,628 |
| 10 | 3 | 2 | 6,917 | 10,000 | 34,1 | 10,037 | 4,0 | 8,330 | 80,0 | 0,000 | 10,452 | 10,632 | 10,629 | 10,524 | 10,524 | 0,000 | 10,621 | 10,628 |
| 10 | 4 | 2 | 6,817 | 10,000 | 29,9 | 10,029 | 4,0 | 8,330 | 80,0 | 0,000 | 10,434 | 10,635 | 10,630 | 10,513 | 10,513 | 0,000 | 10,599 | 10,631 |
| 16 | 1 | 4 | 5,564 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 5,593 | 5,554 | 5,554 | 5,553 | 5,552 | 0,000 | 5,402 | 5,554 |
| 16 | 5 | 1 | 5,652 | 5,460 | 0,7 | 5,461 | 4,0 | 0,750 | 200,0 | 0,000 | 5,455 | 5,445 | 5,445 | 5,454 | 5,451 | 0,000 | 5,437 | 5,445 |
| 16 | 6 | 1 | 5,629 | 5,460 | 1,5 | 5,459 | 4,0 | 0,750 | 200,0 | 0,000 | 5,453 | 5,444 | 5,443 | 5,453 | 5,449 | 0,000 | 5,436 | 5,443 |
| 16 | 7 | 1 | 5,621 | 5,460 | 1,8 | 5,461 | 4,0 | 0,750 | 200,0 | 0,000 | 5,454 | 5,444 | 5,444 | 5,454 | 5,450 | 0,000 | 5,414 | 5,443 |
| 16 | 8 | 1 | 5,726 | 5,600 | 2,3 | 5,599 | 4,0 | 0,750 | 200,0 | 0,000 | 5,595 | 5,625 | 5,587 | 5,599 | 5,591 | 0,000 | 5,579 | 5,587 |
| 16 | 2 | 3 | 5,504 | 5,600 | 0,0 | 5,620 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 5,621 | 5,623 | 5,622 | 5,621 | 5,619 | 0,000 | 5,605 | 5,623 |
| 16 | 3 | 3 | 5,432 | 5,600 | 0,0 | 5,623 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 5,621 | 5,624 | 5,624 | 5,621 | 5,620 | 0,000 | 5,604 | 5,624 |
| 16 | 4 | 3 | 5,328 | 5,600 | 0,0 | 5,624 | 0,0 | 0,000 | 0,0 | 0,000 | 5,623 | 5,589 | 5,624 | 5,623 | 5,622 | 0,000 | 5,616 | 5,625 |

Таблица 2

Коэффициенты корреляции между исследуемыми входными параметрами и выходными показателями

| | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| <i>Подл. 1-8 (-' на 6,8кОм)</i> |
| <i>Кп-V</i> | <i>Кп-δ</i> | <i>Кп-δt1</i> | <i>Кп-δt24</i> | <i>Кп-δt1000</i> | <i>Кп-δt5000</i> | <i>Кп-дон</i> | <i>V-δ</i> | <i>V-δt1000</i> | <i>V-δt5000</i> | <i>V-дон</i> |
| -0,227 | -0,104 | 0,115 | 0,026 | 0,241 | 0,222 | 0,704 | 0,576 | -0,072 | -0,045 | -0,084 |
| <i>Подл. 9-14 (+' на 10кОм)</i> |
| <i>Кп-V</i> | <i>Кп-δ</i> | <i>Кп-δt1</i> | <i>Кп-δt24</i> | <i>Кп-δt1000</i> | <i>Кп-δt5000</i> | <i>Кп-дон</i> | <i>V-δ</i> | <i>V-δt1000</i> | <i>V-δt5000</i> | <i>V-дон</i> |
| 0,413 | 0,179 | 0,067 | 0,373 | 0,437 | 0,136 | -0,430 | 0,138 | 0,798 | -0,053 | -0,765 |
| <i>Подл. 15-23 (лазер '+' на 5,6 кОм)</i> | <i>Подл. 15-23 (лазер '+' на 5,6 кОм)</i> |
| <i>Кп-V</i> | <i>Кп-δ</i> | <i>Кп-δt1</i> | <i>Кп-δt24</i> | <i>Кп-δt1000</i> | <i>Кп-δt5000</i> | <i>Кп-дон</i> | <i>V-δ</i> | <i>V-δt1000</i> | <i>V-δt5000</i> | <i>V-дон</i> |
| 0,659 | 0,247 | 0,890 | 0,023 | 0,645 | 0,958 | -0,086 | 0,060 | 0,523 | 0,730 | -0,783 |
| <i>Подл. 24-34 (ЭИП '+' на 6,8 кОм)</i> |
| <i>Кп-V</i> | <i>Кп-δ</i> | <i>Кп-δt1</i> | <i>Кп-δt24</i> | <i>Кп-δt1000</i> | <i>Кп-δt5000</i> | <i>Кп-дон</i> | <i>V-δ</i> | <i>V-δt1000</i> | <i>V-δt5000</i> | <i>V-дон</i> |
| 0,255 | 0,369 | -0,220 | -0,135 | -0,066 | 0,379 | -0,554 | -0,207 | -0,059 | 0,070 | 0,233 |
| <i>Подл. 35-40 (лазер '+' на 6,8 кОм)</i> | <i>Подл. 35-40 (лазер '+' на 6,8 кОм)</i> |
| <i>Кп-V</i> | <i>Кп-δ</i> | <i>Кп-δt1</i> | <i>Кп-δt24</i> | <i>Кп-δt1000</i> | <i>Кп-δt5000</i> | <i>Кп-дон</i> | <i>V-δ</i> | <i>V-δt1000</i> | <i>V-δt5000</i> | <i>V-дон</i> |
| 0,783 | 0,378 | -0,140 | 0,785 | -0,021 | -0,537 | 0,169 | 0,687 | 0,678 | -0,791 | -0,603 |

В табл. 1 обозначено:

- вид подгонки:

- 1 – электроискровая подгонка в сторону уменьшения величины сопротивления;
- 2 – электроискровая подгонка в сторону увеличения величины сопротивления;
- 3 – лазерная подгонка;
- 4 – контрольные резисторы, не подвергавшиеся подгонке.

T – время подгонки, с;

U – напряжение искрового разряда, кВ;

F – частота следования разрядных импульсов, кГц;

τ – длительность разрядных импульсов, мкс.

Для реализации экспериментальных исследований были использованы установка электроискровой подгонки резисторов «Искра-5М» [4], цифровой омметр Ц-34, магазин эталонных сопротивлений Р-63, электронный секундомер, а для периодических замеров величины отклонения сопротивления от исходного – электронный коммутатор-компаратор [5].

Анализ полученных данных:

а) во всех пяти группах, представленных в табл. 2, наблюдается ярко выраженная зависимость между численными значениями скорости подгонки и дрейфом сопротивления (коэффициент корреляции $r \approx 0,7-0,8$);

б) для первой группы резисторов наблюдается четкая взаимосвязь между дрейфом сопротивления после операции пайки и коэффициентом подгонки ($r \approx 0,704$); все остальные параметры с дрейфом сопротивления практически не коррелируют.

в) для групп 2–5 выявлена корреляция между значениями скорости подгонки и дрейфа сопротивления после операции пайки;

Вывод. Результатом исследований явилась возможность утверждать с высокой долей вероятности, что высокотемпературной операцией, дестабилизирующей параметры резистора после подгонки, является операция пайки, вызывающая существенный дрейф сопротивления. Кроме того, обнаружена взаимосвязь между скоростью подгонки и дрейфом сопротивления.

Список литературы

1. Зайцев, Ю. В. Резисторные и конденсаторные микросборки / Ю. В. Зайцев, А. Т. Самсонов, Н. М. Решетников. – М.: Радио и связь, 1991. – 200 с.
2. Леухин, В. Н. Техника и технология электроискровой обработки элементов и узлов РЭА / В. Н. Леухин // Тр. науч. конф. по итогам н.-и. работ Мар. техн. ун-та. – Йошкар-Ола: Мар. гос. техн. ун-т., 2001. – С. 97–109. Деп. в ВИНТИ 21.03.02 № 515-В 2002.
3. Леухин, В. Н. Основные закономерности процесса электроискровой подгонки резисторов / В. Н. Леухин, А. М. Сухов // Тр. науч. конф. по итогам н.-и. работ Мар. техн. ун-та., Йошкар-Ола, 25 марта 1999 / Йошкар-Ола: Мар. гос. техн. ун-т., 1999. – С. 15–26. Деп. в ВИНТИ 28.10.99 № 3205В99.
4. Леухин, В. Н. Установка электроискровой подгонки резисторов «Искра-5М» / В. Н. Леухин, А. М. Сухов. Инф. листок № 19-00 Марийского ЦНТИ. – Йошкар-Ола, 2000.
5. Электронный коммутатор-компаратор. Информационный листок № 60-99 Марийского ЦНТИ / Сост. В. Н. Леухин, Е. В. Головин. – Йошкар-Ола, 1999.

Статья поступила в редакцию 09.09.08

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

**ANALYSIS OF INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS
ON THE OUTPUT QUALITY INDEXES OF RESISTIVE ASSEMBLAGES**

The problems of influence of various sorts of adjustment of the value of resistance and the subsequent technological operations on the stability of resistance of thick-film resistive blocks Б19М type are considered. The influence of such sorts of adjustment as laser, electrospark towards resistance increase and decrease is studied in real production environment. Coefficients of correlation between adjustment kind, modes of adjustment and resistance drift are defined.

ЛЕУХИН Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и проектирования радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – электроискровая подгонка резисторов; техническая диагностика силовых трансформаторов методами высокочастотного зондирования; технология монтажа на поверхность. Автор 57 научных публикаций.

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

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

УДК 621.316.8

А. А. Нагаев, В. Н. Леухин

ВЛИЯНИЕ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАСКИ НА КОРРЕКТИРОВКУ ВЕЛИЧИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРОВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОИСКРОВОЙ ПОДГОНКИ

Рассмотрено применение диэлектрической маски при электроискровой подгонке резистивных компонентов гибридных интегральных микросхем. Приведены результаты влияния диаметров отверстий в маске на выходные параметры процесса подгонки. Рассмотрены возможные варианты процессов изменения пленочного резистивного элемента.

Введение. Стремление к уменьшению размеров элементов стало неотъемлемой частью радиоэлектронной промышленности. Резисторы не стали исключением. Существуют различные типы резисторов, но основную массу миниатюрных резисторов составляют пленочные резисторы. Однако точность воспроизведения величины сопротивления тонкопленочных резисторов не лучше $\pm 5\%$, толстопленочных – $\pm 20\text{--}30\%$, в то время как требуемый допуск может составлять вплоть до $\pm 0,01\%$. В связи с этим приходится прибегать к корректировке величины сопротивления с помощью различных методов. Одним из них является метод электроискровой подгонки (ЭИП).

Электроискровая подгонка резисторов основана на воздействии электроискрового разряда, возникающего между разрядным электродом и резистивной пленкой. При этом основными параметрами, определяющими характер разряда и его энергетические характеристики, являются частота следования импульсов (выбираемая обычно в диапазоне от десятков герц до десятков килогерц) и амплитуда импульсов, имеющая значение порядка нескольких киловольт. Отличительными особенностями метода является возможность подгонки резисторов без разрушения резистивного слоя, что может найти применение при корректировке величины сопротивления переменных и подстроечных толстопленочных резисторов [1], возможность подгонки в сторону уменьшения сопротивления [2 – 4]; минимизация воздействия на подложку, что важно при подгонке резисторов на подложках из бериллиевой керамики [5].

Процесс электроискровой подгонки характеризуется большим набором выходных показателей и входных параметров. Наиболее важными показателями процесса подгонки являются:

1) скорость подгонки характеризует процентное приращение величины сопротивления в единицу времени

$$\bar{V} = \frac{R_n - R_x}{R_x t} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где R_n – величина сопротивления после подгонки;

R_x – величина исходного сопротивления;

t – время подгонки;

2) точность подгонки δ характеризует величину отклонения сопротивления подогнанного резистора от номинального значения R_0

$$\delta = \frac{R_n - R_0}{R_0} \cdot 100\%, \quad (2)$$

где R_n – величина сопротивления после подгонки; R_0 – величина исходного сопротивления.

При увеличении скорости подгонки снижается ее точность и наоборот.

В качестве наиболее важных входных параметров электроискрового разряда, оказывающих существенное влияние на скорость и точность подгонки, выделяют амплитуду и длительность разрядных импульсов, частоту их следования, длительность пачки импульсов, величину разрядного тока.

В плане микроминиатюризации широкое применение нашли гибридные интегральные микросхемы (ГИМС), в их состав помимо навесных элементов входят пассивные пленочные компоненты, сформированные на подложке ГИМС. Большую часть из этих пассивных компонентов составляют резисторы.

Компоненты ГИМС, как правило, имеют достаточно плотное расположение на подложке, что затрудняет применение электроискрового метода подгонки, потому что существует вероятность прохода искрового разряда на контактную площадку пленочного резистора или соседний компонент, что может вывести его из пределов допуска. Как вариант устранения этих нежелательных эффектов было рассмотрено применение диэлектрической маски для защиты компонентов ГИМС и локализации области электроискровой эрозии. Однако влияние диэлектрической маски на процесс электроискровой подгонки не рассматривалось.

Цель работы – определить влияние диэлектрической маски на динамику электроискровой подгонки толстопленочных резисторов; аналитически смоделировать процессы, протекающие в период подгонки; проанализировать необходимость применения маски и дальнейшие направления изучения.

Аналитическое моделирование. Сопротивление резистивного элемента определяется величиной электропроводности материала, которая имеет три основных составляющих: металлическую, туннельнобарьерную и прыжковую. Воздействие электрического разряда на резистивный материал изменяет соотношения этих механизмов электропроводности, приводит к ряду структурных преобразований.

Рассмотрим механизмы, протекающие при ЭИП в сторону увеличения сопротивления [1]:

- окисление и нарушение точечных контактов;
- плавление и испарение резистивного материала (при значительной энергии разрядных импульсов).

Применение диэлектрической маски способно локализовать зону разрушения материала и ограничить размеры зоны эрозии резистивного материала, тем самым повысить предсказуемость процесса подгонки.

В работе [6] определена связь между величиной приращения сопротивления и размером зоны разрушений круглой формы:

$$\Delta R = R_x a^2 \frac{l^2 + 4b^2}{l^2 \cdot b^2}, \quad (3)$$

где ΔR – абсолютное изменение величины сопротивления после подгонки;

R_x – величина исходного сопротивления;

l, b – длина и ширина резистивной пленки;

a – диаметр зоны разрушений.

Из формулы (3) видно, что изменения сопротивления резистора зависят лишь от размеров зоны разрушения, однако данная формула не учитывает влияния изменения структуры резистора за счет протекания по нему разрядного тока.

Образцы и процедура эксперимента. Для экспериментов использовался комплекс электроискровой подгонки, состоящий из установки ЭИП и компьютера IBM PC. Основные характеристики установки:

| | |
|--|----------------|
| Диапазон частот импульсов: | 20 – 40 000 Гц |
| Диапазон длительности импульсов: | 5 – 500 мкс |
| Амплитуда импульсов: | 1 – 15 кВ |
| Количество импульсов в пачке: | 1 – 65 0000 |
| Точность измерения сопротивления, не хуже: | 0,1% |

Фиксация результатов (передача в компьютер) производится после каждой пачки импульсов. Данные о динамике изменения сопротивления в ходе подгонки и параметры каждой пачки импульсов сохраняются в текстовых файлах. Дальнейшая обработка результатов производилась с помощью программ из пакета Microsoft Office: Excel и Word.

Образцами для эксперимента служили толстоплёночные резисторы на основе RuO_2 . Для эксперимента использована подложка резисторной сборки с номинальными сопротивлением резисторов 15 кОм.

Для эксперимента применялась маска из слюдяной пластинки толщиной 0,5 мм с отверстиями различных диаметров (см. рис. 1).

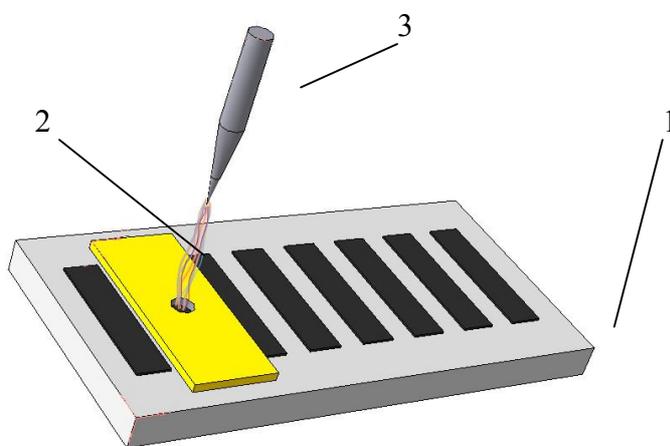


Рис. 1. Размещение маски на подложке: 1 – подложка; 2 – диэлектрическая маска; 3 – разрядный электрод. Контактные площадки резисторов не показаны

Параметры подгонки: амплитуда – 7 кВ; частота – 10000 Гц; длительность – 50 мкс; $R_{нач}$ – 15кОм; количество импульсов в пачке – 1000. Подгонка велась в сторону увеличения сопротивления в режиме сканирования.

Интерпретация результатов и их анализ. Зависимость приращения сопротивления от количества пачек импульсов приведена на рис. 2.

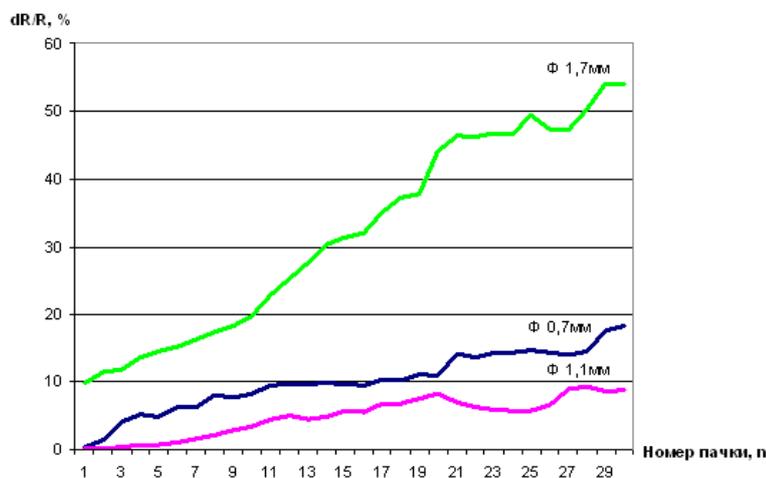


Рис. 2. Динамика изменения сопротивления при подгонке с маской

Из графика (рис. 2) видно, что скорость подгонки зависит от диаметра отверстия в маске. Результаты зависимости средней скорости подгонки от диаметра отверстия в маске приведены в таблице.

Средняя скорость подгонки за цикл при различных диаметрах отверстий в диэлектрической маске

| | | | |
|--------------------------------------|------|------|------|
| Диаметр отверстия, мм | 0,7 | 1,1 | 1,7 |
| Средняя скорость подгонки за цикл, % | 0,63 | 0,30 | 1,87 |

Подгонку с диаметром отверстия 1,7 мм можно считать близкой к подгонке без маски. Применение маски с отверстием меньшего диаметра ограничивает диаметр зоны эрозии резистивной пленки, тем самым уменьшая энергетическое воздействие электроискрового разряда на резистивную пленку.

Согласно формуле (2), ограничение диаметра зоны эрозии должно обеспечить постоянство величины абсолютного приращения сопротивления, независимо от энергии разряда и количества циклов подгонки. На практике же имеем непрерывное увеличение сопротивления в ходе подгонки, причиной этого является зазор между диэлектрической маской и резистивной пленкой, который обеспечивает прохождение электроискрового разряда, кроме того, возможен разряд по поверхности диэлектрика, соприкасающейся с поверхностью резистора. Кроме того, структура пленки претерпевает изменения в областях протекания электрического тока.

В целом в процессе подгонки нет необходимости подгонки резистора более чем на 20% от первоначального значения, таким образом, наибольший интерес представляет начальная область графика (рис. 2). Видно, что после первой пачки импульсов при применении маски с диаметром отверстия 1,7 мм сопротивление резистора увеличилось на 9,8%, таким образом мы могли проскочить точку желаемого значения сопротивления, в то время как с меньшими диаметрами отверстий подгонка происходила бы более плавно. Однако следует заметить, что плавность подгонки легко можно регулировать, изменяя параметры разряда, и, как следствие, энергию воздействия на резистивную пленку.

Выводы. Применение диэлектрической маски при электроискровой подгонке толсто пленочных резисторов вносит изменение скорости подгонки. Уменьшение диаметра отверстия, через которое ведется подгонка, приводит к снижению скорости подгонки и за счет этого к увеличению ее точности. Изменение сопротивления при подгонке с маской обуславливается не только расширением зоны эрозии, но и за счет других процессов изменения структуры резистивной пленки.

В заключение можно сказать, что в области электроискровой подгонки с использованием диэлектрической маски остается много аспектов, требующих изучения.

Список литературы

1. Леухин, В. Н. Электроискровая корректировка сопротивления толсто пленочных переменных резисторов / В. Н. Леухин // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1992. – Вып.3.
2. Леухин, В. Н. Методы подгонки резистивных элементов в сторону уменьшения сопротивления / В. Н. Леухин // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 1992. – Вып.2. – С. 47–51.
3. А.с. 1565282 СССР. Устройство для подгонки толсто пленочных резисторов / В. Н. Леухин, С. А. Журавлев.
4. Леухин, В. Н. Выбор режимов электроискровой подгонки толсто пленочных резисторов / В. Н. Леухин // Техника средств связи. Сер. ТПО. – 1990. – Вып.2. – С.36–45.

5. Леухин, В. Н. Установка подгонки резисторов на подложках из бериллиевой керамики / В. Н. Леухин, М. А. Одинцов // Вторая Всесоюзная научно-техническая конференция «Технология и конструирование ГИС и вопросы их производства». – Ярославль, 1988. – Ч.2. – С.88–89.

6. Шумилин, А. С. Анализ дефектности плоских резистивных слоев интегральных схем / А. С. Шумилин, Д. Г. Михайлов // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ТОПО, 1983. – Вып.1. – С.32–35.

Статья поступила в редакцию 09.09.08

A. A. Nagayev, V. N. Leoukhin

**INFLUENCE OF A DIELECTRIC MASK ON THE CORRECTION
OF RESISTANCE VALUE OF THICK-FILM RESISTORS BY THE METHOD
OF ELECTRIC-SPARK FITTING**

Dielectric mask usage in the method of electric-spark fitting of resistive components of hybrid microcircuits is considered. The results of influence of the hole diameter in a mask on output parameters of a fitting process are given. Possible versions of the processes of changing film resistive elements are considered.

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

ЛЕУХИН Владимир Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры конструирования и проектирования радиоаппаратуры МарГТУ. Область научных интересов – электроискровая подгонка резисторов; техническая диагностика силовых трансформаторов методами высокочастотного зондирования; технология монтажа на поверхность. Автор 57 научных публикаций.

УДК 621.382.049.77-181.2

М. А. Передреева, В. В. Егошин

ПРОБЛЕМА СОГЛАСОВАНИЯ УСАДОЧНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛИЗАЦИОННОГО СЛОЯ И ПОДЛОЖКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКИХ ПЛАТ

Рассмотрен процесс совместного спекания системы «толсто пленочное покрытие – неспеченная керамическая подложка», приведены результаты исследования прогибов дисков после операции спекания в зависимости от нанесенных на керамику различных типов металлизационных паст.

Введение. Растущие потребности рынка микросхем выдвинули проблему повышения качества и объемов выпуска металлокерамических корпусов (МКК) интегральных схем на уровень наиболее актуальных проблем микроэлектронной технологии. Практика показала, что реальной альтернативы МКК электронная промышленность пока не имеет. Можно с уверенностью сказать, что развитие нанотехнологии только расширит возможности технологии тонкой керамики, на основе которой строится технология металлокерамических корпусов. Развитие наноэлектроники станет еще одним фактором, стимулирующим развитие технологии МКК как одного из направлений и наноэлектроники, и нанотехнологии.

В ряде публикаций [1,2] были разработаны основные закономерности процесса спекания системы «толсто пленочная металлизация – спеченная керамическая подложка» и предложены механизмы образования прочной связи соприкасающихся подсистем. Данные закономерности в течение длительного времени удовлетворяли потенциальные возможности существовавшей экспериментальной и теоретической базы технологии изготовления металлокерамических изделий. Однако с появлением изделий, технология которых отличается повышенной разрешающей способностью, к которым относятся и металлокерамические корпуса, и основной отличительной особенностью формирования которых является нанесение толсто пленочных покрытий на неспеченную керамическую подложку с последующим совместным спеканием (технология МКП-2), выявлено, что степень адекватности эмпирических зависимостей, связывающих структурно-фазовое состояние спеченных толсто пленочных покрытий с режимами и условиями их формирования, с параметрами сырьевых материалов, с геометрическими характеристиками самих покрытий, становится явно недостаточной для дальнейшего повышения на ее основе качества изделий и эффективности производства.

Целью работы является исследование причин возникновения дефектов в технологическом процессе изготовления МКК. В последние годы в связи с резким повышением требований к качеству и надежности микросхем, непрерывным повышением плотности упаковки элементов и уменьшением их размеров, а также в связи с увеличением числа топологических слоев все большее внимание специалистов привлекают вопросы рационального выбора конструкции МКК. В связи с этим, безусловно, важным обстоятельством становится учет возможности возникновения напряжения деформированных состояний элементов микросхем.

Решаемые задачи: раскрытие явлений, приводящих к дефектам корпусов, познание механизмов отказов и формирование моделей этих отказов, установление аналитических связей между конструктивными факторами, технологическими условиями, режимами формирования, параметрами сырьевых материалов и параметрами физиче-

ской структуры металлокерамических спаев корпусов, что позволит эффективно управлять технологическим процессом и в конечном итоге гарантировать повышение качества МКК.

С целью выявления основных факторов, влияющих на деформацию МКК, в работе рассмотрен процесс совместного спекания системы «толсто пленочное покрытие – неспеченная керамическая подложка», проведены исследования прогибов дисков после операции спекания в зависимости от нанесенных на керамику типов металлизационных паст.

Техника эксперимента и методика обработки результатов. Установлено [3], что наиболее частой причиной дефектов заготовок МКК являются нарушения электромонтажа, разгерметизация и разрушение корпусных элементов. Причиной дефектов такого вида очень часто являются механические напряжения. Для устранения и предупреждения этих напряжений на этапе проектирования необходим анализ напряженно-деформированного состояния, возникающего вследствие тепловых или механических воздействий.

В коммутационных платах, представляющих собой сложные многослойные системы, состоящие из электропроводящих, диэлектрических и защитных слоев, существенно отличающихся по своим физико-механическими характеристиками, механические напряжения можно условно разделить на две группы. К первой относятся напряжения, вызванные механическими воздействиями в процессе производства, при механических испытаниях и эксплуатации. Основной особенностью этих напряжений является то, что они исчезают после прекращения действия внешней механической нагрузки. Ко второй группе относятся напряжения, возникающие в процессе производства и климатических испытаний. Причинами напряжений этого типа является различие температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов элементов, из которых состоит МКК.

С точки зрения анализа причин производственной дефектности, операция обжига является одной из ключевых при производстве МКК. Правильно проведенная, эта операция может исправить большую часть дефектов предыдущих операций, таких как: подготовка шликера, литья керамической ленты и т.д. В то же время, несоблюдение требований к технологическому процессу при обжиге может дать неисправимый брак на всей партии изделий. Поэтому операции обжига необходимо уделять особое внимание [4].

Одним из видов брака, по которому отбраковывается значительная часть изделий после операции спекания, является брак по прогибу заготовок. Прогиб при обжиге возникает, в частности, из-за разных коэффициентов усадки керамики и вольфрамовой пасты [5].

Прогиб также может произойти по причине различия температур между верхней и нижней плоскостью платы, между различными точками платы и по другим причинам, но именно прогиб, вызванный различием усадочных свойств металлизации и керамической основы подложек, создает наибольшее число проблем в условиях массового производства.

В настоящей работе проведены исследования прогибов дисков после операции спекания, в зависимости от нанесенных на керамику типов металлизационных паст.

Для приготовления металлизационной пасты преимущественно используют две марки порошков вольфрама: высокодисперсный и низкодисперсный в соотношении 1:1. Высокодисперсный порошок характеризуется повышенной дисперсностью ($d_{cp}=1-1,2$ мкм), имеет малую насыпную плотность, большую усадку при спекании. Низкодис-

персный – это «крупный» порошок со средним размером зерна $d_{cp}=2,0-2,3$ мкм (рис. 1). Значение удельной поверхности, равное $2000 \text{ см}^2/\text{г}$, близко к оптимальному. Очевидным требованием к смеси является наименьший объем пустот, поэтому требуется получение порошка смешанного зернового состава, что дает наиболее плотную упаковку и снижает нестабильность усадки.

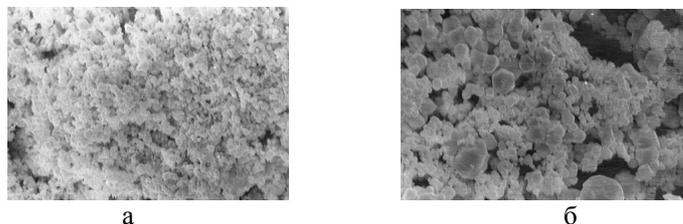


Рис. 1. Внешний вид вольфрамового порошка ПВВ (а) и порошка ВЧДК (б).
Снимок на электронном микроскопе, увеличение $\times 3000$

Основным критерием определения годности выбранного вольфрамового порошка для приготовления металлизационной пасты является его производственное опробование. Процесс производственного опробования дорогостоящ, длителен, трудоемок, хотя и отвечает современным требованиям входного контроля материалов.

Технологическое опробование порошков проводится по схеме, приведенной на рис. 2.



Рис. 2. Схема технологического опробования порошков

Для металлизации образцов использовались два типа паст: вольфрамовая паста для металлизации (МВП) и металлизационная паста с добавлением 30% Al_2O_3 (ВА), применяемая в качестве подслоя для пасты МВП с целью улучшения адгезии пасты МВП с керамикой и для ослабления термоудара во время приварки крышки корпуса. Удельная поверхность твердых составляющих паст и вязкость паст находится в пределах, указанных в ТУ (табл. 1).

Таблица 1

Основные характеристики металлизационных паст

| Тип пасты | Вязкость, П | Удельная поверхность, см ² /г |
|-----------|-------------|--|
| МВП | 1000 | 2000 |
| ВА 30 | 1200 | 4500 |

Были подготовлены три типа образцов «керамика + паста ВА», «керамика + паста МВП» и «керамика + ВА + МВП» (рис 1.). Испытания проводились на дисках со сплошной металлизацией, диаметр дисков составлял 30 мм.

Замеры толщины дисков проводились с двух сторон (рис 3): a1 – замер со стороны металлизации; a2 – замер со стороны керамики.

Если $(a1 - a2) > 0$, то металлизация находится с выпуклой стороны диска.

Если $(a1 - a2) < 0$, то металлизация находится с вогнутой стороны диска.

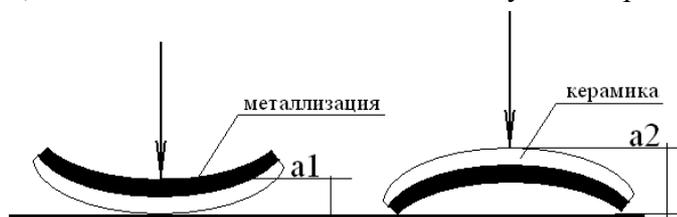


Рис. 3. Проведение замеров величины прогибов

Математическое и аналитическое моделирование. Были проанализированы четыре партии дисков, металлизированных пастой ВА, семь партий дисков, металлизированных пастой МВП, и три партии с металлизацией ВА+МВП. Обжиг различных частей партии производился в разных печах. Размеры выборок, обжигавшихся в разных печах, отличались по объему, поэтому результаты наблюдений отдельных частей партий имеют разную достоверность. Для учета различий размеров выборок при определении оценок основных измеряемых параметров элементов всей совокупности вводились весовые коэффициенты, определяемые как отношение объема отдельной выборки к общему числу наблюдений.

Значения математических величин для дисков, металлизированных пастой МВП, приведены в табл. 2.

Таким образом были проанализированы выборки разных объемов [6]. Для определения усредненных параметров элементов с учетом полной совокупности была задана доверительная вероятность $p=0,9$. Для нее и определялся доверительный интервал, в который среднее значение прогиба попадает с заданной вероятностью.

По заданным значениям размеров выборок для каждой группы определены соответствующие весовые коэффициенты

$$p_i = \frac{n_i}{N}, \quad (1)$$

где n – объем выборки, N – общее количество экспериментов.

В результате подстановки данных табл. 1 получено среднее значение прогиба

$$\bar{X} = \sum \bar{x}_i * p_i = -0,5 - 0,525, \quad (2)$$

По известному значению вероятности $p=f(z)=0,9$ было определено значение нормированной случайной величины $z = 1,28$ [6].

Таблица 2

Значения математических величин для дисков, металлизированных пастой МВП

| Объем выборки | Среднее значение | Дисперсия (σ^2) | Весовой коэффициент p_i |
|---------------|------------------|--------------------------|---------------------------|
| 8 | -0,485 | 0,00189 | 0,053 |
| 8 | -0,69125 | 0,00141 | 0,053 |
| 8 | -0,58125 | 0,00087 | 0,053 |
| 5 | -0,408 | 0,00037 | 0,033 |
| 12 | -0,3775 | 0,00817 | 0,080 |
| 9 | -0,53444 | 0,00158 | 0,060 |
| 9 | -0,35556 | 0,00060 | 0,060 |
| 9 | -0,44 | 0,00585 | 0,060 |
| 10 | -0,445 | 0,00663 | 0,067 |
| 10 | -0,615 | 0,00116 | 0,067 |
| 11 | -0,67909 | 0,00277 | 0,073 |
| 5 | -0,5 | 0,00065 | 0,033 |
| 5 | -0,626 | 0,00113 | 0,033 |
| 5 | -0,538 | 0,00147 | 0,033 |
| 5 | -0,616 | 0,00043 | 0,033 |
| 5 | -0,372 | 0,00167 | 0,033 |
| 6 | -0,74333 | 0,00155 | 0,040 |
| 5 | -0,434 | 0,00323 | 0,033 |
| 5 | -0,458 | 0,00227 | 0,033 |
| 5 | -0,64 | 0,00515 | 0,033 |
| 5 | -0,554 | 0,00043 | 0,033 |

Доверительный интервал определяется по формуле

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^M p_i \sigma_i^2} * z}{\sqrt{N}}, \quad (3)$$

где M – количество выборок, $\varepsilon=0,01$.

В результате математической обработки результатов анализа выборок разных объемов было установлено, что для подложек, металлизированных пастой МВП, вероятность попадания оценки среднего прогиба в интервале $-0,525-0,01 < x < -0,525+0,01$ соответствует значению 0,9.

Аналогичная обработка для дисков, металлизированных пастой ВА, дает следующие результаты.

Таблица 3

Значения математических величин для дисков, металлизированных пастой ВА

| Объем выборки | Среднее значение | Дисперсия (σ^2) | Веса p_i |
|---------------|------------------|--------------------------|------------|
| 5 | 0,242 | 0,00197 | 0,061728 |
| 4 | 0,103 | 0,002158 | 0,049383 |
| 5 | 0,092 | 0,00062 | 0,061728 |
| 5 | 0,106 | 0,00343 | 0,061728 |
| 5 | 0,202 | 0,00027 | 0,061728 |
| 6 | 0,223 | 0,007187 | 0,074074 |
| 6 | 0,305 | 0,01211 | 0,074074 |
| 6 | 0,218 | 0,003337 | 0,074074 |

Окончание табл. 3

| Объем выборки | Среднее значение | Дисперсия (σ^2) | Вес p_i |
|---------------|------------------|--------------------------|-----------|
| 5 | 0,104 | 0,00053 | 0,061728 |
| 4 | 0,168 | 0,002625 | 0,049383 |
| 4 | 0,143 | 0,001892 | 0,049383 |
| 5 | 0,126 | 0,01263 | 0,061728 |
| 6 | 0,107 | 0,004387 | 0,074074 |
| 5 | 0,218 | 0,00192 | 0,061728 |
| 5 | 0,198 | 0,00437 | 0,061728 |
| 5 | 0,234 | 0,00493 | 0,061728 |

Вероятность $p=0,9$.

Из подстановки данных табл. 2 получили среднее выборочное значение

$$\bar{X} = \sum x_i * p_i = 0,178 .$$

По известному значению вероятности $p=f(z)=0,9$ определено значение нормированной случайной величины $z = 1,28$.

Доверительный интервал $\varepsilon=0,01$.

В результате математической обработки выборок разных объемов найдено, что для подложек, металлизированных пастой ВА, вероятность попадания оценки среднего прогиба в интервал $0,178-0,01 < x < 0,178+0,01$ соответствует значению 0,9.

Обработка для дисков, металлизированных пастой ВА+МВП, дает следующие результаты.

Таблица 4

**Значения математических величин
для дисков, металлизированных пастой ВА+МВП**

| Объем выборки | Среднее значение | Дисперсия (σ^2) | Вес p_i |
|---------------|------------------|--------------------------|-----------|
| 4 | -0,76 | 0,004 | 0,074074 |
| 3 | -0,60333 | 0,003 | 0,055556 |
| 5 | -0,634 | 0,002 | 0,092593 |
| 5 | -0,61 | 0,001 | 0,092593 |
| 10 | -0,602 | 0,019 | 0,185185 |
| 11 | -0,64364 | 0,003 | 0,203704 |
| 6 | -0,66333 | 0,002 | 0,111111 |
| 10 | -0,666 | 0,002 | 0,185185 |

Вероятность $p=0,9$.

Из подстановки данных табл. 3 получили среднее выборочное значение

$$\bar{X} = \sum x_i * p_i = -0,645 .$$

По известному значению вероятности $p=f(z)=0,9$ определено значение нормированной случайной величины $z = 1,28$.

Доверительный интервал $\varepsilon=0,01$.

Интерпретация результатов. В результате математической обработки выборок разных объемов найдено, что вероятность попадания оценки среднего прогиба в интервал $0,645-0,01 < x < -0,645+0,01$ соответствует значению 0,9.

Используя результаты вычисления СКО для генеральной совокупности, установлено, что ни одно из найденных значений средних величин не выходит из интервала, соответствующего 3σ , а анализ результатов единичных измерений прогибов показывает,

что из числа единичных наблюдений в генеральной совокупности на основе правила 3 σ к промахам можно отнести не более 10% измерений. Это дает основание считать, что наблюдения, полученные в разных условиях производства (различные печи, разные температурные режимы, незначительные различия в составе смеси), могут не учитываться при формировании генеральной совокупности наблюдений.

Выводы. После обжига образцов были произведены замеры толщины дисков с двух сторон (рис. 3.), средние величины прогибов приведены в табл. 5. Как видно из таблицы, у дисков «керамика + паста ВА» металлизация находится с выпуклой стороны диска, а у дисков «керамика + паста МВП», с вогнутой. Диски «керамика + ВА + МВП» также имели металлизацию с вогнутой стороны, причем величина прогиба оказалась больше, чем у пасты МВП.

Таблица 5

Средние значения прогибов дисков

| Тип образца | Средняя величина прогиба, мкм |
|----------------------|-------------------------------|
| керамика + паста ВА | 0,179 |
| керамика + паста МВП | - 0,528 |
| керамика + ВА + МВП | - 0,658 |

Как видно из приведенных данных, диски, заматаллизованные пастой ВА, прогибаются в другую сторону. Это можно объяснить следующим: при спекании металлизационного слоя с подложкой стеклофаза, содержащаяся в пасте, легко проникает на поверхность металлизации. Образуется структура керамика + металл + стекло (рис. 4). Хотя вольфрам обладает наименьшим температурным коэффициентом линейного расширения среди всех чистых металлов, ТКЛР металла больше, чем ТКЛР стекла, поэтому пластинку выгибает металлизацией наружу.

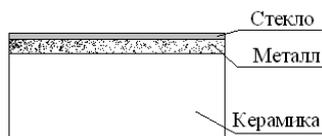


Рис. 4. Структура керамика + металл + стекло

При совместном нанесении паст ВА и МВП стеклофаза не выходит на поверхность металлизационного слоя, поэтому пластина выгибается в ту же сторону, что и при нанесении пасты МВП. Толщина слоя металлизации в этом случае больше, чем при нанесении одного слоя пасты, а, следовательно, больше и стягивающее усилие пленки.

Таким образом, несмотря на то, что спекание образцов, металлизированных пастой ВА, дает хорошие результаты по совместной усадке и величине прогибов дисков, совместное использование паст ВА и МВП не приводит к увеличению согласованности при спекании, а, напротив, ухудшает показатели плоскостности изделий.

Список литературы

1. Решетников, А. М. Капиллярные явления при металлизации высокоглиноземистой керамики и пайке ее высокотемпературными припоями / А. М. Решетников, И. М. Блейвис // Физическая химия поверхностных явлений при высоких температурах. – Киев: Наукова думка, 1971. – С. 178–185.
2. Батыгин, В. Н. Вакуумно-плотная керамика и ее спаи с металлами / В. Н. Батыгин, М. И. Метелкин, А. М. Решетников; Под ред. Девяткина Н. Д. – М.: Энергия, 1973. – 410 с.

3. Кузнецов, О. А. Прочность элементов микроэлектронной аппаратуры / О. А. Кузнецов, А. И. Погалов, В. С. Сергеев – М.: Радио и связь, 1990. – 143 с.
4. Гегузин, Я. Е. Физика спекания / Я. Е. Гегузин; Изд.2, перераб. и доп. – М.: Наука, 1984. – 312 с.
5. Передреева, М. А. Факторы дефектности металлокерамических корпусов микросхем и плат, обусловленные металлизацией / М. А. Передреева, Н. М. Скулкин // Труды международного симпозиума «Надежность и качество 2006». – Пенза, 2007. – С. 89 – 90.
6. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей / Е. С. Вентцель, Л. А. Овчаров. – М.: Наука, 1969. – 368 с.

Статья поступила в редакцию 05.09.08

М. А. Peredreyeva, V. V. Egoshin

THE PROBLEM OF SHRINKING CHARACTERISTICS MATCHING BETWEEN METALLIZED LAYER AND SUBSTRATE WHILE PRODUCING METAL-CERAMIC BOARDS

The process of joint sintering of a «thick-film covering – non-sintered ceramic substrate» system is considered, the research results of disks deflection after sintering depending on the various types of metallising pastes put on ceramics are given.

ПЕРЕДРЕЕВА Мария Анатольевна – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – исследование и разработка экспериментальной и теоретической основы технико-экономических показателей серийного производства металлокерамических корпусов и коммутационных плат. Автор 6 научных работ.

ЕГОШИН Владимир Валерьевич – студент МарГТУ. Область научных интересов – исследование и разработка экспериментальной и теоретической основы технико-экономических показателей серийного производства металлокерамических корпусов и коммутационных плат. Победитель студенческой конференции МарГТУ (декабрь 2007 г.). Автор одной научной статьи.

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

УДК 621.37

К 100-летию со дня рождения Владимира Александровича Котельникова

6 сентября 2008 г. исполнилось 100 лет со дня рождения выдающегося ученого – Владимира Александровича Котельникова. В. А. Котельников по праву может считаться основоположником современной теоретической радиотехники. Весь мир знает «теорему Котельникова», на которой основана цифровая обработка сигналов, и все связанные с этим приложения и теорию потенциальной помехоустойчивости. С появлением работ В.А.Котельникова завершился период эмпирической радиотехники и началось становление радиотехники как строгой научной дисциплины.

Владимир Александрович Котельников родился 6 сентября 1908 года в г. Казани в семье профессора Казанского университета, выдающегося русского механика и математика – Котельникова Александра Петровича.

Закончив в Москве в 1925 г. школу, В. А. Котельников поступил в техникум связи им. В.Н. Подбельского. В 1926 г., оставаясь верным своему детскому и юношескому увлечению только зарождающейся наукой – радиотехникой, он поступил на электротехнический факультет Московского высшего технического училища им. Н. Э. Баумана (МВТУ).

На базе электротехнического факультета МВТУ в 1930 г. формируется Московский энергетический институт (МЭИ). В 1931 г. В. А. Котельников окончил МЭИ и получил диплом инженера-электрика по специальности «радиотехника».

Как одного из лучших выпускников, его оставили в аспирантуре МЭИ. В том же 1931 году до начала занятий в аспирантуре несколько месяцев работал в НИИ связи Красной армии.

Во время обучения в аспирантуре (1931–1933) В. А. Котельников выбрал темой своей научной работы актуальную в то время проблему пропускной способности линий электросвязи, в ходе решения которой им впервые была математически точно сформулирована и доказана ставшая впоследствии классической «теорема отсчетов» (теорема Котельникова), которая легла в основу современной теории информации, передачи и обработки сигналов, радиотехники, радиолокации и радиоастрономии.

Впервые в известном в настоящее время виде теорема Котельникова была опубликована в статье «О пропускной способности «эфира» и проволоки» (в историческом сборнике «Материалы к 1 Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности» Всесоюзного энергетического комитета, изданном в 1933 году). В ней В. А. Котельников показал, что при определенном выборе базисных функций в ортогональном разложении сигнала весовые коэффициенты при этих функциях будут вычисляться удивительно просто: они будут отсчетами (мгновенными значениями) заданного колебания и по этим отсчетам можно снова восстановить исходное колебание во все моменты времени!

После окончания аспирантуры в 1933 г. В. А. Котельников, оставаясь преподавателем в МЭИ, поступил на работу в Центральный научно-исследовательский институт связи Наркомата связи СССР (ЦНИИС) на должность инженера, затем главного инженера, а впоследствии стал заведующим лабораторией Института радио Наркомата связи СССР, выделившегося из ЦНИИС (1933–1941).

В. А. Котельникову принадлежит ряд выдающихся инженерных разработок, выполненных в предвоенные годы и в период Великой Отечественной войны. По его инициативе и под его руководством была создана уникальная аппаратура радиосвязи, установленная на линии Москва–Хабаровск. Создание этой магистрали было в то время крупнейшим достижением отечественной и мировой радиотехники.

В 1941 г. В. А. Котельниковым сформулировано четкое положение о том, каким требованиям должна удовлетворять математически недешифруемая система, и дано доказательство невозможности ее дешифровки. Эта работа и теорема Котельникова явились основополагающими в развитии отечественной криптографии.

Осенью 1941 г. руководимая им лаборатория была эвакуирована в г. Уфу, где она вошла в Государственный союзный промышленно-экспериментальный институт № 56 Министерства электропромышленности, который был эвакуирован из Ленинграда раньше. В указанном институте В. А. Котельников руководил сначала группой, а затем лабораторией. Начатые до войны работы по созданию новых систем связи, защищенных от возможного прослушивания, успешно продолжились в Уфе. Производство разработанной аппаратуры было налажено в блокадном Ленинграде на заводе № 209 также при непосредственном участии В. А. Котельникова. В ходе этих работ ему пришлось решить много научных, технических и организационных проблем.

Созданные под руководством В. А. Котельникова недешифруемые системы связи с успехом использовались в 1942–1945 гг. для связи Москвы с фронтами, в действующей армии, а также во время принятия капитуляции Германии для связи советской делегации с Москвой. За эти работы В. А. Котельников дважды был удостоен Государственной (Сталинской) премии I степени – в 1943 и 1946 гг.

После возвращения в Москву из эвакуации в 1943 г. лаборатория В. А. Котельникова была переведена в ведомство НКВД СССР.

В 1944 г. В. А. Котельников перешел на работу в МЭИ, где вскоре после войны приступил к созданию Особого конструкторского бюро МЭИ. В МЭИ В. А. Котельников проработал до 1980 г. и занимал должности профессора, декана радиотехнического факультета, заведующего кафедрой.

Активно занимаясь вопросами радиосвязи, В. А. Котельников внес существенные усовершенствования в технику приема слабых сигналов. Результаты этих исследований обобщены в его докторской диссертации, которую он защитил в 1947 г. В ней он сформулировал ставшие позднее классическими принципы теории потенциальной помехоустойчивости. В. А. Котельников поставил и решил задачу определения предельных возможностей по борьбе с помехами. Приемник, в котором достигался этот предел, он назвал идеальным, а достигнутую при этом помехоустойчивость – потенциальной, т.е. достижимой лишь «в пределе».

Будучи одновременно ученым и инженером, В. А. Котельников, применив разработанные методы, сравнил помехоустойчивость различных известных в то время методов радиоприема и указал их соотношение с потенциальной помехоустойчивостью. Было найдено, от каких именно параметров зависит помехоустойчивость, введена классификация сигналов по устойчивости к помехам. В частности, найдена система дискретных

сигналов, обеспечивающих наибольшую возможную помехоустойчивость при флуктуационных помехах. Эти сигналы были названы симплексными.

Замечательным свойством теории потенциальной помехоустойчивости является широкое использование геометрического представления сигналов и любых других колебаний (в том числе помех). Это позволило оперировать наборами чисел вместо функций времени. Однако строгость теории проявилась и в том, что геометрия никогда не использовалась автором для доказательства утверждений, но только для их наглядного представления.

С 1947 по 1953 гг., а это были годы зарождения ракетно-космической индустрии СССР, В. А. Котельников отдал много сил для организации и развития ОКБ МЭИ: был первым руководителем и главным конструктором этой организации, которая сразу включилась в работу по ракетно-космической программе СССР. В. А. Котельников входил в Совет главных конструкторов, которым руководил С. П. Королев. Коллектив ОКБ МЭИ стал одним из крупных разработчиков космической радиоэлектроники.

Полученные в теории потенциальной помехоустойчивости результаты стали теоретической основой для создания в ОКБ МЭИ эффективных бортовых телеметрических систем. Так, при разработке телеметрической системы «Трал», в создании которой непосредственное участие принимали В. А. Котельников, К. А. Победоносцев, на базе теории потенциальной помехоустойчивости был обоснован выбор способа разделения каналов, вид модуляции, энергетические параметры системы. Позднее специалистами ОКБ МЭИ была создана первая цифровая система «Орбита-ТМ», в которой на практике был реализован потенциальный приемник Котельникова с линейным детектором и интегратором. Первые космические телевизионные системы, созданные при участии ОКБ МЭИ, также использовали времяимпульсную модуляцию, отработанную в системе «Трал».

Проведенное впоследствии сравнение созданных систем с американскими показало существенное превосходство отечественной аппаратуры, что не в последнюю очередь обусловлено обоснованием ее параметров на базе теории В. А. Котельникова. Телеметрические системы ОКБ стали основными при запуске ракет и спутников. Наличие телеметрической аппаратуры позволяло эффективно выявлять причины неудачных пусков ракет и существенно ускорить процесс их создания, что во многом определило первенство СССР в космической гонке.

В 1953 г., в возрасте 45 лет, В. А. Котельников был избран сразу действительным членом Академии наук СССР (минуя ступень члена-корреспондента). В этом же году В. А. Котельников становится заместителем директора только что учрежденного Института радиотехники и электроники (ИРЭ) АН СССР, затем – его директором (1954–1987) и с 1987 г. – почетным директором. Им была проведена колоссальная работа по созданию Института, привлечению для работы в нем лучших научных кадров, подбору научной тематики, что во многом определило быстрый выход ИРЭ в число лидирующих научных учреждений в области радиоэлектроники.

С 1968 по 1988 гг. В. А. Котельников был профессором, заведующим кафедрой Московского физико-технического института.

С именем В. А. Котельникова связано становление и развитие нового направления в исследовании космоса – планетной радиолокации. Под его руководством проведена радиолокация планет Солнечной системы: Венеры (1961–1964), Меркурия (1962), Марса (1963), Юпитера (1963). За эти работы в 1964 г. он был удостоен Ленинской премии.

Выдающимся мировым достижением явились радиолокационные съемки северной части Венеры, осуществленные в 1983–1984 гг. с помощью аппаратов «Венера-15» и

«Венера-16», благодаря которым удалось получить радиоизображение северной части планеты в больших масштабах – примерно 115 млн кв. км с разрешением порядка 1 км. В результате исследований этих уникальных данных был создан и издан первый в истории науки «Атлас поверхности Венеры», главным редактором которого стал академик В. А. Котельников.

В. А. Котельников – крупный организатор отечественной науки. С 1970 по 1975 гг. в качестве вице-президента Академии наук он курировал Секцию физико-технических и математических наук АН СССР, а затем стал первым вице-президентом АН СССР (1975–1988).

В. А. Котельников – один из основателей (в мае 1945 г.) и почетный член Всероссийского научно-технического общества радиотехники, электроники и электросвязи им. А. С. Попова. В течение многих лет он был председателем правления общества.

В. А. Котельников основал журнал «Радиотехника и электроника» и длительное время являлся его главным редактором, возглавлял Научный совет Академии наук по проблеме «Радиоастрономия». На протяжении ряда лет возглавлял Совет по международному сотрудничеству в области исследования и использования космического пространства «Интеркосмос» (ныне секция Совета РАН по космосу «Международное сотрудничество»).

В 1973–1980 гг. В. А. Котельников был Председателем Верховного Совета РСФСР.

Академик В. А. Котельников заслужил авторитет не только у нас в стране, но и за рубежом. Он являлся членом многих научных организаций: член Института инженеров по электронике и электротехнике США (IEEE); иностранный член Чехословацкой академии наук (1965 г.); почетный доктор Чешского высшего технического училища (1967 г.); иностранный член Академии наук ГДР (1974–1992 гг.) и Академии наук Польши (1974 г.); член-корреспондент Международной академии астронавтики (1981 г.); академик Международной академии астронавтики (1982 г.); вице-президент Международной академии астронавтики (1983–1995 гг.); иностранный член Академии наук Монголии (1983 г.); иностранный член Академии наук Болгарии (1987 г.); почетный доктор Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета (1995 г.). Кроме того, академик В. А. Котельников являлся членом Российской ассоциации членов Международной академии астронавтики, действительным членом Инженерной академии и Академии творчества.

Заслуги В. А. Котельникова отмечены высокими наградами. Он дважды Герой Социалистического Труда, награжден шестью орденами Ленина, орденом Октябрьской Революции, двумя орденами Трудового Красного Знамени, орденом «Знак Почета», российскими орденами «Почета» и «За заслуги перед Отечеством» II степени.

21 сентября 2003 г. Президент Российской Федерации В. В. Путин подписал Указ о награждении академика Владимира Александровича Котельникова орденом «За заслуги перед Отечеством» I степени. Он стал одним из первых в России кавалеров этого ордена.

Ему присуждены Ленинская премия, дважды Государственная премия СССР. Академия наук СССР наградила В. А. Котельникова золотой медалью имени А. С. Попова (1974 г.), золотой медалью имени М.В. Ломоносова, золотой медалью с премией имени М. В. Келдыша.

Его научная и общественная деятельность отмечена зарубежными наградами и премиями. Он награжден Институтом инженеров по электронике и электротехнике (США) медалью имени Х. и С. Беннов и золотой медалью А. Г. Белла; Фондом имени Эдуарда Раина (Германия) – основной премией – за фундаментальные исследования;

Чехословацкой академией наук – золотой медалью «За заслуги перед наукой и человечеством» и золотой медалью имени Фр. Кржижека; Словацкой академией наук – золотой медалью «За заслуги перед наукой», Обществом польских электриков – медалью им. профессора Я. Грошковского в признание заслуг в научном сотрудничестве советских и польских ученых; Комитетом Международного совета научных союзов по космическим исследованиям – медалью имени Вихрама Сарабхая; Международной премией им. Дж. Неру и др.

В. А. Котельников – автор трех монографий и многочисленных научных статей.

В последние годы жизни В. А. Котельников занимался решением фундаментальной задачи теории сигналов по поиску сигнала, имеющего минимум спектра за пределами заданной полосы, а также решением задач квантовой механики.

Скончался Владимир Александрович Котельников 11 февраля 2005 г.

Список литературы

1. Владимир Александрович Котельников. К 95-летию. – М.: Издательство МЭИ, 2003.
2. *Быховский, М. А.* Круги памяти (Очерки истории развития радиосвязи и вещания в XX столетии) / М. А. Быховский // Серия изданий «История электросвязи и радиотехники». Вып. 1. – М.: Информационно-технический центр «Мобильные коммуникации», 2001.
3. *Быховский, М. А.* Развитие отечественными учеными теории оптимального приема непрерывных сигналов, созданной академиком В. А. Котельниковым / М. А. Быховский // Радиотехнические тетради. – 2003. – № 27. – С.38–43.

А. А. Роженцов

Статья поступила в редакцию 20.07.08

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

УДК 621.37

МарГТУ на Российских смотровых площадках

В минувшем учебном году наш университет активно участвовал на различных Российских выставочных форумах: XI Московский международный салон промышленной собственности «Архимед» (г. Москва), VIII Московский международный салон инноваций и инвестиций (г. Москва), V международная выставка технических средств обороны и защиты «Оборона и защита – 2008» (г. Нижний Тагил), первый Российский Форум «Российским инновациям – Российский капитал» и VI ярмарка бизнес-ангелов и инноваторов (г. Чебоксары). Цель нашего участия – популяризация научных достижений вуза для их дальнейшей коммерциализации.

Так, по итогам международного салона «Архимед–2008» из пяти представленных вузом на конкурс работ две получили золотые медали – работа «Способ разминирования» (автор Кудрявцев И. А.) и работа «Способ и устройства для исследования времени инерционности зрительной системы человека» (авторы Лежнин А. В., Роженцов В. В.) и одна серебряную медаль – работа «Бесплотинная гидроэлектростанция» (авторы Шестаков Я. И., Багаутдинов И. Н., Поздеев А. Г., Липчак С. В.). Организаторы салона отметили высокий уровень развития изобретательства и инноваций вуза, наградили университет кубком «Инновационный вуз салона», а также решили принять Марийский государственный технический университет в состав Международного инновационного клуба «Архимед».

На Московском международном салоне инноваций и инвестиций было представлено четыре работы, а на выставке в Нижнем Тагиле – шесть работ. Здесь МарГТУ тоже отмечен золотой, серебряной и бронзовой медалями, а также дипломами участников.

Наиболее значимых результатов университет добился, участвуя в первом Российском Форуме «Российским инновациям – Российский капитал», проходившем 19–20 июня 2008 года в г. Чебоксары. Надо отметить, что из 20 представленных работ от Республики Марий Эл 16 являются детищем МарГТУ. Дипломами за второе место отмечены работы: «Вертолетный подвес» (авторы Кудрявцев И. А., Щепин В. Д., Дроздов Н. А.); за третье место – «Велоснежокат» (авторы Кудрявцев И. А., Щепин В. Д., Дроздов Н. А.); специальный диплом «Лучший молодежный проект» получила работа «Аппаратно-программный комплекс для зондирования ионосферы и декаметровых каналов дальней радиосвязи» (авторы Иванов В. А., Иванов Д. В., Рябова Н. В., Царев И. Е., Елсуков А. А., Лащевский А. Р., Мальцев А. В., Павлов В. В.). По итогам ярмарки было заключено пять соглашений о намерениях сотрудничества с такими предприятиями, как ФНПУ ОАО «НПО «Марс», г. Ульяновск; ФГУП «Пензенский научно-исследовательский электротехнический институт», г. Пенза; ОАО «АБС Автоматизация», г. Чебоксары; ЗАО ПО «Гамми», г. Нижний Новгород; НО «Инновационно-инвестиционный фонд Самарской области», г. Самара.

В работе первого Форума приняли участие 22 инновационно ориентированных региона России, федеральные и региональные органы власти и ведомства, ответственные за инновационную политику страны, российские ассоциации и сети бизнес-ангелов. Соответствующая международным стандартам прямая трансляция работы Форума в сети Интернет позволила значительно расширить географию участия в его мероприятиях.

Форум собрал рекордное за шестилетний период количество российских инвесторов, которыми принято к рассмотрению более трети представленных проектов.

Представители промышленности, вошедшие в состав отраслевых экспертных комиссий, отметили конкурентоспособность представленных инновационных проектов и высокую вероятность их внедрения в различные отрасли хозяйства страны.

В заключение хочется добавить, что МарГТУ в целях продвижения на Российский рынок своих разработок подписал соглашение и стал участником Сети Трансфера Технологий Высшей Школы. Это осуществляет Фонд содействия развитию инновационной деятельности высшей школы (Фонд СИНД).

Сеть создана для координации, взаимной поддержки и активизации деятельности высшей школы по передаче технологий в реальный сектор экономики. На сайтах Сети ее участники на безвозмездной основе могут размещать постоянно обновляемую рекламу своих разработок, найти запросы предприятий на приобретение технологий и изделий, проведение НИР, новостные материалы по обмену опытом в области трансфера технологий, проведению выставок, семинаров, конференций. В настоящее время 40 вузов являются участниками данной Сети.

Мы надеемся, что и в будущем будем гордиться нашими достижениями и получим значительный эффект от коммерциализации научных разработок.

Ю. С. Андрианов

Статья поступила в редакцию 29.08.08

АНДРИАНОВ Юрий Семенович – кандидат экономических наук, профессор кафедры управления и права МарГТУ. Область научных интересов – управление и организация перевозок лесных грузов автомобильным транспортом. Автор более 120 научных публикаций.

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

Редакция журнала «Вестник Марийского государственного технического университета» принимает к публикации статьи, соответствующие профилю издания, объемом не более 15 страниц, включая рисунки.

Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты исследований автора, завершенных не более чем за год до публикации.

К печати будут приниматься материалы, которые не опубликованы и не переданы в другие редакции. Статьи подвергаются обязательному рецензированию. Рецензенты назначаются редколлегией журнала. Мнение рецензента доводится до автора представленных работ. В «Вестнике ...» печатаются только статьи, получившие положительные рецензии.

Требования к оригиналам представляемых работ

Структура научной статьи

1. Аннотация (3-4 предложения), 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.

На первой странице статьи слева печатается УДК (размер шрифта 12 пт, прямой, светлый). Ниже, справа – инициалы, фамилия автора (размер шрифта 14 пт, курсив, жирный). Ниже, по центру – название статьи (размер шрифта 14 пт, прямой, жирный).

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

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

Таблицы и рисунки должны быть вставлены в текст после абзацев, содержащих ссылку на них.

Размеры иллюстраций не должны превышать размеров текстового поля (не более 15 см).

Список литературы оформляется согласно порядку ссылок в тексте (где они указываются в квадратных скобках) и обязательно в соответствии с ГОСТ 7.1-2003.

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

Статья должна быть подписана автором. После подписи автора и даты указываются его фамилия, имя, отчество (полностью), место работы, должность, область научных интересов, количество опубликованных работ, телефон, домашний адрес.

К статье прилагаются следующие **документы**:

- выписка из протокола заседания кафедры;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

Материалы представляются в папке с завязками (каждая статья в отдельной папке).

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

Следующий номер журнала выйдет в декабре 2008 года.