

ВЕСТНИК 3 (10) 2010

МАРИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Научно-технический журнал

Издаётся с ноября 2007 года

Выходит три раза в год

СЕРИЯ «Радиотехнические и инфокоммуникационные системы»

Журнал включен в **ПЕРЕЧЕНЬ** ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 г. №6/6)

Учредитель:

ГОУ ВПО «Марийский государственный технический университет»

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

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

Адрес редакции:

424006 Йошкар-Ола, ул. Панфилова, 17

Тел. (8362) 68-60-12, 68-78-46

Факс (8362) 41-08-72

e-mail: vestnik@marstu.net

Редактор *Т. А. Рыбалка*

Дизайн обложки *Л. Г. Маланкина*

Компьютерная верстка

А. Ю. Желонкин

Перевод на английский язык

О. В. Миронова

Подписано в печать 30.12.10.

Формат 60×84 ¹/₈. Усл. п. л. 12,55.

Тираж 500 экз. Заказ № .

Марийский государственный

технический университет

424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинал-макета

в ООО «Реклайн»

424007 Йошкар-Ола,

ул. Строителей, 95

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 – главный редактор серии)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

О. Г. Морозов, О. А. Степущенко, И. Р. Садыков. Модуляционные методы измерений в оптических биосенсорах рефрактометрического типа на основе волоконных решеток Брэгга с фазовым сдвигом

А. Ю. Чернышев. Недвоичные линейные блочные коды с произвольными коэффициентами порождающих матриц

Т. С. Садеев, О. Г. Морозов. Спектральные характеристики фотонных фильтров микроволновых сигналов на основе амплитудных электрооптических модуляторов

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

А. А. Роженцов, А. А. Баев, Р. В. Ерусланов. Решение задачи распараллеливания вычислений при обработке кватернионных сигналов

А. Н. Леухин, Э. А. Курбанов, Н. В. Парсаев, О. Н. Воробьев, А. В. Губаев, А. С. Шувалов, Х. Э. Рахманов, С. А. Лежнин, А. В. Харитонов, Е. Н. Потехин, С. А. Незамаев, Ю. А. Полевищикова. Оценка типов наземного покрова для распознавания объектов ландшафта на космических снимках

А. Г. Коробейников, Ю. А. Копытенко, В. С. Исмагилов. Применение интеллектуальных систем магнитных измерений

И. В. Петухов, Л. А. Стешина, М. Г. Глушкова. Информационное и математическое обеспечение исследования деятельности оператора человеко-машинных систем

ЭЛЕКТРОНИКА

И. А. Калашников, Л. Ю. Грунин, А. Н. Леухин. Генератор многофазных фазоманипулированных сигналов

М. Т. Алиев, С. Л. Тихонов. Аппаратно-программный комплекс для оценки эффективной деятельности человека

В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина. Способ сокращения времени измерения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

П. А. Нехорошков. Фестиваль науки впервые в Республике Марий Эл

В. Г. Наводнов, И. В. Журавлева, Л. Н. Шарафутдинова. Всероссийская междисциплинарная интернет-олимпиада с международным участием «Информационные технологии в сложных системах»

И. Г. Сидоркина. Факультету информатики и вычислительной техники Марийского государственного технического университета десять лет
Указатель материалов, опубликованных в журнале в 2010 году

Информация для авторов

CONTENTS TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

O. G. Morozov, O. A. Stepushchenko, I. R. Sadykov. Modulation methods of measurements in optical biosensors of refractometric type on basis of fiber bragg gratings with phase-shift

3

A. Y. Chernyshev. Nonbinary linear block codes with arbitrary coefficients of generating matrixes

14

T. S. Sadeev, O. G. Morozov. Spectral characteristics of photon filters of microwave signals on basis of amplitude electro-optical modulators

22

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

A. A. Rozhentsov, A. A. Baev, R. V. Eruslanov. Problem solving of calculation parallelization during processing of quaternion signals

31

A. N. Leukhin, E. A. Kurbanov, N. V. Parsaev, O. N. Vorobiev, A. V. Gubaev, A. S. Shuvalov, H. E. Rakhmanov, S. A. Lezhnin, A. V. Haritonov, E. N. Potekhin, S. A. Nezamaev, Y. A. Polevshchikova. Estimation of overground cover types for identification of landscape objects on satellite photographs

40

A. G. Korobeynikov, Y. A. Kopytenko, V. S. Ismagilov. Application of intelligence systems of magnetic measurements

50

I. V. Petukhov, L. A. Steshina, M. G. Glushkova. Information and mathematical support of research of activity of operator of man-machine systems

58

ELECTRONICS

I. A. Kalashnikov, L. Y. Grunin, A. N. Leukhin. Generator of multiphase phase-manipulated signals

67

M. T. Aliev, S. L. Tikhonov. Hardware-software complex for estimation of effective activity of person

76

V. V. Rozhentsov, T. A. Lezhnina. The method of reduction in time of measurement of eyesight resolution by light flicker frequency

86

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

P. A. Nekhoroshkov. For the first time Science Festival in the Republic of Mari El

91

V. G. Navodnov, I. V. Zhuravleva, L. N. Sharafutdinova. All-Russian interdisciplinary international Internet-contest «Information technologies in complex systems»

96

I. G. Sidorkina. Tenth anniversary of information science and computer engineering department of mari state technical university

100

List of materials Published in MarSTU Reporter in 2010

107 *Information for the authors*

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

УДК 681.586.5

О. Г. Морозов, О. А. Степущенко, И. Р. Садыков

МОДУЛЯЦИОННЫЕ МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ БИОСЕНСОРАХ РЕФРАКТОМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ВОЛОКОННЫХ РЕШЕТОК БРЭГГА С ФАЗОВЫМ СДВИГОМ

Показаны возможность увеличения разрешающей способности до 0,005 нм, повышение чувствительности на 1–2 порядка и возможность значительного упрощения техники сбора информации в оптических биосенсорах рефрактометрического типа, построенных на основе волоконных решеток Брэгга. Приведенные значения улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик достигнуты применением в биосенсорах указанного типа волоконных решеток Брэгга с фазовым π -сдвигом и использованием для их зондирования двухчастотных излучений, полученных с помощью модуляционных методов.

Ключевые слова: *оптический биосенсор, рефрактометрия, волоконная решетка Брэгга, π -сдвиг, разрешающая способность, двухчастотное зондирование, чувствительность, модуляционные методы измерений.*

Введение. Оптические биосенсоры рефрактометрического типа (ОБРТ) на основе волоконных решеток Брэгга (ВРБ) стремительно развиваются в последнее десятилетие, находя широкое применение как для контроля сверхмалых концентраций различных веществ в растворах, так и для анализа гибридизации ДНК [1, 2]. Информация в ОБРТ характеризуется величиной сдвига центральной длины волны ВРБ в зависимости от изменения коэффициента преломления внешней оболочки волокна, сформированной в чувствительной зоне биосенсора анализируемой средой. Указанные выше процессы отличаются динамикой измерений, которая находится в пределах от единиц секунд (измерение концентраций) до десятков минут (гибридизация ДНК), и определяет требования к метрологическим, конструктивным и эксплуатационным характеристикам биосенсоров различного назначения.

Основные на сегодняшний день проблемы ОБРТ, требующие быстрого и технологичного решения, могут быть отражены следующими требованиями: увеличение раз-

решающей способности; повышение чувствительности; формирование стабильных по амплитуде и чистоте спектра зондирующих излучений; выделение рефрактометрической информации из комплекса одновременно влияющих на показания ОБРТ параметров, определяемых универсальностью отклика ВРБ на изменение давления, температуры и коэффициента преломления; построение датчиков точечного типа и распределенных сетей на их основе.

Спектр частных решений указанных проблем достаточно широк.

Увеличение разрешающей способности достигается использованием для анализа характерных сверхузкополосных особенностей спектра отражения ВРБ [2], применением узкополосных ВРБ [3, 4], построением интерферометров Фабри-Перо со сверхузкой полосой пропускания [4] и т.д. Следует отметить, что в ОБРТ практически не используется такая структура, как ВРБ с фазовым π -сдвигом, отличающаяся наличием сверхузкополосной зоны пропускания, размещенной при определенных условиях на центральной длине волны решетки [5].

Для повышения чувствительности ОБРТ используют различные конструктивные решения, обеспечивающие повышение эффективности взаимодействия излучения и анализируемой среды (волокна со снятой внешней оболочкой [4], D-типа [6], с вытравленной внутренней оболочкой [7]), а также модуляционные методы повышения отношения сигнал/шум измерений [8], среди которых следует выделить и методы гетеродинного приема информационных сигналов [9]. Последние требуют формирования стабильных по амплитуде и чистоте спектра зондирующих ОБРТ излучений и гетеродинов, а также создания систем мониторинга их параметров.

Данное требование обосновано и другими факторами. Основная масса применений ОБРТ отличается использованием для зондирования широкополосных источников излучения и высокобюджетных оптических анализаторов спектра для детектирования информационных сигналов [1]. При переходе к биосенсорам со сверхузкой индикационной полосой их использование становится не оптимальным и вызывает необходимость применения модуляционных методов измерений, практика реализаций которых в данной области пока не описана.

Обзор решений для учета влияния тепловых и деформационных факторов на измерения ОБРТ достаточно широко представлен в работах [10, 11]. Многие из них основаны на применении комбинаций ВРБ и длиннопериодных (ДП) ВРБ. ДП ВРБ, как самостоятельный сенсор, обладает высокими метрологическими характеристиками [12, 13], однако ее трудно отнести к сенсорам точечного типа в силу большой линейной протяженности. Для данных биосенсоров также могут быть найдены простые и эффективные решения по повышению чувствительности при использовании модуляционных методов измерений.

Ширина полосы пропускания ДП ВРБ значительно превышает полосу пропускания обычной ВРБ, при этом анализ информационного смещения и ее центральной длины волны может быть выполнен с использованием таких модуляционных технологий, как: волновая [14], частотная [15], двухтональная [16] и развиваемая нами двухчастотная спектрометрия [8, 17–19]. Для последней в ряде работ показана возможность формирования распределенных информационно-измерительных сетей [9, 20], которые могут найти применение для оперативных массовых биоанализов.

Цель настоящей работы заключается в оценке эффективности применения модуляционных методов измерения в ОБРТ на основе ВРБ, в частности при формировании измерительной системы на основе ВРБ с фазовым π -сдвигом и использовании двухчастотных модуляционных методов для реализации собственно спектрометрических измерений и формирования системы мониторинга параметров зондирующих излучений.

1. Разрешающая способность и чувствительность ОБРТ на базе ВРБ с π -сдвигом. Для достижения высокой разрешающей способности в различных сенсорных системах на основе ВРБ применяются как сами решетки, анализ сдвига центральной длины волны которых проводится по узкополосным особенностям их спектральных характеристик [2], так и более сложные конфигурации, например, интерферометр Фабри-Перо на базе двух ВРБ, характеризующийся наличием очень узкого резонанса и который на сегодняшний день наиболее широко используется на практике [4]. Однако в ОБРТ наиболее приемлемо использование таких решеток, как решетки с фазовым π -сдвигом, муаровые, дискретизированные, которые характеризуются более узким резонансом пропускания, размерами, сравнимыми с размером одной решетки, и высокой чувствительностью к изменению коэффициента преломления оболочки или окружающей среды. С точки зрения формирования многоканальных распределенных решеток для оперативного массового биоанализа разработаны и продемонстрированы разновидности указанных выше решеток с sinc-дискретизацией и дискретизацией только фазы, суперструктурированные решетки и решетки на основе эффекта Талбота [21]. Среди перечисленных наибольшее внимание привлекают решетки с фазовым сдвигом и только фазовой дискретизацией, которые могут быть изготовлены с помощью простых фазовых масок с минимальными требованиями, предъявляемыми к параметрам модуляции коэффициента преломления и равномерности характеристик его профиля [22].

На рис. 1 схематично показаны структуры ОБРТ с вытравленной оболочкой на базе ВРБ (а), в конфигурации ИФП с вытравленным резонатором (б) и полным травлением по всей длине (в), а также на базе ВРБ с фазовым π -сдвигом (г).

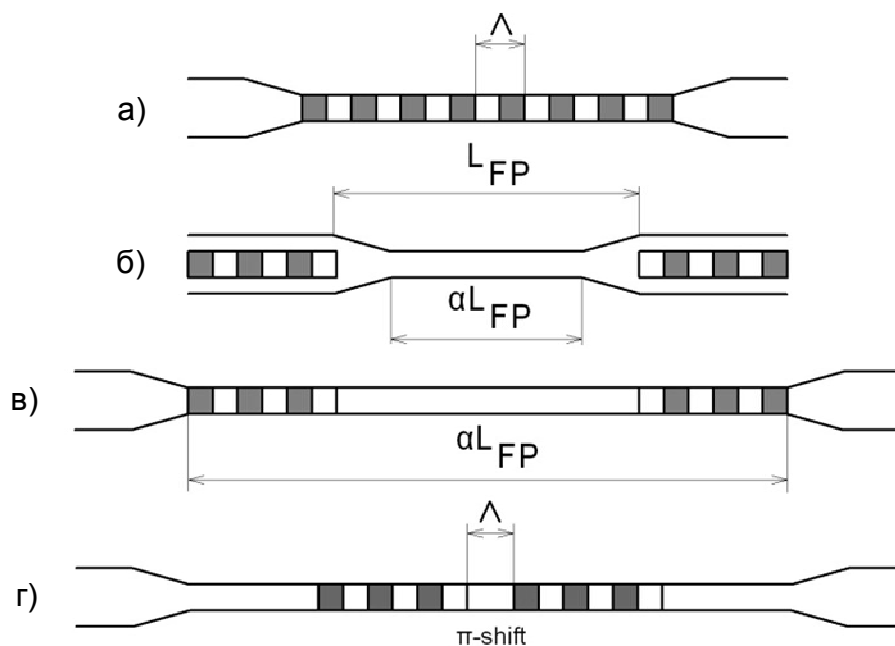


Рис. 1. Типы оптических биосенсоров рефрактометрического типа

Для ОБРТ на базе ВРБ (рис. 1, а) центральная длина волны полосы отражения λ_B определяется как

$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda, \quad (1)$$

где Λ – период ВРБ, определяемый фазовой маской, n_{eff} – эффективный коэффициент преломления ВРБ. Коэффициент преломления исследуемого материала (окружающей

ОБРТ среды) n_{amb} может быть определен по измеренной λ_B и известных коэффициенте преломления сердцевины n_{co} и радиусе a_{cl} оболочки вытравленного волокна по процедуре, описанной в [23].

Чувствительность ОБРТ на базе ВРБ может быть определена следующим образом

$$\Delta\lambda_B = 2 \left(\Lambda \frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{amb}} \right) \Delta n_{amb}. \quad (2)$$

Для ИФП с вытравленным резонатором (рис. 1, б) при условии постоянства его длины L_{FP} резонансная длина волны λ_{FP} определяется следующим выражением

$$m\lambda_{FP} = 2n_{eff}L_{FP}, \quad (3)$$

где m – номер моды. При изменении коэффициента преломления исследуемого материала n_{amb} эффективный коэффициент преломления изменяется на величину Δn_{eff} , а резонансная длина волны m -ой моды сдвигается на величину $\Delta\lambda_{FP}$. Из (3) можно получить

$$\Delta\lambda_{FP} / \lambda_{FP} = \alpha \Delta n_{eff} / n_{eff}, \quad (4)$$

где α – доля оптической длины резонатора ИФП, вытравленная при изготовлении датчика.

Достоинством такого типа датчика является линейный характер зависимости сдвига резонансной длины волны от изменения эффективного показателя преломления и наличие узкополосного резонансного пика, обеспечивающего измерение коэффициента преломления с высоким разрешением.

Однако для ОБРТ наиболее существенной является зависимость сдвига центральной длины волны от изменения коэффициента преломления окружающей среды

$$\frac{\Delta\lambda_{FP}}{\lambda_{FP}} = \alpha \left(\frac{\Delta n_{amb}}{n_{eff}} \right) \left(\frac{\partial n_{eff}}{\partial n_{amb}} \right). \quad (5)$$

Оценки, проведенные нами, и результаты, приведенные в работах других авторов [1–4], показали, что величина чувствительности ОБРТ в конфигурации ИФП с вытравленным резонатором меньше, чем чувствительность ОБРТ на базе ВРБ. На основе данных указанных источников предельно детектируемое изменение коэффициента преломления для первого типа ОБРТ от двух до десяти раз меньше, чем для второго, и составляет соответственно $\sim 10^{-5}$ и $\sim 10^{-6}$ RIU [4]. Компенсировать указанную разницу можно при изготовлении ОБРТ в конфигурации ИФП с травлением по полной оптической длине (рис. 1, в). Тогда полная чувствительность биосенсора будет определяться комплексным откликом ВРБ и фазовым сдвигом резонатора ИФП, не ухудшая при этом значения, указанного для решеток Брэгга.

Недостатком приведенного решения является появление нелинейной зависимости между сдвигом длины волны и изменением коэффициента преломления, однако сохраняется значительное увеличение в разрешающей способности рефрактометрических измерений. Реально достижимая полуширина резонансного спектра ОБРТ в конфигурации ИФП составляет по данным [4] 0,025 нм, а для ВРБ – 0,5 нм. Это значит, что разрешающая способность ИФП биосенсора в 20 раз лучше, чем у датчика на одной ВРБ.

Развивая данный подход, можно использовать для создания ОБРТ ВРБ с фазовым π -сдвигом (рис. 1, г), которая представляет собой простейший ИФП с длиной резонатора, не превышающей λ_B . Полуширина резонансного пика такого типа решеток может достигать 0,005 нм [5], что свидетельствует о возможном увеличении разрешающей способности измерений на два порядка по сравнению с датчиком на одной ВРБ.

2. Применение модуляционных методов зондирования измерений в ОБРТ на базе ВРБ с π -сдвигом. Использование ОБРТ на базе ВРБ с фазовым π -сдвигом предполагает для измерения величину сдвига центральной длины волны контура Лоренца [21] с полушириной в единицы пикаметров. Для таких величин общепринятым является их оценка в единицах частоты. Таким образом, ширина спектра исследуемого контура находится в пределах единиц ГГц. Очевидно, что применение в данной задаче зондирования ВРБ с помощью широкополосных источников и оптических анализаторов спектра [24] неэффективно. Высокой точности и разрешающей способности измерений можно достичь при использовании сканирующих интерферометров Майкельсона и частотно-синхронизированных узкополосных лазерных источников [25]. Однако обеспечение стабильности фазовых измерений в первом случае и невозможность обеспечения быстродействующей обратной связи во втором делают решение указанной задачи проблематичной как в случае статических, так и динамических измерений. Предлагаемое решение может быть найдено при использовании модуляционных методов измерений, которые характеризуются применением в качестве несущей зондирования излучения лазеров с шириной линии излучения в единицы МГц и различных методов радиочастотной модуляции высокочастотного и микроволнового диапазонов [8, 9, 19, 20].

Применение модуляционных методов мониторинга ВРБ в сенсорных системах имеет короткую историю [8, 9, 19, 20, 26–28]. Однако с учетом активного развития ОБРТ на основе ВРБ с узкополосными рабочими зонами необходим анализ применимости известных модуляционных методов мониторинга, применяемых в других областях, например, спектрометрии газов, и развитие новых многочастотных подходов, основанных на преимуществах измерений на промежуточных частотах, позволяющих принимать информационный сигнал в области минимальных собственных шумов фотоприемника и избыточных токовых шумов лазера, тем самым повышая отношение сигнал/шум измерений на 1–2 порядка и обеспечивая прием на уровне квантовых шумов фотоприемника.

Основной модуляционный метод, применяемый в спектрометрии газов и использованный в работах [14–16], представляет собой метод частотной модуляции (ЧМ). Взаимодействие модулированного лазерного излучения с контуром ВРБ позволяет получить рефлектометрический амплитудно-модулированный сигнал, отражающий величину расстройки контура ВРБ относительно несущей частоты, что позволяет вычислить частотный сдвиг центральной длины волны ВРБ от нормированного положения под воздействием измеряемого фактора.

В зависимости от числа модулирующих частот, соотношения между полосой модуляции и спектральной шириной исследуемого контура, частоты детектирования все модуляционные методы разделяют на следующие виды: волновая модуляционная спектроскопия (ВМС) [14], однотоновая (ОТ) частотная модуляционная спектроскопия (ЧМС) [15] или двухтоновая (ДТ) ЧМС [16], а также развиваемая нами двухчастотная амплитудно-фазовая модуляционная спектрометрия (ДЧ АФМС) [8, 9, 19, 20].

В случае ВМС модуляционная частота значительно меньше полуширины контура ВРБ, в то же время ОТ, ДТ ЧМС и ДЧ АФМС характеризуются модуляционными частотами, сравнимыми или превышающими указанную величину. ВМС обычно реализуется на килогерцовых частотах (низкочастотная ВМС) с использованием избирательных усилителей. Чувствительность измерений может быть значительно повышена при использовании мегагерцовых частот (высокочастотная ВМС) и детектировании на гармониках промежуточной частоты. ОТ и ДТ ЧМС оперируют малыми индексами модуляции, но еще большими гигагерцовыми частотами, при этом в ДТ ЧМС используются

два близких по частоте тона и детектирование осуществляется на их разностной частоте. ДЧ АФМС позволяет значительно повысить энергетические соотношения для модуляционных частот и проводить детектирование по амплитуде (рис. 2, а), фазе (рис. 2, б) и частоте огибающей биений разностной частоты [29].

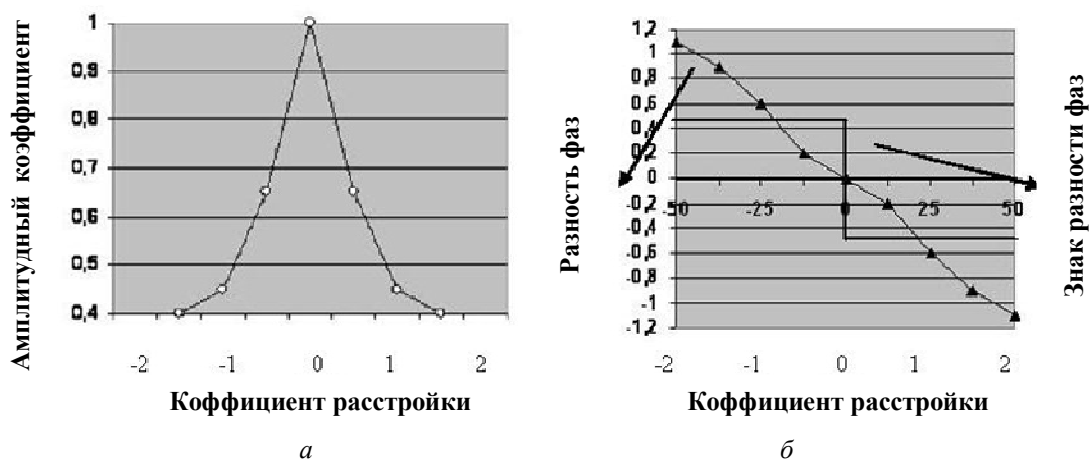


Рис. 2. Амплитуда (а), разность фаз и знак фазы (б) огибающей разностной частоты двухчастотного зондирующего излучения как функция расстройки от центральной частоты ВРБ

3. ОБРТ параллельной структуры на базе ВРБ с π -сдвигом. Технология волоконно-оптических рефрактометров на основе ВРБ становится одной из самых востребованных в биологических и химических информационно-измерительных системах. Однако существенная чувствительность ВРБ к температурным изменениям приводит к значительным погрешностям в измерении коэффициента преломления (КП). В связи с этим актуальной становится задача одновременного измерения как КП, так и температуры.

При исследовании процесса гибридизации ДНК, который длится более получаса, в условиях квазистабильной по тепловому режиму лаборатории необходим прецизионный контроль температуры, определяющей стабильность параметров зондирующего сигнала. При экспресс-контроле химических сред, например, определении октанового числа топлива, датчик погружается в материал с отличной от окружающей среды температурой, что вызывает мгновенное изменение его выходного сигнала под воздействием изменений обоих факторов.

Разработан широкий спектр волоконно-оптических датчиков рефрактометрического типа для одновременного измерения КП и температуры, отличных по применяемым типам сенсоров, модовому взаимодействию, конструкции. Следует выделить рефрактометры на ВРБ и длиннопериодных (ДП) ВРБ, основанные соответственно на взаимодействии мод сердцевины и мод сердцевины и оболочки. Как правило, это датчики, построенные на основе последовательно соединенных ВРБ, ДП ВРБ, их секций или их комбинаций с различными по параметрической чувствительности покрытиями. Кроме указанных комбинаций существуют комбинации решеток и волоконно-оптических интерферометров, например, Фабри-Перо или Маха-Цандера [12, 13].

Все приведенные конструкции представляют собой биосенсоры рефрактометрического типа последовательной структуры, основанные на одном принципе, измерении сдвига двух длин волн или их разности, при этом каждая из этих волн более чувствительна к одному из параметров, чем к другому. Такой принцип измерений требует вы-

сокобюджетной измерительной аппаратуры, включающей широкополосный стабильный источник излучения, анализатор спектра, программное обеспечение для обработки и повышения разрешающей способности измерений.

С учетом рассмотренных положений нами предложена параллельная структура ОБРТ, основанная на использовании ВРБ с π -сдвигом и двухчастотном методе зондирования как ее центрального лоренцевского контура пропускания, так и внешнего гауссова контура отражения. Обработка сигнала ведется для огибающих на соответствующих промежуточных частотах для каждого из контуров. При этом формируется двухконтурная система измерений с «грубым» гауссовским и «точным» лоренцевским контурами. Структура ОБРТ показана на рис. 3, а структура датчика специальной формы – на рис. 4.

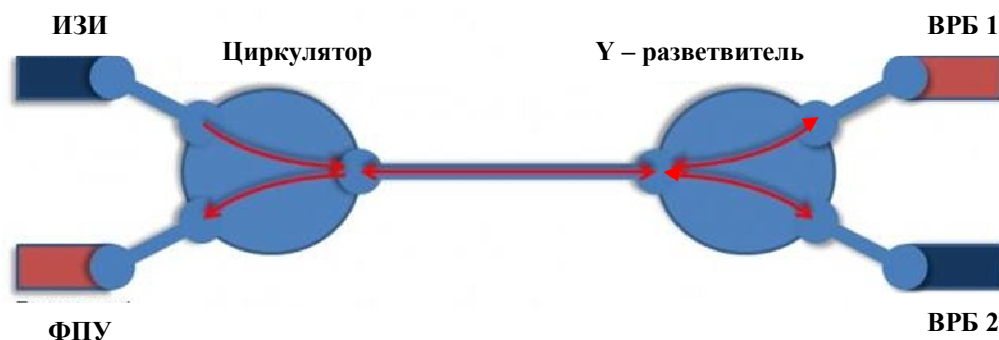


Рис. 3. Структурная схема ОБРТ параллельной структуры

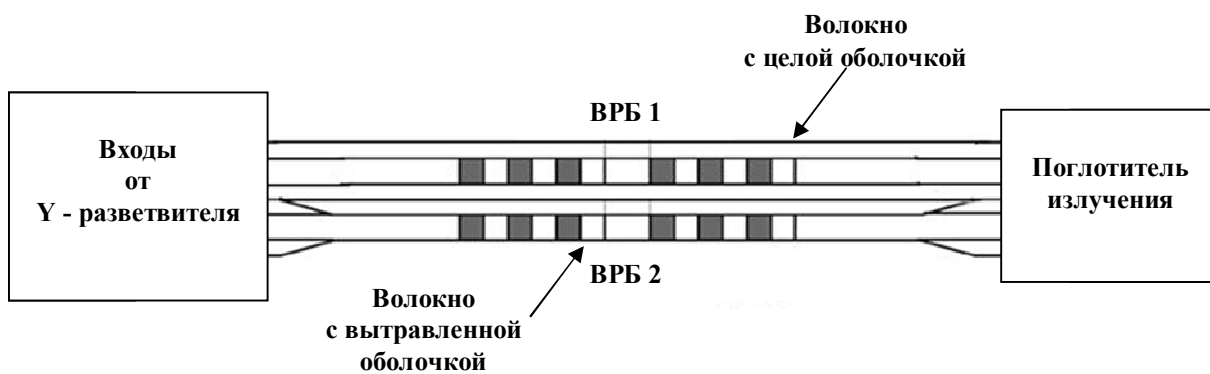


Рис. 4. Структура датчика ОБРТ параллельной структуры

Центральные длины волн решеток ВРБ1 и ВРБ2 при одинаковой температуре отличаются в силу вытравливания в ВРБ2 оболочки волокна на определенную глубину. На уровне зондирования это выражается в необходимости использования двух источников двухчастотного излучения, настроенных соответственно на длины волн λ_1 и λ_2 , и решения уравнения раздельно для температуры и коэффициента преломления аналогично задаче для сдвоенных решеток [30].

В этом случае расстройкам, полученным при двухчастотном зондировании на каждой из длин волн, не ставится в соответствие какой-либо из физических параметров, а проводится дополнительная процедура вычислений по следующим алгоритмам.

Выходные сигналы U_{R_1} и U_{R_2} для огибающих на промежуточных частотах описываются следующими выражениями

$$U_{R_1} = \delta_{T1}(\lambda_1)T + \delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)n_{eff}, \quad (6)$$

$$U_{R_2} = \delta_{T2}(\lambda_2)T + \delta_{n_{eff}2}(\lambda_2)n_{eff}, \quad (7)$$

где $\delta_{T1}(\lambda_1), \delta_{n_{eff}1}(\lambda_1), \delta_{T2}(\lambda_2), \delta_{n_{eff}2}(\lambda_2)$ – известные коэффициенты на измерительных характеристиках, соответствующие зависимостям расстройки решеток, предварительно настроенных на длины волн λ_1 и λ_2 по температуре и эффективному коэффициенту преломления.

Отсюда

$$T = \frac{U_{R1}\delta_{n_{eff}2}(\lambda_2) - U_{R2}\delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)}{\delta_{T1}(\lambda_1)\delta_{n_{eff}2}(\lambda_2) - \delta_{T2}(\lambda_2)\delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)}, \quad (8)$$

$$n_{eff} = \frac{U_{R2}\delta_{T1}(\lambda_1) - U_{R1}\delta_{T2}(\lambda_2)}{\delta_{T1}(\lambda_1)\delta_{n_{eff}2}(\lambda_2) - \delta_{T2}(\lambda_2)\delta_{n_{eff}1}(\lambda_1)}. \quad (9)$$

Эти математические вычисления выполняются в программном блоке ОБРТ и позволяют одновременно получить значения параметров температуры и эффективного коэффициента преломления в зоне расположения ВРБ1 и ВРБ2. Коэффициент преломления исследуемого материала (окружающей ОБРТ среды) n_{amb} может быть определен по полученному n_{eff} и известным коэффициенте преломления сердцевины n_{co} и радиусе a_{cl} оболочки вытравленного волокна по процедуре, описанной в [23].

Моделирование ОБРТ параллельной структуры проводилось в программных оболочках OptiGrating и OptiSystem фирмы Optiwave. На рис. 5 показаны результаты моделирования ВРБ с π -сдвигом в пакете OptiGrating, которые в дальнейшем использовались для моделирования всего ОБРТ в пакете OptiSystem, в соответствии со структурной схемой рис. 3.

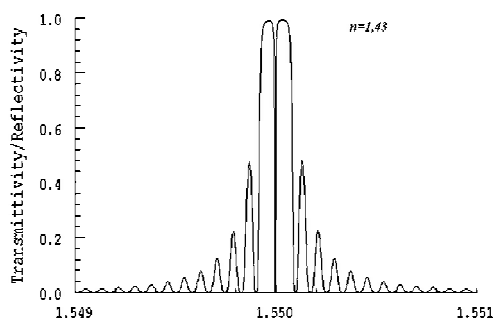


Рис. 5. Спектральная характеристика ВРБ с π -сдвигом

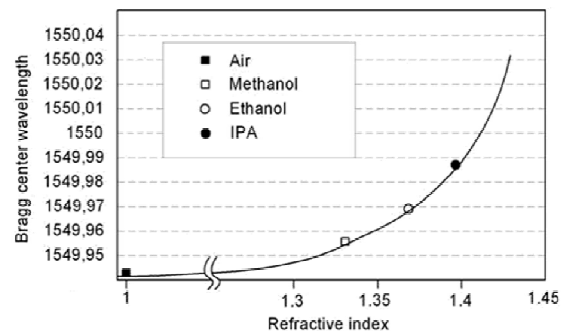


Рис. 6. Зависимость сдвига центральной длины волны ВРБ от показателя преломления вещества, окружающего ОБРТ

Результаты моделирования ОБРТ показаны на рис. 6 и демонстрируют «красный» сдвиг центральной длины волны ВРБ относительно воздуха (air, $n=1$) для метанола (methanol, $n=1,326$), этанола (ethanol, $n=1,359$) и изопропилового спирта (IPA, $n=1,378$).

При аппроксимации данной характеристики полученный отклик биосенсора составляет $\Delta\lambda/\lambda = 0,6$ нм, что позволяет при нестабильности длины волны источника зондирующего излучения в сотни кГц (8×10^{-3} пм) говорить о детектировании изменений коэффициента преломления на уровне $1,3 \times 10^{-5}$.

По сравнению с результатами, полученными другими авторами [4], динамический диапазон сдвига центральной волны решетки меньше, но достаточен для получения требуемого разрешения измерений. С другой стороны, зондирование такого типа ОБРТ может быть реализовано узкополосными лазерами (кГц или МГц) с разностной частотой двухчастотного излучения, формируемого модулятором Маха-Цандера в мега- или гигагерцовом диапазоне. Таким образом, при обработке на промежуточной частоте может быть достигнуто увеличение отношения сигнал/шум измерений в 10–50 раз. Данное утверждение было подтверждено первыми практическими результатами, полученными на ОБРТ, изготовленными на основе волокон фирмы Corning SMF-28 и модуляторов Маха-Цандера, изготовленных в НППК (Пермь).

Основной проблемой измерений оказалась температурная и сигнальная нестабильность рабочей точки модулятора Маха-Цандера. Уход температуры на 1–2 °С приводил к сдвигу положения рабочей точки на 0,9–1 В и изменению спектрального состава выходного двухчастотного излучения с увеличением коэффициента нелинейных искажений до 10 %. Для стабилизации рабочей точки использовалась система контроля промежуточной частоты выходного двухчастотного излучения. В случае ухода рабочей точки в выходном спектре излучения появлялась составляющая на частоте в два раза меньше промежуточной. Точность отслеживания определялась чувствительностью оптического анализатора спектра и составляла сотые доли процента.

Заключение. Были предложены методы и средства улучшения метрологических и эксплуатационных характеристик оптических биосенсоров рефрактометрического типа, основанные на использовании в них волоконных решеток Брэгга с фазовым π -сдвигом и модуляционных методов измерений их спектральных характеристик при зондировании двухчастотным излучением. Полученный отклик биосенсора по аппроксимированной характеристике составил $\Delta\lambda/\lambda = 0,6$ нм, что позволяет при нестабильности длины волны высокостабильного источника зондирующего излучения в сотни кГц (8×10^{-3} пм) говорить о детектировании изменений коэффициента преломления на уровне $1,3 \times 10^{-5}$. Такой датчик может найти применение в широком спектре приложений, включая биохимию, контроль окружающей среды, криминалистику и т.д.

Список литературы

1. Xudong, F. Sensitive optical biosensors for unlabeled targets: a review / F. Xudong, I. M. White, S. I. Shopova et al. // *Analytica Chimica Acta*. – 2008. – № 620. – P. 8–26.
2. Chryssis, A. N. Detecting hybridization of DNA by highly sensitive evanescent field etched core fiber bragg grating sensor / A. N. Chryssis, S. S. Saini, S. M. Lee et al. // *IEEE Journal of Selected Topics in QE*. – 2005. – V. 11. – № 4. – P. 864–872.
3. Hine, A. V. Optical fibre-based detection of DNA hybridization / A. V. Hine, C. Xianfeng, M. D. Hughes et al. // *Biochem. Soc. Trans.* – 2009. – V. 37. – P. 445–449.
4. Wei, L. Highly sensitive fiber Bragg grating refractive index sensors / L. Wei, H. Yanyi, X. Yong, R. K. Lee, A. Yariv // *Applied Physics Letters*. – 2005. – V. 86. – P. 151122.
5. Ming, Li. Multichannel notch filter based on phase-shifted phase-only-sampled fiber Bragg grating / Li. Ming, Li. Hongpu, Y. Painchaud // *Optics Express*. – 2008. – V. 16. – № 23. – P. 19388–19394.
6. Zhou, K. High-sensitivity optical chemsonor based on etched D-fibre Bragg gratings / K. Zhou, X. Chen, L. Zhang, I. Bennion // *Electron. Lett.* – 2004. – V. 40. – P. 232–234.
7. Chen, X. Dual-peak LPFG with enhanced refractive index sensitivity by finely tailored mode dispersion that uses the light cladding etching technique / X. Chen, K. Zhou, L. Zhang, I. Bennion // *Applied Optics*. – 2007. – V. 46. – P. 451–455.

8. *Morozov, O. G.* Methodology of symmetric double frequency reflectometry for selective fiber optic structures / O. G. Morozov, O. G. Natanson, D. L. Aybatov et al. // *Proceedings of SPIE*. – 2008. – V. 7026. – P. 70260I.
9. *Morozov, O. G.* Metrological aspects of symmetric double frequency and multi frequency reflectometry for fiber Bragg structures / O. G. Morozov, O. G. Natanson, D. L. Aybatov et al. // *Proceedings of SPIE*. – 2008. – V. 7026. – P. 70260J.
10. *Yang, B.* Fiber bragg grating sensor for simultaneous measurement of strain and temperature / B. Yang, X. Tao, J. Yu // *Journal of Industrial Textiles*. – 2004. – V. 34. – № 2. – P. 97–115.
11. *Srimannarayana, K.* Fiber bragg grating and long period grating sensor for simultaneous measurement and discrimination of strain and temperature effects / K. Srimannarayana, M. Sai Shankar, R. L. N. Sai Prasad et al. // *Optica Applicata*. – 2008. – V. 38. – № 3. – P. 601–606.
12. *Yu, F. T. S.* Fiber Optic Sensors / F. T. S. Yu, S. Yin. – New York: Marcel Dekker, 2002. – 510 p.
13. *Vengsarkar, A. M.* Long-period Fiber Gratings as band rejection filters / A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins et al // *Lightwave Technology*. – 2007. – V. 14. – № 1. – P. 58–65.
14. *Bomse, D. S.* Frequency-Modulation and Wavelength Modulation Spectroscopies – Comparison of Experimental Methods Using a Lead-Salt Diode-Laser / D. S. Bomse, A. C. Stanton, J. A. Silver // *Appl. Opt.* – 1992. – V. 31. – P. 718–731.
15. *Pavone, F. S.* Frequency-Modulation and Wavelength-Modulation Spectroscopies – Comparison of Experimental Methods Using an AlGaAs Diode-Laser / F. S. Pavone, M. Inguscio // *Appl. Phys. B*. – 1993. – V. 56. – P. 118–122.
16. *Li, H. J.* Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases / H. J. Li, G. B. Rieker, X. Liu, J. B. Jeffries, R. K. Hanson // *Opt.* – 2006. – V. 45. – P. 1052–1061.
17. *Морозов, О. Г.* ЛЧМ-лидар с преобразованием частоты / Г. И. Ильин, О. Г. Морозов, Ю. Е. Польский // *Оптика атмосферы и океана*. – 1995. – Т. 8. – № 12. – С. 1871–1874.
18. *Morozov, O. G.* Two frequency oscillator for interferometers with polarisation dived channels / G. I. Il'in, O. G. Morozov, Yu. E. Pol'skii // *Proceedings of SPIE*. – 1996. – V. 2782. – P. 814–818.
19. *Morozov, O. G.* Two-frequency scanning of FBG with arbitrary reflection spectrum / O. G. Morozov, D. L. Aibatov // *Proceedings of SPIE*. – 2007. – V. 6605. – P. 660506.
20. *Aybatov, D. L.* Distributed temperature fiber Bragg grating sensor / D. L. Aybatov, R. R. Kiyamova, O. G. Morozov et al. // *Proceedings of SPIE*. – 2009. – V. 7374. – P. 73740B.
21. *Kashyap, R.* Fiber Bragg Gratings / R. Kashyap. – London: Academic Press, 2009. – 632 p.
22. *Wang, X.* Sampled phase-shift fiber Bragg gratings / X. Wang, C. Yu, Z. Yu, Q. Wu // *Chinese optical letters*. – 2004. – V. 2. – № 4. – P. 190–191.
23. *Yariv, A.* Optical Electronics in Modern Communications / A. Yariv. – New York: Oxford University Press, 1997. – 768 p.
24. *Kersey, A.* Fiber Grating Sensors / A. Kersey, M. A. Davis, H. J. Patrick et al. // *J. Lightwave Technol.* – 1997. – V. 15. – P. 1442–1463.
25. *Rao, Y. J.* In-fibre Bragg grating sensors / Y. J. Rao // *Meas. Sci. Technol.* – 1997. – V. 8. – P. 355–375.
26. *Zalyalov, R. G.* Optical frequency domain reflectometer for fiber structural testing / R. G. Zalyalov, R. A. Akhtiamov, G. A. Morozov et al. // *Proceedings of SPIE*. – 1999. – V. 3824. – P. 274–279.
27. *Natanson, O. G.* Development problems of frequency reflectometry for monitoring systems of optical fiber structures / O. G. Natanson, O. G. Morozov, R. A. Akhtiamov et al. // *Proceedings of SPIE*. – 2005. – V. 5854. – P. 215–223.
28. *Gagliardi, G.* Fiber Bragg grating strain sensor interrogation using laser radio frequency modulation / G. Gagliardi, M. Salza, P. Ferraro, P. De Natale // *Optics Express*. – 2005. – V. 13. – № 7. – P. 2377–2384.
29. Пат. 92180 Российская Федерация МПК7 G01/K 11/32. Устройство для измерения параметров физических полей / Морозов О. Г., Морозов Г. А., Куревин В. В., Просвирин В. П., Смирнов А. С., Алюшина С. Г.; заявитель и патентообладатель ГОУ ВПО ПГУТИ. № 2009137812/22; заявл. 12.10.09; опубл. 10.03.10, Бюл. № 7. – 2 с.: ил.
30. *Куревин, В. В.* Структурная минимизация волоконно-оптических сенсорных сетей экологического мониторинга / В. В. Куревин, О. Г. Морозов, В. П. Просвирин и др. // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2009. – Т. 7. – № 3. – С. 46–52.

Статья поступила в редакцию 12.11.10.

O. G. Morozov, O. A. Stepushchenko, I. R. Sadykov

**MODULATION METHODS OF MEASUREMENTS
IN OPTICAL BIOSENSORS OF REFRACTOMETRIC TYPE ON BASIS
OF FIBER BRAGG GRATINGS WITH PHASE-SHIFT**

The possibility of the resolution increase up to 0, 005 nm, the tenfold-hundredfold sensitivity increase and the possibility of the considerable simplification of the survey technique in optical biosensors of a refractometric type constructed on the basis of fiber Bragg gratings are shown. The given values of the improvement of metrological and operating characteristics were achieved by the application of fiber Bragg gratings with a phase π -shift in biosensors of the mentioned type and the use of double-frequency radiation received by means of modulation methods for their sounding.

Key words: optical biosensor, refractometry, fiber Bragg grating, π -shift, resolution, double-frequency sounding, sensitivity, modulation methods of measurements.

МОРОЗОВ Олег Геннадьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем Казанского государственного технического университета им А. Н. Туполева. Область научных интересов – информационно-измерительные и телекоммуникационные системы оптического и микроволнового диапазонов. Автор более 120 публикаций.

E-mail: microoil@mail.ru

СТЕПУЩЕНКО Олег Александрович – заместитель министра внутренних дел по Республике Татарстан. Область научных интересов – совершенствование и разработка инновационных технических средств для проведения судебно-психофизиологических экспертиз. Автор 15 публикаций.

E-mail: soa_oleg@mail.ru

САДЫКОВ Искандер Рустемович – бакалавр техники и технологий, магистрант Казанского государственного технического университета им А. Н. Туполева. Область научных интересов – волоконно-оптические информационно-измерительные и телекоммуникационные системы. Автор 12 публикаций.

E-mail: iskander_@list.ru

УДК 621.391.25

А. Ю. Чернышев

НЕДВОИЧНЫЕ ЛИНЕЙНЫЕ БЛОКОВЫЕ КОДЫ С ПРОИЗВОЛЬНЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ ПОРОЖДАЮЩИХ МАТРИЦ

Показана возможность практического применения недвоичных линейных блочных кодов с произвольными значениями коэффициентов порождающих матриц. Определены условия, предъявляемые к структуре порождающих матриц таких кодов с целью обеспечения однозначности кодирования и сводящиеся к игнорированию так называемых вырождающих множителей или делителей нуля. Получены и на основе вычислительных экспериментов проверены условия и возможные варианты построения проверочных матриц, используемых при синдромном декодировании.

Ключевые слова: линейный блочный код, недвоичный код, конечное числовое пространство, порождающая матрица кода, проверочная матрица кода, синдромное декодирование.

Введение. В помехозащищенных системах передачи информации долгое время используются методы избыточного кодирования. Среди применяемых кодов наиболее распространены двоичные линейные блочные коды, которые хорошо сочетаются с цифровыми методами и средствами формирования и обработки сигналов. С учетом интенсивного развития и применения цифровых инфокоммуникационных систем с многоуровневыми видами модуляции определенные перспективы использования имеют недвоичные блочные коды. Возможность формирования и применения недвоичных кодов, описываемых классическими порождающими матрицами, определенными в двоичном пространстве и содержащими соответственно только 0 и 1, является доказанной [1].

Целью данной работы является проверка возможности практического применения недвоичных линейных блочных кодов, определяемых порождающими матрицами с произвольными коэффициентами из числа элементов конечного пространства $GF(M)$.

Общие принципы линейного блочного кодирования в пространствах $GF(M)$. Процедура кодирования при помощи произвольного линейного блочного кода (ЛБК), обозначаемого (N, K) , в пространстве $GF(M)$ описывается выражением [1]

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

где $\mathbf{x} = \{x_n : x_n \in [0 \dots M-1], n \in [1 \dots N]\}$ – выходное кодовое слово длиной N ; $\mathbf{b} = \{b_k : b_k \in [0 \dots M-1], k \in [1 \dots K]\}$ – входное информационное слово длиной K ; $\mathbf{G}$ – порождающая матрица ДЛБК размерами $K \times N$; $\bullet$ – операция скалярного произведения в конечном числовом пространстве $GF(M)$, в общем случае определяемая выражением

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

Порождающая матрица $\mathbf{G}$ как достаточное описание кода в общем случае имеет вид

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

Коэффициенты порождающей матрицы g_{kn} двоичного ЛБК, а также произвольных ЛБК, имеющие значения только 0 или 1, фактически означают участие или неучастие того или иного элемента входного слова b_k в формировании конкретного элемента кодового слова x_n . Роль коэффициентов g_{kn} , очевидно, расширяется, если они способны принимать значения от 0 до $M-1$.

Полным описанием кода является его алфавит $\mathbf{X}$, образованный совокупностью кодовых слов $\mathbf{x}$, соответствующих всем возможным информационным словам $\mathbf{b}$ и вычисляемых в соответствии с выражениями (1) и (2).

Как известно, любой линейный блочный код можно привести к систематической форме [2] путем соответствующей перестановки столбцов алфавита $\mathbf{X}$ [3]. При этом порождающая матрица приводится к канонической форме $\mathbf{G} = (\mathbf{I}:\mathbf{P})$ или $\mathbf{G} = (\mathbf{P}:\mathbf{I})$. Следует отметить, что в результате систематизации путем перестановки столбцов общие свойства кода (минимальное кодовое расстояние, кодовая скорость и др.) не изменяются. С учетом систематического характера ЛБК и определения порождающей матрицы в пространстве $GF(M)$ ее можно представить в виде

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \dots & 0 & p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1(N-K)} \\ 0 & w_2 & \dots & 0 & p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2(N-K)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & w_K & p_{K1} & p_{K2} & \dots & p_{K(N-K)} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Результаты экспериментальной проверки состоятельности избыточных кодов. Необходимым условием состоятельности, т.е. возможности практического применения избыточных кодов, является наличие только одного нулевого элемента в каждой строке и в каждом столбце таблицы кодовых расстояний. При этом нулевые элементы образуют главную диагональ таблицы (матрицы) расстояний.

Проверка проводилась на большинстве возможных типов ЛБК (4, 3) с порождающими матрицами вида (3), определяемых в пространстве $GF(4)$ в соответствии с некоторыми описанными ниже критериями.

Наряду с кодом, определяемым классической порождающей матрицей

$$\mathbf{G}_{11} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix},$$

полную состоятельность продемонстрировали коды с одним проверочным элементом, определяемые матрицами

$$\mathbf{G}_{12} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 1 & 2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_{13} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 1 & 3 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_{31} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 3 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{G}_{32} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 3 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 3 & 2 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{G}_{33} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & 3 \end{bmatrix}.$$

Помимо выполнения критерия наличия нулевых элементов только в главной диагонали матрицы кодовых расстояний, коды на основе всех шести приведенных выше порождающих матриц обладают одинаковыми значениями минимального кодового расстояния ($d_{\min}=2$).

Непригодными для практического применения оказались коды с порождающими матрицами

$$\mathbf{G}_{21} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 1 \end{bmatrix}; \mathbf{G}_{22} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 2 & 2 \end{bmatrix}; \mathbf{G}_{23} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 3 \end{bmatrix}.$$

Так, при исследовании ЛБК на основе матрицы $\mathbf{G}_{22}$ выявлены дополнительные нулевые элементы в каждой строке и, следовательно, в каждом столбце таблицы расстояний. Например, из различных информационных слов $\mathbf{b}_1=(000)$ и $\mathbf{b}_2=(222)$ образуется одно и то же кодовое слово $\mathbf{x}=(0000)$. Тот же эффект обнаружен и в ЛБК на основе матриц $\mathbf{G}_{21}$ и $\mathbf{G}_{23}$. В обоих кодах различным информационным словам $\mathbf{b}_1=(000)$ и $\mathbf{b}_2=(022)$ соответствует одно и то же кодовое слово $\mathbf{x}=(0000)$.

Подобные результаты были получены и могут быть продемонстрированы и для других типов порождающих матриц, других классов линейных блочных кодов и других пространств. Несостоятельные, т.е. непригодные для практического применения, коды характеризуются одним общим структурным свойством порождающих матриц: подматрица прямого транспонирования информационных символов содержит особенные коэффициенты, являющиеся в данном пространстве так называемыми вырождающими множителями.

Следует отметить, что даже при наличии в обеих подматрицах порождающей матрицы вырождающих множителей код может обладать существенными корректирующими свойствами. Например, код (7, 3), определяемый в пространстве $GF(4)$ порождающей матрицей

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 2 & 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 3 \\ 0 & 2 & 0 & 2 & 0 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 2 & 3 \end{bmatrix},$$

имеет минимальное кодовое расстояние $d_{\min}=4$. Следовательно, наличие или отсутствие в порождающей матрице вырождающих множителей нельзя рассматривать в качестве абсолютного критерия применимости не двоичного линейного кода. Хотя, как будет ниже показано, от этого зависит реализуемость того или иного метода декодирования, в частности, синдромного.

Таблицы умножения конечных числовых пространств и их анализ. Предварительный анализ результатов, полученных для различных классов ЛБК, типов порождающих матриц и числовых пространств, позволил выдвинуть гипотезу, что причиной получения одних и тех же кодовых слов из различных информационных является специфика умножения чисел в пространствах $GF(M)$ с $M \geq 2$.

Из приведенных на рис. 1 таблиц сложения и умножения чисел в конечных пространствах $GF(2)$, $GF(3)$ и $GF(4)$ видно, что каждая строка и, соответственно, каждый

столбец таблицы сложения содержат все возможные элементы данного пространства. Это свойство соблюдается и в таблицах умножения в пространствах $GF(2)$ и $GF(3)$ для ненулевых множителей. В отличие от них таблица умножения в пространстве $GF(4)$ в строке и в столбце, соответствующих множителю 2, содержит только два (0 и 2) из четырех возможных значений. Это совпадает с представленными ранее результатами исследования порождающих матриц, определенных в пространстве $GF(4)$. Именно при использовании коэффициентов 2 в подматрице прямого транспонирования линейный блочный код становится несостоятельным.

а)

+	0	1
0	0	1
1	1	0

б)

×	0	1
0	0	0
1	0	1

в)

+	0	1	2
0	0	1	2
1	1	2	0
2	2	0	1

г)

×	0	1	2
0	0	0	0
1	0	1	2
2	0	2	1

д)

+	0	1	2	3
0	0	1	2	3
1	1	2	3	0
2	2	3	0	1
3	3	0	1	2

е)

×	0	1	2	3
0	0	0	0	0
1	0	1	2	3
2	0	2	0	2
3	0	3	2	1

Рис. 1. Таблицы сложения и умножения чисел в конечных числовых пространствах $GF(2)$ (а, б), $GF(3)$ (в, г) и $GF(4)$ (д, е)

a)

×	0	1	2	3	4
0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4
2	0	2	4	1	3
3	0	3	1	4	2
4	0	4	3	2	1

б)

×	0	1	2	3	4	5
0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5
2	0	2	4	0	2	4
3	0	3	0	3	0	3
4	0	4	2	0	4	2
5	0	5	4	3	2	1

Рис. 2. Таблицы умножения чисел в конечных числовых пространствах $GF(5)$ (а), $GF(6)$ (б), $GF(7)$ (в) и $GF(8)$ (г)

в)

×	0	1	2	3	4	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6
2	0	2	4	6	1	3	5
3	0	3	6	2	5	1	4
4	0	4	1	5	2	6	3
5	0	5	3	1	6	4	2
6	0	6	5	4	3	2	1

г)

×	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	1	2	3	4	5	6	7
2	0	2	4	6	0	2	4	6
3	0	3	6	1	4	7	2	5
4	0	4	0	4	0	4	0	4
5	0	5	2	7	4	1	6	3
6	0	6	4	2	0	6	4	2
7	0	7	6	5	4	3	2	1

Окончание рис. 2. Таблицы умножения чисел в конечных числовых пространствах $GF(5)$ (а), $GF(6)$ (б), $GF(7)$ (в) и $GF(8)$ (г)

С целью выявления общей закономерности появления вырождающих множителей были построены и проанализированы таблицы умножения в пространствах $GF(M)$ с $5 \leq M \leq 16$. Часть из них приведены на рис. 2. Из них видно, что в пространствах $GF(5)$ и $GF(7)$ вырождающих множителей нет так же, как и в пространствах $GF(2)$ и $GF(3)$, а затем $GF(11)$ и $GF(13)$. В остальных рассмотренных пространствах вырождающие множители существуют и совпадают с делителями нуля данных пространств: в пространстве $GF(6)$ – 2, 3, 4; в пространстве $GF(8)$ – 2, 4, 6, 8. Делители нуля всех рассмотренных пространств представлены в таблице.

Делители нуля конечных числовых пространств $GF(M)$

M	Делители нуля	M	Делители нуля	M	Делители нуля
2	нет	7	нет	12	2, 3, 4, 6, 8, 9, 10
3	нет	8	2, 4, 6	13	нет
4	2	9	3, 6	14	2, 4, 6, 7, 8, 10, 12
5	нет	10	2, 4, 5, 6, 8	15	3, 5, 6, 9, 10, 12
6	2, 3, 4	11	нет	16	2, 4, 6, 8, 10, 12, 14

Как видно из таблицы, вырождающими множителями (делителями нуля) для произвольного пространства $GF(M)$ являются простые делители числа M (за исключением 1) и кратные им числа, т.е. делители чисел $K \cdot M$, где K – элементы пространства $GF(M)$, превышающие 1. Например, простыми неединичными делителями числа $M=12$ являются числа 2 и 3. Кратные им числа 4, 6, 8, 10 и 6, 9 образуются путем умножения 2 и 3 на другие целые числа (соответственно, 2, 3, 4, 5 и 2, 3). Таким образом, в пространстве $GF(12)$ делителями нуля являются числа 2, 3, 4, 6, 8, 9 и 10.

Синдромное декодирование недвоичных кодов с произвольными коэффициентами порождающих матриц. Синдромное декодирование произвольных ЛБК в пространстве $GF(M)$ можно представить произведением

$$\mathbf{s} = \mathbf{y} \bullet \mathbf{H}, \quad (4)$$

где $\mathbf{s} = \{s_m : s_m \in [0 \dots M-1], m \in [1 \dots N-K]\}$ – синдром (вектор признаков ошибки); $\mathbf{y} = \{y_n : y_n \in [0 \dots M-1], n \in [1 \dots N]\}$ – принятое с учетом возможных ошибок кодовое слово; $\mathbf{H} = \{h_{nm} : h_{nm} \in [0 \dots M-1], n \in [1 \dots N], m \in [1 \dots N-K]\}$ – проверочная матрица ЛБК размерами $N \times (N-K)$; $\bullet$ – операция скалярного произведения, в данном случае определяемая выражением

$$s_j = \left(\sum_{n=1}^N y_n \cdot h_{nj} \right) \bmod M, \quad j = 1, 2, \dots, N-K. \quad (5)$$

При использовании канонической порождающей матрицы вида (3) проверочная матрица должна иметь соответствующую структуру [3], а именно

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & \dots & q_{1(N-K)} \\ q_{21} & q_{22} & \dots & q_{2(N-K)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ q_{K1} & q_{K2} & \dots & q_{K(N-K)} \\ v_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & v_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & v_{N-K} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

При этом должно выполняться условие

$$\mathbf{G} \bullet \mathbf{H} = \mathbf{0}, \quad (7)$$

означающее получение нулевого синдрома при отсутствии ошибок в канале передачи. С учетом взаимосвязи структуры матриц $\mathbf{G}$ и $\mathbf{H}$ [3, 4], справедливой и для недвоичных систематических ЛБК, общее условие (7) можно привести к системе частных условий

$$w_i \cdot q_{ij} + v_j \cdot p_{ij} = 0, \quad i = 1 \dots K, \quad j = 1 \dots N-K. \quad (8)$$

Система (8) имеет два тривиальных варианта решения в зависимости от типа выбираемых противоположных элементов:

$$\text{а) } p_{ij} = q_{ij} \quad \forall i, j; \quad w_i = W \quad \forall i; \quad v_j = V \quad \forall j; \quad V = -W; \quad (9)$$

$$\text{б) } p_{ij} = -q_{ij} \quad \forall i, j; \quad w_i = W \quad \forall i; \quad v_j = V \quad \forall j; \quad V = W. \quad (10)$$

Необходимо отметить, что знак « $-$ » в выражениях (9) и (10) означает противоположный элемент в пространстве $GF(M)$.

Общее решение системы уравнений (8) при произвольных значениях коэффициентов матриц $\mathbf{G}$ и $\mathbf{H}$ имеет вид

$$q_{ij} = \frac{-v_j \cdot p_{ij}}{w_i} = -v_j \cdot p_{ij} \cdot w_i^{-1}, \quad i = 1 \dots K, \quad j = 1 \dots N-K, \quad (11)$$

или

$$p_{ij} = \frac{-w_i \cdot q_{ij}}{v_j} = -w_i \cdot q_{ij} \cdot v_j^{-1}, \quad i = 1 \dots K, \quad j = 1 \dots N-K, \quad (12)$$

где a^{-1} – обратный к a в пространстве $GF(M)$ элемент. Так, например, в пространстве $GF(4)$ порождающей матрице

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 3 & 3 \\ 0 & 3 & 0 & 1 & 0 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & 3 & 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}$$

однозначно соответствует проверочная матрица

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 1 & 3 \\ 3 & 0 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 \\ 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 \end{bmatrix},$$

полученная на основании выражения (11). Следует отметить, что наличие в выражениях (11) и (12) обратных элементов к коэффициентам w_i и v_j еще раз подтверждает ранее выдвинутую гипотезу о неприменимости в подматрицах прямого транспонирования делителей нуля.

Тривиальные решения (9) и (10), как установлено в результате общего анализа, являются частным случаем общих решений (11) и (12). Их особенностью является внутренняя однородность подматриц прямого транспонирования (модифицированных единичных подматриц) и взаимная однородность дополняющих их подматриц.

Адекватность полученных вариантов построения порождающих и проверочных матриц подтверждена в ходе вычислительного эксперимента с кодами Хэмминга и кодами на основе М-последовательностей, модифицированными с учетом конечного числового пространства $GF(4)$.

Частным случаем рассмотренной выше общей теории также являются и двоичные линейные блочные коды. Отличительной особенностью пространства $GF(2)$ является то, что 0 и 1 являются противоположными по отношению к самим себе.

В заключение необходимо также отметить, что именно порождающие матрицы вида $\mathbf{G} = (\mathbf{W} \cdot \mathbf{I} \cdot \mathbf{P})$ использовались при оценке состоятельности соответствующих недвоичных ЛБК.

Выводы. Наряду с двоичными линейными блочными кодами и недвоичными блочными кодами с двоичными коэффициентами порождающих матриц на практике могут использоваться недвоичные блочные коды с произвольными значениями коэффициентов.

Среди ненулевых коэффициентов порождающих матриц недвоичных линейных блочных кодов можно выделить особую группу вырождающих, при наличии которых в порождающей матрице код может оказаться неприменимым из-за нулевого значения минимального кодового расстояния. Вырождающими множителями некоторого числового пространства $GF(M)$ являются делители нуля в данном пространстве.

Как и для других линейных блочных кодов, для недвоичных кодов с произвольными значениями коэффициентов порождающей матрицы применимо синдромное декодирование при помощи проверочных матриц.

Проверочные матрицы недвоичных линейных блочных кодов с произвольными коэффициентами должны удовлетворять следующим условиям:

- структура проверочной матрицы, а именно порядок расположения столбцов, однозначно определяется структурой порождающей матрицы, а именно порядком расположения строк, согласно известным правилам соответствия;
- отличные от нуля элементы модифицированной единичной подматрицы не должны являться делителями нуля данного числового пространства;
- произведения соответствующих элементов подматриц прямого транспонирования и дополняющих их подматриц в соответствии с полученным условием (8) должны быть противоположными.

Список литературы

1. Чернышев, А. Ю. Формирование, характеристики и применение недвоичных линейных блоковых кодов с двоичными порождающими матрицами / А. Ю. Чернышев, Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова; Марийск. госуд. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2010. – 21 с. – Деп. в ВИНТИ 15.03.2010 №155-B2010.
2. Золотарев, В. В. Помехоустойчивое кодирование: методы и алгоритмы: справочник / В. В. Золотарев, Г. В. Овечкин. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 126 с.
3. Петухова, Е. В. Формирование и взаимные преобразования порождающих и проверочных матриц линейных блоковых кодов / Е. В. Петухова, Ю. В. Сушенцова, А. Ю. Чернышев // Вестник МарГТУ. Сер.: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2009. – №3. – С. 13–22.
4. Охотникова, Н. М. Обобщенный алгоритм формирования проверочных матриц линейных блоковых кодов / Н. М. Охотникова, А. Ю. Чернышев; Марийск. госуд. техн. ун-т. – Йошкар-Ола, 2008. – 11 с. – Деп. в ВИНТИ 18.02.08 №133-B2008.

Статья поступила в редакцию 21.05.10.

A. Y. Chernyshev

NONBINARY LINEAR BLOCK CODES WITH ARBITRARY COEFFICIENTS OF GENERATING MATRIXES

The possibility of the practical application of nonbinary linear block codes with arbitrary values of coefficients of generating matrixes has been shown. The conditions required for the structure of generating matrixes of such codes with the aim of the assurance of single-valuedness coding and reduced to eliminating so-called degenerate multipliers or zero divisors are determined. The conditions and possible variants of building of check matrixes used at syndrome decoding were received and checked on the basis of computing experiments.

Key words: linear block code, nonbinary code, finite number space, generating matrix of the code, check matrix of the code, syndrome decoding.

ЧЕРНЫШЕВ Александр Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и связи МарГТУ. Области научных интересов – формирование колебаний и сигналов; сверхширокополосные радиотехнические системы; системы передачи информации; защита информации в каналах связи. Автор 103 научных, научно-методических и учебно-методических работ.

E-mail: krts@marstu.net

УДК 681.586.5

Т. С. Садеев, О. Г. Морозов

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФОТОННЫХ ФИЛЬТРОВ МИКРОВОЛНОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОСНОВЕ АМПЛИТУДНЫХ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

Рассмотрены вопросы применения амплитудных электрооптических модуляторов (АЭМ) в структуре фотонных (полностью оптических) фильтров радиосигналов микроволнового диапазона. Впервые на основе детального исследования модуляционных характеристик АЭМ по напряженности электрического поля показана возможность формирования фильтров с отрицательными коэффициентами. Представлен синтез перестраиваемых фильтров с возможностью изменения их конфигурации путем изменения положения рабочей точки на модуляционной характеристике АЭМ. Особое внимание уделено возможности получения полосовых фильтров с коэффициентами $(-1, 1)$, обладающих улучшенными динамическими и статическими характеристиками, при работе АЭМ в нулевой рабочей точке.

Ключевые слова: фотонные фильтры микроволновых сигналов, амплитудный электрооптический модулятор, модуляционная характеристика по напряженности электрического поля, коэффициенты и спектральные характеристики фильтра.

Введение. Обработка микроволновых радиосигналов в оптическом диапазоне длин волн находит широкое применение в различных радиотехнических системах: приема, передачи и обработки информации, радиолокации, формирования диаграммы направленности фазированных антенных решеток, а также в телекоммуникационных системах типа ROF (от англ. *Radio Over Fiber*). Устройства фильтрации микроволновых сигналов в оптическом диапазоне длин волн получили название фотонные (полностью оптические) фильтры микроволновых сигналов (ФФМС). Фильтрация микроволновых сигналов с помощью средств волоконной оптики в сравнении с устройствами, выполняющими эти операции в полосе радиосигнала или на промежуточной частоте, обладает следующими преимуществами: низкими потерями, независимыми от частоты микроволнового сигнала, широкополосностью, невосприимчивостью к электромагнитным помехам, широким диапазоном перестройки, высокой частотой дискретизации, малой массой и т.д. Кроме того, ФФМС призваны упростить структуру радиотехнической (телекоммуникационной) системы за счет отсутствия дополнительных оптоэлектронного и обратного преобразований [1].

На современном этапе развития технология разработки ФФМС столкнулась с задачей обеспечения одновременно высоких динамических и статических характеристик указанных устройств. При этом под динамическими характеристиками понимается возможность перестраивать селективные параметры устройства (ширина полосы пропускания, центральная частота, ослабление в канале задержки) и возможность принципиально изменять его конфигурацию, т.е. вид частотной характеристики, например, от

полосового к НЧ- или ВЧ-фильтру. Под статическими – понимается стабильность характеристик фильтра при изменении амплитудных, фазовых и частотных соотношений его коэффициентов, вызванных отклонениями параметров их формирования от оптимальных.

Для построения фильтра с высокими динамическими и статическими характеристиками, а также низкой стоимостью необходимо найти такие пути построения ФФМС, при которых обеспечивалось бы необходимое количество обрабатываемых коэффициентов и оперативное управление их числом, амплитудой и знаком при требуемых параметрах выходных спектральных характеристик.

Авторами [2] предложено использование широкополосного источника оптического излучения (ИОИ) с последовательно включенным интерферометром Маха-Цандера (ИМЦ), который осуществляет частотную селекцию. Данная схема является малоприменимой для использования в радиотехнических системах из-за своей высокой стоимости (высокая цена перестраиваемого источника) и сложности управления параметрами фильтра.

Более адаптированными являются ФФМС на основе модуляторов Маха-Цандера (ММЦ) [3–8], реализующие модуляционные методы формирования коэффициентов фильтров. В табл. представлены результаты анализа динамических и статических характеристик модуляционных ФФМС.

Сравнительный анализ динамических и статических характеристик модуляционных ФФМС

Фотонные фильтры, реализующие модуляционные методы		Возможность изменения числа коэффициентов фильтра путем изменения параметра модуляции	Возможность изменения конфигурации фильтра	Обеспечение стабильности коэффициентов	Сложность реализации и стоимостные показатели
Источник опорного излучения	ММЦ				
Массив ИОИ с разномом до 1 нм [3]	Два типовых АЭМ с модуляцией на различных склонах	–	–	–	±
Массив ИОИ с разномом до 1 нм [4]	Один АЭМ особой конструкции	–	–	–	–
Массив ИОИ с разномом до 1 нм [5]	Один типовой ФМ	–	±	±	+
Массив ИОИ [6] из разных диапазонов (1310 и 1550 нм)	Один типовой АЭМ	–	+	±	+
Один ИОИ [7, 8]	Один типовой АЭМ, реализующий АФМ	+	+	+	+

Использование двух ММЦ с амплитудной модуляцией на различных склонах модуляционной характеристики [3] решает проблему получения отрицательных коэффициентов, но оставляет открытой проблему обеспечения и динамического управления их числом, поскольку в данной конструкции используется массив источников оптического излучения (ИОИ) и два ММЦ, осуществляющих одну и ту же функцию, что является основным недостатком. От данного недостатка избавлен фильтр на ММЦ с двойным

выходом [4], являющийся, по своей сути, развитием предыдущего ФФМС. Реализация фильтра [4] также зависит от числа ИОИ в массиве и, кроме того, использования специально разработанного модулятора, который не доступен на массовом рынке элементной базы волоконной оптики, что значительно ограничивает возможность его практического применения. Доступные комплектующие лежат в основе относительно широкого применения фильтра на базе фазового модулятора (ФМ) Маха-Цандера [5].

Трудности в реализации создает тот факт, что ФМ генерирует только отрицательные компоненты, изменение конфигурации сопряжено с определенными сложностями при получении положительных коэффициентов. Широкому распространению метода, реализованного в [6], препятствует тот факт, что для реализации отрицательных коэффициентов требуется использовать дополнительные ИОИ из другого окна прозрачности, что представляет значительную сложность в реализации данного метода.

Рассмотренные разработки не решают поставленной научно-технической задачи, приводя к выводу о том, что перестраиваемость и изменение конфигурации фильтра как динамические характеристики и число коэффициентов и стабильность их параметров как статические характеристики – это взаимоограничивающие и противоречащие друг другу критерии.

Преодолеть указанный недостаток можно при использовании АЭМ, преобразующих одночастотное излучение в многочастотное на основе амплитудно-фазовой модуляции (АФМ) [7–10], решая как проблему числа и знака оптических коэффициентов, так и возможности их динамической перестройки. Преимущество использования АФМ в ФФМС состоит в возможности получения требуемого числа оптических несущих, стабильность которых определяется стабильностью амплитуды управляющего сигнала и стабильностью напряжения, задающего положение рабочей точки. При этом управление спектральными характеристиками ФФМС также просто осуществляется путем изменения частотных параметров модулирующего сигнала и напряжения, задающего положение рабочей точки.

1. Устройство реализации оптических коэффициентов на основе АЭМ. Рассмотрим спектр выходного сигнала АЭМ при различных положениях рабочей точки его модуляционной характеристики по напряженности электрического поля A , которая представлена на рис. 1, а. Для сравнения на рис. 1, б показана модуляционная характеристика АЭМ по интенсивности. В большинстве работ, включая [3 – 6], посвященных синтезу ФФМС с помощью ММЦ, как правило, рассматривается модуляционная характеристика АЭМ по интенсивности. При этом не учитывается знак фазы оптического коэффициента по напряженности электрического поля, либо его определение происходит косвенным образом.

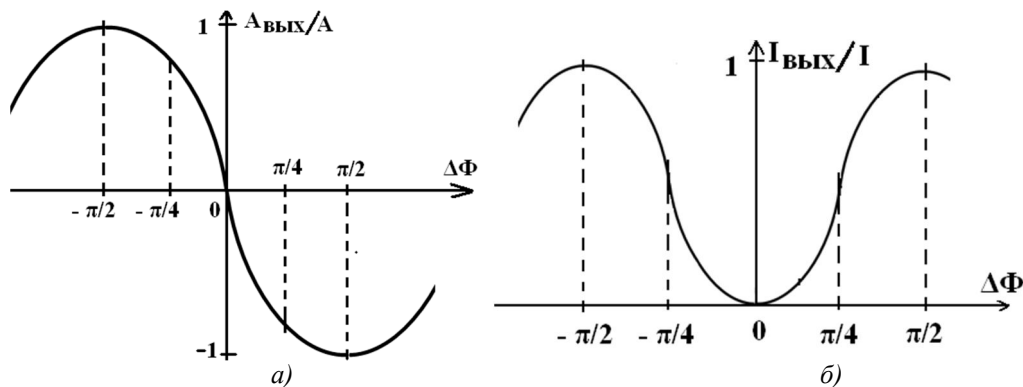


Рис. 1. Модуляционная характеристика АЭМ:
а) по напряженности электрического поля; б) по интенсивности

Рассмотрим спектр выходного сигнала АЭМ при работе модулятора в точках $\Phi_0=0$, $\Phi_0=\pi/4$ и $\Phi_0=\pi/2$. Набег фазы вектора электрического поля излучения, прошедшего через верхнее плечо АЭМ, показанного на рис. 2, равен $\Delta\Phi = \Phi_0 + \Phi_1 = \Phi_0 + \pi\beta\sin\Omega t$, где β – глубина модуляции, Ω – постоянная частота модулирующего сигнала.

Упрощенная структурная схема АЭМ с пояснениями показана на рис. 2.

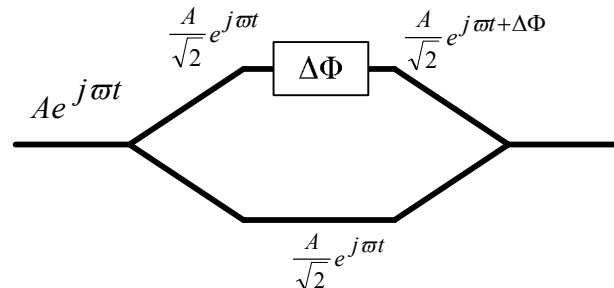


Рис. 2. Структурная схема АЭМ:

A – амплитуда электрического поля исходного оптического сигнала и ω – его частота;
 $\Delta\Phi$ – фазовый сдвиг, наведенный внешним модулирующим сигналом и постоянным смещением задания рабочей точки

Используя формулу Эйлера для функции $\sin\Omega t$, а также разложение по функциям Бесселя, выходное электрическое поле АЭМ при работе модулятора в точке $\Phi_0=0$ запишется в виде (1):

$$A_{BBLX} = 2jA\exp(j\omega t) \left[\frac{\exp(j\frac{\Phi_1}{2}) - \exp(-j\frac{\Phi_1}{2})}{2j} \right] =$$

$$= 2jA\exp(j\omega t) \left[2 \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}\left(\frac{\pi\beta}{2}\right) \sin(2n-1)\Omega t \right] \quad (1)$$

Анализ выражения (1) показывает, что в результате преобразований реализуется АФМ, спектр выходного сигнала АЭМ при работе в нуле модуляционной характеристики двухчастотный, равноамплитудный и не содержит гармонику на частоте несущего колебания. Спектральный состав сигнала (1) представлен на рис. 3.

При работе вне нулевой точки модуляционной характеристики при $\Phi_0=\pi/4$ (линейный участок) и $\Phi_0=\pi/2$ (максимум характеристики) несущая частота скомпенсирована не будет и выходной спектр АЭМ запишется в соответствии с упрощенными выражениями (2) и (3), в которых рассмотрены первые члены разложения в ряд по функциям Бесселя в силу малости высших:

$$A_{BBLX} = \frac{A}{\sqrt{2}} \exp(j\omega t) \left[1 + \exp(j\frac{\pi}{4} + \frac{1}{2}j\pi\beta\sin\Omega t) \right] =$$

$$= j\frac{A\beta}{2\sqrt{2}} \exp[j(\omega + \Omega)t] - j\frac{A\beta}{2\sqrt{2}} \exp[j(\omega - \Omega)t] + \frac{(1+j)}{\sqrt{2}} A \exp(j\omega t) \quad (2)$$

$$A_{BBLX} = \frac{A}{\sqrt{2}} \exp(j\omega t) \left[1 + \exp(j\frac{\pi}{2} + \frac{1}{2}j\pi\beta\sin\Omega t) \right] =$$

$$= (1 + J_0(\beta)) \frac{A}{\sqrt{2}} e^{j\omega t} + \frac{A}{\sqrt{2}} J_1\left(\frac{1}{2}\pi\beta\right) e^{j(\omega+\Omega)t} - \frac{A}{\sqrt{2}} J_1\left(\frac{1}{2}\pi\beta\right) e^{j(\omega-\Omega)t} \quad (3)$$

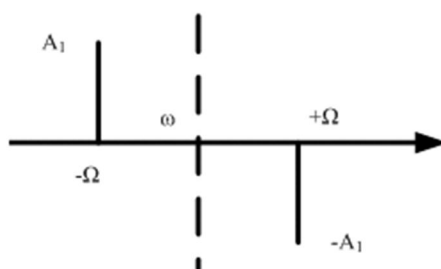


Рис. 3. Спектральный состав сигнала (1).

Несущая подавлена, боковые гармоники с начальными фазами отличными на π

Анализ выражений (2), (3) показывает, что спектр содержит гармоники на частоте несущего колебания, а также боковые составляющие, как показано на рис. 4. Данный рисунок показывает качественный состав спектра, т.к. амплитуды боковых гармоник и несущей в выражении (2) не равны соответственно амплитуде боковых гармоник и несущей в выражении (3).

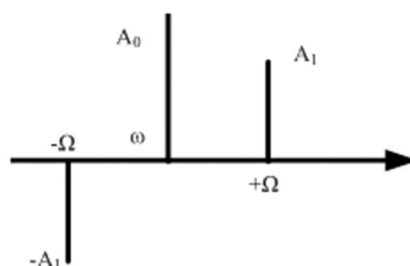


Рис. 4. Спектральный состав сигналов (2) и (3)

Анализ выражений (2), (3) показывает, что при использовании АЭМ в качестве средства, реализующего модуляционный метод обеспечения коэффициентов фотонного фильтра микроволновых сигналов, реализуется частотная характеристика фильтра высоких частот. Путем подбора параметров модуляции в (2) и (3) могут быть получены коэффициенты $(-1,1,1)$ с некоторым уровнем паразитных гармоник. Заметим, что при отрицательных Φ_- коэффициенты примут противоположные знаки.

Анализ (1) показывает возможность реализации частотной характеристики полосового фильтра с коэффициентами $(-1,1)$.

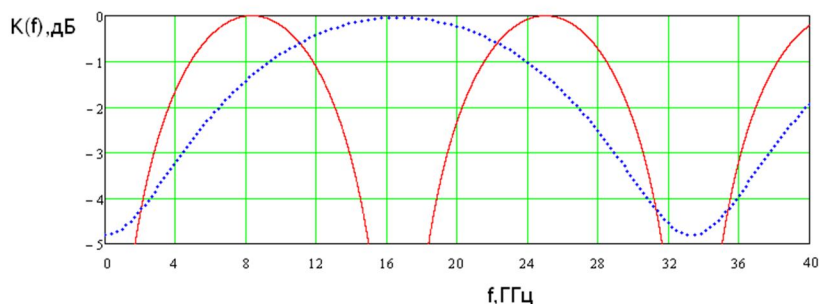


Рис. 5. Частотная характеристика двухкомпонентного $(-1,1)$ фильтра (сплошная линия) и трехкомпонентного фильтра $(-1,1,1)$ (точечная линия)

В качестве вывода отметим, что при работе в любой точке модуляционной характеристики АЭМ формируется коэффициент с отрицательным знаком, который позволя-

ет реализовать полосовой фильтр и фильтр высоких частот, т.о. обеспечивая изменение конфигурации фильтра. Управление частотой модуляции равноценно изменению времени задержки, что приведет к сужению или расширению полосы пропускания фильтра, т.о. фильтр является перестраиваемым. Частотные характеристики полосового фильтра $(-1,1)$ и ФВЧ $(-1,1,1)$ представлены на рис. 5.

2. Влияние на спектральные характеристики ФФМС отклонений параметров преобразования от оптимальных. При использовании модуляционных методов в синтезе ФФМС качественные и количественные характеристики спектра излучения на выходе устройств их реализующих зависят от параметров преобразования и могут содержать как высокий уровень нежелательных составляющих, так и изменение параметров коэффициентов, формирующих фильтр, поэтому необходимо исследовать характеристики фильтра при отклонении параметров преобразования от оптимальных.

Анализ выражения (1) показывает, что спектр содержит паразитные составляющие. Выражение (4) описывает зависимость коэффициента нелинейных искажений от глубины модуляции (ограничимся рассмотрением до 3-го порядка разложения):

$$K_{НИ} = 100 \cdot \sqrt{\sum_n \frac{J_n^2(\beta)}{2} \bigg/ \frac{J_1^2(\beta)}{2}}. \quad (4)$$

Анализ выражения (4) показывает, что при глубине модуляции до значения 0,34 спектр можно считать двухчастотным с $K_{НИ}$, не превышающим 0,5 %, с частотной характеристикой, близкой к идеальной, представленной на рис.4. При более высоких глубинах модуляции возможен эффект перемодуляции, например, при $\beta=3$ спектр можно рассматривать как четырехчастотный с равными амплитудами боковых составляющих первого порядка и третьего, т.о. обеспечиваются коэффициенты $(-1,-1,1,1)$. На рис. 6 показано искажение частотной характеристики при $\beta=3$.

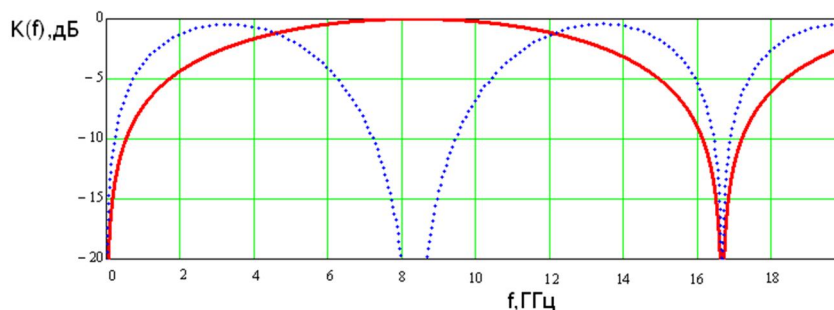


Рис. 6. АЧХ фильтров:
идеального двухкомпонентного $(-1,1)$ (сплошная линия);
искаженного четырехкомпонентного $(-1,-1,1,1)$ с учетом паразитных коэффициентов
при глубине модуляции $\beta=3$ (точечная линия)

Таким образом, показано влияние глубины модуляции как параметра, определяющего амплитудные соотношения оптических коэффициентов в выходном спектре АЭМ при работе в нулевой рабочей точке, а также обеспечивающего перестраиваемость ФФМС. Частотная характеристика фильтра при изменении глубины модуляции трансформировалась в двухполосную несимметричную с неравномерными завалами АЧХ каждой из полос.

3. Экспериментальные исследования частотной характеристики ФФМС на основе АЭМ при работе в нулевой рабочей точке. Способ генерации коэффициентов фильтра $(-1, 1)$, основанный на использовании АЭМ со смещением в нулевой рабочей точке, был впервые экспериментально апробирован в лаборатории НППК (г. Пермь), а затем в лаборатории «волоконно-оптической техники» НИУ КГТУ им. А. Н. Туполева.

ФФМС были реализованы на установке, состоящей из канала формирования коэффициентов (КФК) и канала фильтрации микроволнового сигнала (КФМС). КФК содержал источник лазерного излучения EXFO FLS-2600 и широкополосный модулятор JDSU-10 со смещением в нулевой рабочей точке. На модулятор подавалось управляющее напряжение сначала с частотой 5 ГГц, а затем 10 ГГц от высокочастотного генератора SMR-20. Подавление несущей и удвоение частоты разноса коэффициентов ФФМС до $f=10$ ГГц и $f=20$ ГГц соответственно фиксировалось с помощью платформы EXFO FTB-500 с модулем анализатора спектра FTB-5240.

Выходное волокно КФК было приварено к входу КФМС, состоящего из второго модулятора JDSU-10 и волоконной решетки Брэгга с дисперсией $D=550$ пс/нм. На модулятор КФМС со смещением на линейном участке модуляционной характеристики подавалось управляющее напряжение от второго генератора SMR-20.

Частотные характеристики ФФМС регистрировались на анализаторе спектра радиочастот FSP-30, для чего частота управляющего напряжения второго генератора SMR-20 изменялась от 10 МГц до 20 ГГц при постоянной амплитуде. Полученные характеристики представлены на рис. 7.

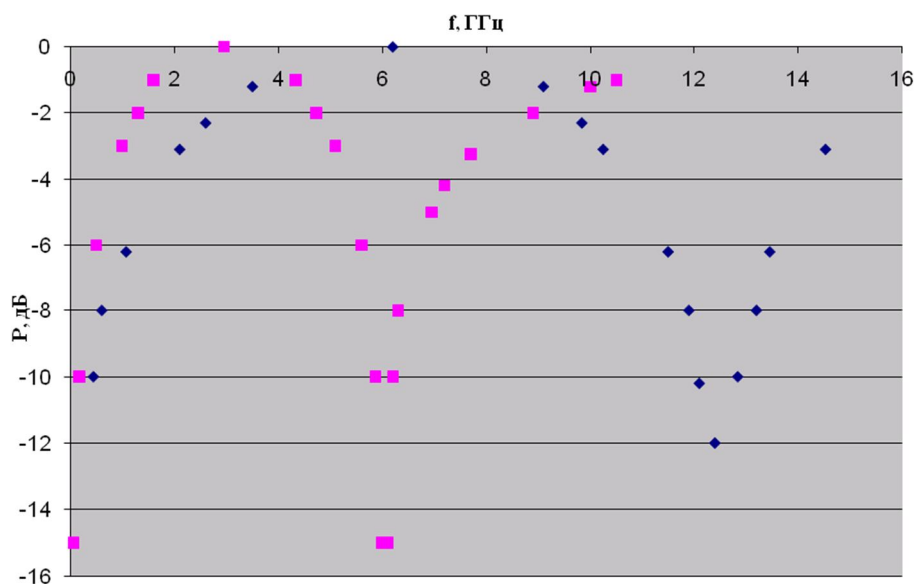


Рис. 7. Экспериментальные частотные характеристики ФФМС: при частотном разнесе коэффициентов $f=10$ ГГц (ромбовидные отметки); при частотном разнесе коэффициентов $f=20$ ГГц (квадратные отметки)

При спектральном разнесе оптических коэффициентов 20 ГГц максимум характеристики находится на частоте 2,96 ГГц, провалы на нулевой частоте и 6,1 ГГц. При уменьшении спектрального разноса до 10 ГГц наблюдался сдвиг резонанса с частоты 2,96 ГГц на частоту 6,2 ГГц и провала АЧХ с 6,1 ГГц на 12,1 ГГц.

Значения частот провалов и резонансов близки к расчетным. Незначительное расхождение объясняется различными дисперсионными и поляризационными свойствами волоконной решетки Брэгга и выходного волокна модулятора канала фильтрации, а также наличием в выходном спектре АЭМ паразитных гармоник. Экспериментально показано изменение центральной длины волны канала пропускания фильтра путем изменения частоты модулирующего сигнала в блоке генерации коэффициентов. Результаты экспериментального исследования позволяют с уверенностью говорить о возможности реализации предложенных подходов в формировании коэффициентов фильтра и реализации модуляционных методов в синтезе перестраиваемых ФФМС. Переконфигу-

рация фильтра может быть осуществлена путем изменения положения рабочей точки и глубины модуляции модулятора блока формирования коэффициентов.

Заключение. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали возможность формирования коэффициентов полосового фильтра $(-1,1)$ на основе АЭМ, работающего в нулевой рабочей точке. На основе рассмотренного в настоящей статье устройства генерации коэффициентов была создана экспериментальная установка фотонного фильтра микроволновых сигналов, которая показала возможность реализации перестраиваемого и переконфигурируемого фильтра. Дальнейшее направление исследований связано с обеспечением стабильности характеристик фильтра при формировании коэффициентов на основе использования двухпортового АЭМ Маха-Цандера [9, 10].

Список литературы

1. *Seeds, A.* Microwave Photonics / A. J. Seeds, K. J. Williams // J. Lightwave Technol. – 2006. – № 24. – P. 4628–4641.
2. *Mora, J.* Tunable microwave photonic filters free from baseband and carrier suppression effect not requiring single sideband modulation using a Mach-Zehnder configuration / J. Mora, A. Ortigosa-Blanch, J. Capmany, D. Pastor // Optics Express. – 2006. – V.14. – № 17. – P. 7960–7965.
3. *Capmany, J.* Microwave photonics filters with negative coefficients based on phase inversion in an electro-optic modulator / J. Capmany, D. Pastor, A. Martinez, B. Ortega, S. Sales // Opt. Lett. – 2006. – № 28. – P. 1415–1417.
4. *Pastor, D.* Reconfigurable RF Photonic Filter With Negative Coefficients and Flat-Top Resonances Using Phase Inversion in a Newly Designed 2 1 Integrated Mach-Zehnder Modulator / D. Pastor // IEEE Photonics Technology Letters. – 2004. – V. 16. – №. 9. – P. 2126–2128.
5. *Zeng, F.* All optical bandpass microwave filter based on electro-optic phase modulator / F. Zeng, J. Yao // Optics Express. – 2004. – V.12. – № 16. – P. 3814–3819.
6. *Vidal, B.* All-optical WDM multi-tap microwave filter with flat bandpass / B. Vidal, J. L. Corall, J. Marti // Optics Express. – 2006. – V.14. – № 2. – P. 581–586.
7. *Ильин, Г. И.* ЛЧМ-лидар с преобразованием частоты / Г. И. Ильин, О. Г. Морозов, Ю. Е. Польский // Оптика атмосферы и океана. – 1995. – Т. 8. – № 12. – С. 1871–1874.
8. *Садеев, Т. С.* Микроволновые полосовые фильтры для ROF WDM систем: выбор метода синтеза / Т. С. Садеев, О. Г. Морозов, В. П. Просвирины, А. С. Смирнов // Тезисы докладов 6-й Международной научно-технической конференции «Проблемы техники и технологий телекоммуникаций». – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та., 2008. – С. 258–259.
9. *Садеев, Т. С.* Преобразование спектра оптического излучения в двухканальном модуляторе Маха-Цандера и ROF-фильтр на его основе / Т. С. Садеев, Д. Л. Айбатов, О. Г. Морозов // Нелинейный мир. – 2010. – Т. 8. – № 5. – С. 302–309.
10. *Садеев, Т. С.* Синтез двухчастотного излучения и его применение в волоконно-оптических системах распределенных и мультиплексированных измерений / Т. С. Садеев, Д. Л. Айбатов, О. Г. Морозов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 84–91.

Статья поступила в редакцию 12.11.10.

T. S. Sadeev, O. G. Morozov

SPECTRAL CHARACTERISTICS OF PHOTON FILTERS OF MICROWAVE SIGNALS ON BASIS OF AMPLITUDE ELECTRO-OPTICAL MODULATORS

The aspects of the application of amplitude electro-optical modulators (AEOM) in the structure of photon (fully optical) filters of microwave range radio signals are considered. The possibility of the formation of filters with minus coefficients on the basis of detailed investigation of drive characteristics of AEOM with regard to electric field intensity has been shown. The synthesis of reconfigurable filters with the possibility of the variation in their formation by changing the posi-

tion of the operating point on the drive characteristic of AEOM is presented. The special attention was paid to the possibility of receiving band filters with (-1, 1) coefficients, having improved dynamic and static characteristics during the work of AEOM in the null operating point.

Key words: *photon filters of microwave signals, amplitude electro-optical modulator, electric field intensity modulation characteristic, filter coefficients and spectral characteristics.*

САДЕЕВ Тагир Султанович – аспирант, ассистент кафедры телевидения и мультимедийных систем Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. Область научных интересов – информационно-измерительные и телекоммуникационные системы оптического и микроволнового диапазонов. Автор более 20 публикаций.

E-mail: tagir_kai@mail.ru

МОРОЗОВ Олег Геннадьевич – доктор технических наук, заведующий кафедрой телевидения и мультимедийных систем Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. Область научных интересов – информационно-измерительные и телекоммуникационные системы оптического и микроволнового диапазонов. Автор более 120 публикаций.

E-mail: microoil@mail.ru

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

УДК 621.391.266

А. А. Роженцов, А. А. Баев, Р. В. Ерусланов

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ РАСПАРАЛЛЕЛИВАНИЯ ВЫЧИСЛЕНИЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ КВАТЕРНИОННЫХ СИГНАЛОВ

Предложено решение задачи применения параллельных вычислений для реализации алгоритмов обработки кватернионных сигналов. Описаны особенности использования параллельных вычислений на центральном и графическом процессорах. Предложены подходы к распараллеливанию базовых операций обработки кватернионных сигналов для решения задач анализа изображений пространственных объектов. Выполнено сравнение быстродействия алгоритмов, реализованных на центральном и графическом процессорах. Показаны условия, при которых обеспечивается выигрыш в 10–15 раз в быстродействии при использовании графического сопроцессора. Полученные результаты показывают целесообразность применения параллельных вычислений в алгоритмах обработки кватернионных сигналов.

Ключевые слова: параллельные вычисления, графический процессор, центральный процессор, кватернионные сигналы, вычислительные потоки.

Введение. Задача уменьшения времени вычисления актуальна практически для всех алгоритмов. Одним из путей ее решения является применение параллельных вычислений. Распределяя данные по различным вычислительным устройствам, можно получить ощутимый прирост скорости вычислений, однако, следует учесть, что не каждый алгоритм может быть распараллелен, а распараллеливание некоторых не имеет смысла, так как время на подготовку и копирование данных может превысить время вычислений.

Ранее задача параллельных вычислений решалась преимущественно за счет использования суперкомпьютеров для отдельных специальных задач. С появлением многоядерных процессоров для персональных компьютеров параллельные вычисления стали развиваться более стремительно и возникла необходимость адаптации имеющихся и разрабатываемых алгоритмов к распараллеливанию. Также в настоящее время интенсивно развивается технология проведения научных расчетов на графических ускорителях, имеющая особую специфику реализации.

Целью данной работы является разработка методов распараллеливания базовых операций обработки кватернионных сигналов, сравнение быстродействия алгоритмов

кватернионного анализа при исполнении на центральном процессоре (CPU) и на процессоре графической карты (GPU) с использованием параллельных вычислений, а также оценка целесообразности их применения.

Анализ возможности применения параллельных вычислений. Как показано в работе [1], для обработки объемных изображений могут использоваться методы кватернионного анализа. В этом случае векторы, проведенные в пространстве к точкам, задающим поверхность объекта, описываются векторными кватернионами, а их набор представляет собой кватернионный сигнал.

Использование аппарата кватернионного анализа позволяет связать поверхность, заданную в пространстве, с функцией кватернионного переменного, например, отображающей ее отсчеты на сферу [2]. Для этого применяется полиномиальная функция вида:

$$\sum_{m=0}^{M-1} q_n^m a_m = p_n, \quad (1)$$

где a_m – коэффициенты полинома, также являющиеся кватернионами, задающие отображение пространственной фигуры на поверхность сферы, q_n – кватернионы, соединяющие точки поверхности объекта с началом координат, p_n – проекции кватернионов q_n на сферу.

Согласно формуле (1), можно вычислить коэффициенты полинома a , связывающего поверхность исследуемого объекта с поверхностью сферы. При использовании метода наименьших квадратов для вычисления коэффициентов полинома степени M следует решить систему линейных кватернионных уравнений:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{q}_{0,0} & \mathbf{q}_{0,1} & \mathbf{q}_{0,2} & \cdots & \mathbf{q}_{0,M-1} \\ \mathbf{q}_{1,0} & \mathbf{q}_{1,1} & \mathbf{q}_{1,2} & \cdots & \mathbf{q}_{1,M-1} \\ \mathbf{q}_{2,0} & \mathbf{q}_{2,1} & \mathbf{q}_{2,2} & \cdots & \mathbf{q}_{2,M-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{q}_{M-1,0} & \mathbf{q}_{M-1,1} & \mathbf{q}_{M-1,2} & \cdots & \mathbf{q}_{M-1,M-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_{M-1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{p}_0 \\ \mathbf{p}_1 \\ \mathbf{p}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{p}_{M-1} \end{bmatrix},$$

элементы которой определяются из соотношений:

$$\mathbf{q}_{r,m} = \sum_{n=0}^{N-1} \bar{q}_n^r q_n^m, \quad \mathbf{p}_r = \sum_{n=0}^{N-1} \bar{q}_n^r p_n, \quad (2)$$

где $r = 0..M-1$, $m = 0..M-1$, M – степень полинома, N – количество элементов исходного сигнала.

Решение данной системы уравнений, например, методом Гаусса, позволяет найти значения коэффициентов a_m полиномиальной функции, выполняющей отображение пространственной фигуры на сферу.

Здесь можно разложить сумму (2) на K частей размерностью $N_K = N/K$:

$$\mathbf{q}_{r,m} = \sum_{n=0}^{N_K-1} \bar{q}_n^r q_n^m + \dots + \sum_{n=N_K(K-2)}^{N_K(K-1)-1} \bar{q}_n^r q_n^m, \quad \mathbf{p}_r = \sum_{n=0}^{N_K-1} \bar{q}_n^r p_n + \dots + \sum_{n=N_K(K-2)}^{N_K(K-1)-1} \bar{q}_n^r p_n \quad (3)$$

Рассмотрим последовательный алгоритм решения задачи вычисления коэффициентов полинома (рис. 1). Здесь каждая последующая секция ждет завершения предыдущей.

При анализе алгоритма на возможность распараллеливания следует обратить внимание на участки, где проходит обработка массива данных с одинаковой последовательностью команд, так как здесь можно применить параллельные вычисления наиболее эффективно. Загрузка данных происходит, в основном, последовательно, например, со сканирующего устройства или из файла, следовательно, данная секция по своей сути

последовательная и распараллелить ее сложно. Во второй секции последовательного алгоритма, согласно (2), вычисляются коэффициенты системы линейных уравнений. Исходя из (3), алгоритм вычисления коэффициентов линейных уравнений можно распараллелить. В данном случае это целесообразно, так как это наиболее трудоемкая секция. Учитывая то, что размер системы линейных уравнений относительно мал, секцию решения системы уравнений можно оставить последовательной, так как время на создание потоков может значительно превысить время вычисления.



Рис. 1. Последовательный алгоритм решения

Таким образом, наиболее простым и в то же время эффективным является применение последовательно-параллельных алгоритмов. Однако в последовательно-параллельном алгоритме появляются две дополнительные секции, в которых происходит деление исходного массива на равные части, а также последующее формирование системы линейных уравнений как результата объединения результатов параллельных секций, что требует некоторых временных затрат, и при малых размерностях данных рентабельность от применения параллельных вычислений значительно снижается.

Исходя из приведённого анализа метода, наиболее эффективно использование последовательно-параллельного алгоритма решения. Если учесть особенности программной реализации, то параллельные вычисления будут эффективны для больших объемов входных данных.



Рис. 2. Последовательно-параллельный алгоритм

Реализация на CPU. С появлением многопоточности разработчики получили возможность более эффективно использовать ресурсы центрального процессора CPU.

Поток можно рассматривать как часть программы, которая может выполняться «одновременно» с другими частями [3], то есть код функций выполняется так, как будто каждая из них представляет собой отдельную запущенную программу. В операционных системах с вытесняющей многозадачностью потоки выполняются по очереди в течение определенного времени (квант времени). Размер кванта зависит от множества факторов: архитектуры и настройки операционной системы (ОС), приоритета потока, загруженности процессора и т.д. Когда один поток отработал свой квант времени – ОС переключается на выполнение другого потока. Например, когда один поток ожидает данные, второй выполняет арифметические расчеты. Все потоки всегда существуют в контексте какого-либо процесса. Поэтому все потоки процесса делят одно адресное пространство и выполняют каждый свой код. Потоки могут выполнять один и тот же код, манипулировать одними и теми же данными, получать доступ к одним и тем же объектам ядра и т.п.

Многопоточное приложение легче масштабируется. Таким образом, на многоядерных процессорах и кластерных системах потоки могут исполняться параллельно, то есть каждый поток можно закрепить за отдельным процессором, что позволяет использовать многопоточное программирование при реализации параллельных алгоритмов. Исходя из того, что каждое ядро будет обрабатывать свою часть данных, то эффективнее создавать потоки в количестве, равном количеству процессоров.

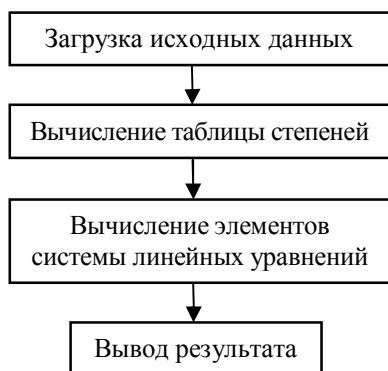


Рис. 3. Алгоритм работы функции вычисления элементов системы линейных уравнений

Особенностью параллельных вычислений на CPU является то, что реализовать параллельные секции возможно, лишь поделив исходные данные, однако исполняемый код внутри потока останется последовательным (рис. 3). Это сравнимо с процедурным программированием, где создается некая функция, содержащая последовательный набор команд, и в нее передаются исходные данные. При использовании потоков эта функция может выполняться на разных процессорах одновременно над различными исходными данными.

Рассмотрим функцию вычисления элементов системы линейных уравнений по формуле (2). Здесь присутствует возведение в степень, что с точки зрения вычисления является трудоемкой задачей, тем более каждый кватернион необходимо возводить в степень несколько раз. Так как умножение намного проще, чем возведение в степень, наиболее эффективно будет составить таблицу степеней, где строкам будет соответствовать индекс кватерниона n в исходном массиве, а столбцам – степень кватерниона m , согласно следующему выражению:

$$q_{n,m} = q_{n,m-1} \cdot q_{n,1}, \text{ где } n = 0..N-1, m = 2..M-1$$

По формуле (1) находим коэффициенты линейных уравнений, где вместо возведения в степень подставляем табличные значения. Также можно совместить сложение и умножение в одной функции, что позволит избавиться от лишних действий.

Для обеспечения гарантированного завершения всех потоков выполняется их синхронизация и выводится результат. При реализации параллельных вычислений на CPU следует передавать в функцию данные приблизительно равного размера, так как это

увеличит эффективность загрузки процессора и уменьшит время простоя при синхронизации потоков.

Реализация на GPU. В последние годы интенсивно развиваются технологии вычисления на графических картах. Изначально графические карты использовались исключительно для вывода графики, однако, позже стали применяться для общих вычислений, в основном, благодаря графическим API OpenGL и DirectX. Кроме того существуют пакеты более высокого уровня: Cg, HLSL, OpenGL Shading Language. Однако реализация задач общего плана требует применения более универсальных средств, облегчающих отображение поставленных задач на архитектуру GPU-устройств. Наиболее успешным является проект CUDA SDK от компании NVIDIA. Несмотря на высокую производительность, GPU-устройства являются специфическим классом многопроцессорных систем, характеризующихся существенными ограничениями на масштабируемость, использование памяти и управление данными.

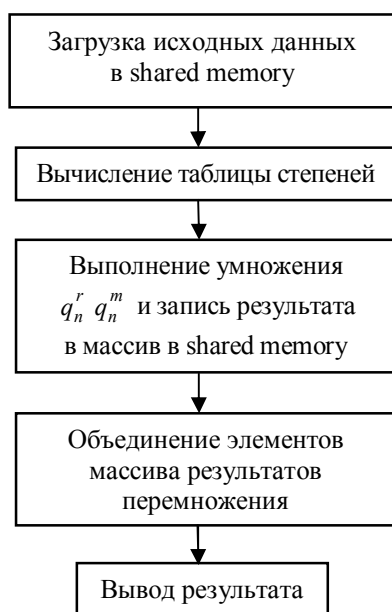


Рис. 4. Алгоритм вычисления на GPU

процедуру, которая будет исполняться на GPU над потоком данных, и при запуске ядра на GPU задает ему конфигурацию на основе описанной ниже иерархии. Каждый поток, физически выполняющийся на АЛУ мультимикропроцессора, исполняет инструкции, описанные в ядре. Благодаря SIMD-архитектуре, на каждом мультимикропроцессоре несколько потоков параллельно выполняют одну и ту же последовательность инструкций. Логически потоки объединяются в блоки, ограничивающие возможность обмена данными между потоками. Потоки могут обмениваться данными через общую память только внутри одного блока. Кроме того, потоки из одного блока выполняются на одном и том же мультимикропроцессоре. GPU содержит пять видов памяти, отличающихся быстродействием и иерархией доступа к ним: shared, global, texture, constant, local. При загрузке данных в память GPU они копируются в global память, но она достаточно медленная, чтение из нее требует 200–300 тактов [4], наиболее быстрой считается shared (общая) память, но она доступна в пределах блока и ограничена 16 Кб.

Реализация ранее представленного алгоритма на GPU будет отличаться тем, что код, выполняемый в параллельных секциях, останется параллельным (рис. 4).

Ускоритель на базе GPU представляет собой набор вычислительных устройств (мультимикропроцессоров), состоящих из некоторого числа арифметико-логических устройств (АЛУ). Мультимикропроцессор имеет SIMD-архитектуру [4, 5]. Иначе говоря, в любой момент времени все АЛУ одного мультимикропроцессора выполняют одинаковую последовательность инструкций над разными наборами данных, расположенных в памяти GPU-устройства. Поскольку в SIMD-устройствах каждый мультимикропроцессор конфигурируется определенным образом для выполнения заданной последовательности команд на множестве входных данных, то перед разработчиком стоит задача формирования последовательности инструкций, решающих поставленную задачу, конфигурации устройства и передачи в устройство потока входных данных. При использовании NVIDIA CUDA SDK эта процедура выглядит следующим образом: разработчик описывает ядро (kernel), то есть

Ввиду наиболее высокого быстродействия, для вычислений будем использовать shared memory. Разбиваем исходный массив на блоки так, чтобы их размер с учетом использования временной таблицы степеней не превышал 16 Кб. При использовании двойной точности наилучшим будет размер блока, равный 64 элементам. Ввиду особенностей выполнения кода на GPU, после каждой секции следует выполнять синхронизацию потоков. Так как в блоке выполняется сразу несколько потоков, то объединить умножение с суммированием весьма затруднительно, более эффективным способом является использование иерархического суммирования. Результат умножения записывается во временный массив в общей памяти, а затем выполняется суммирование элементов. Алгоритм суммирования представлен на рис. 5. На каждой итерации цикла складываются наиболее удаленные элементы. В результате, по окончании цикла сумма записана в нулевой ячейке. Данный алгоритм требует, чтобы размерность массива была степенью числа 2.

Таким образом, мы получили достаточно быстрый алгоритм суммирования с наиболее оптимальным доступом к памяти [6]. Результат суммирования присваивается соответствующему элементу системы линейных уравнений.

По завершении работы всех блоков их результаты копируются в оперативную память, затем производится окончательное суммирование элементов системы линейных уравнений с последующим ее решением.

Хотя алгоритм вычисления средствами GPU несколько сложнее алгоритма для CPU, он выполняется существенно быстрее, что будет показано в следующем разделе.

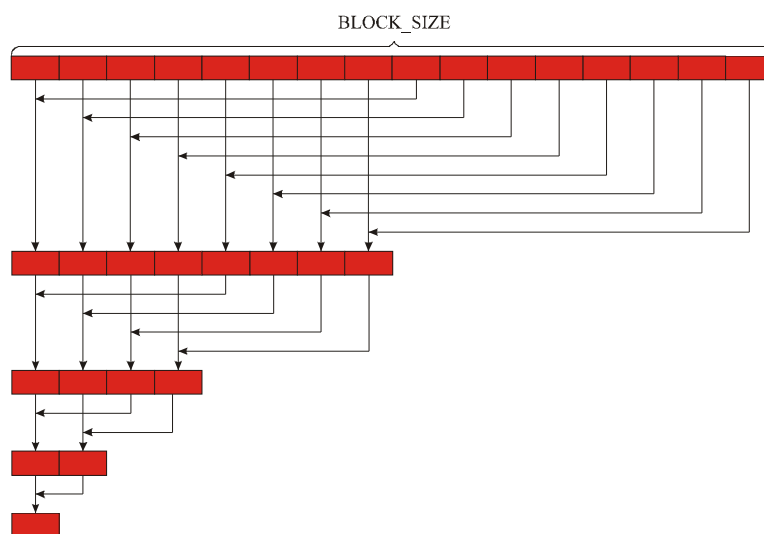


Рис. 5. Иерархическое суммирование внутри блока

Сравнительный анализ быстродействия реализаций на CPU и GPU. Для получения адекватной оценки выигрыша в производительности при вычислении коэффициентов отображающей функции средствами CPU и GPU выполнен сравнительный анализ результатов исполнения при различных размерностях исходных данных. Проведен эксперимент на двух рабочих станциях. В качестве критерия быстродействия принято время выполнения вычислений в зависимости от размерности входных данных.

Основным типом для представления чисел с плавающей точкой в CPU является double, он используется для всех вычислений. В то же время наиболее естественным для GPU является тип float, и двойная точность поддерживается только в видеокартах последних поколений. Поэтому в экспериментах на CPU будем пользоваться типом double, а на GPU – типом float.

Эксперимент №1. Процессор Intel Core 2 duo E7200 2,53 ГГц. Его архитектура содержит два ядра. ОЗУ составляет 2 Гб. Видеокарта NVIDIA GeForce 8600 GT, 128 бит, 540 МГц. В её составе 32 графических процессора. Объём графической памяти составляет 512 Мб.

Результаты приведены в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

Количество отсчётов	Время решения на однопроцессорной системе (мс)	Время решения на многопроцессорной системе (мс)	Время решения на GPU (мс)
10000	20	10	5,11
20000	32	16	9,4
50000	62	47	22,73
100000	125	94	43,98
250000	313	250	108,28
500000	625	469	214,87
750000	1047	719	321,77
1000000	1265	968	430,09
2500000	3172	2328	1068,75

Как видно из результатов эксперимента (рис. 6), преимущества вычислений на графической карте видны на больших массивах данных, время вычисления меньше практически в три раза, чем при вычислении на одном ядре процессора.

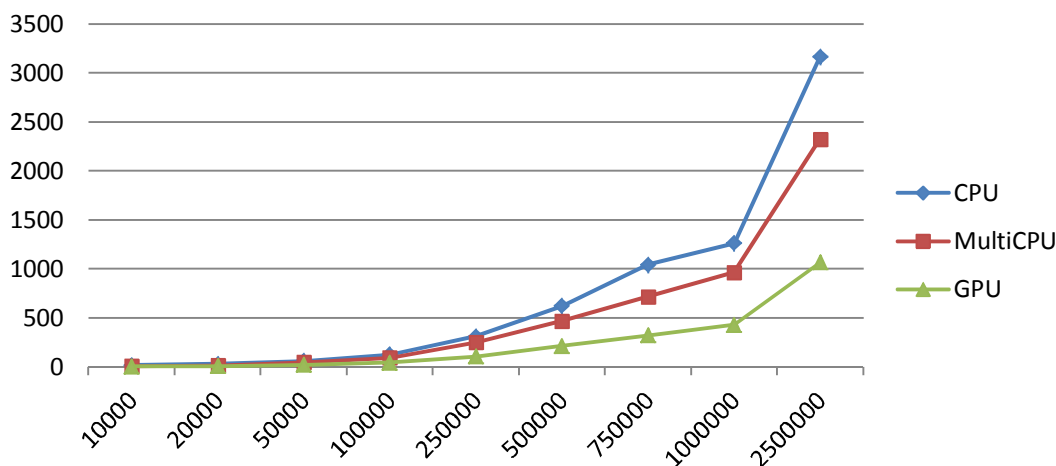


Рис. 6. График зависимости времени вычисления от размерности исходного массива

Эксперимент №2. Для распараллеливания процесса по ядрам исследуется многоядерный процессор Intel Core i7-965 EE 3,2 ГГц. Его архитектура включает четыре ядра в одном кристалле. Технология HyperThreading создаёт на одном физическом ядре два логических. Таким образом, в исследовании участвует восемь ядер. ОЗУ составляет 12 Гб.

Видеокарта Palit GeForce GTX 295, 448 бит x2, 576 МГц. В её составе 240 графических процессоров. Объём графической памяти $896 \cdot 2 = 1792$ Мб.

Результаты приведены в табл. 2.

В данном случае (рис. 7) разница в быстродействии заметна между одним ядром CPU и одним процессором GPU (на данной видеокарте их два), однако при использовании двойной точности разница между многопоточными вычислениями на CPU и GPU практически незаметна, однако существенна при одинарной точности.

Т а б л и ц а 2

Количество отсчётов	Время решения на однопроцессорной системе (мс)	Время решения на многопроцессорной системе (мс)	Время решения на GPU (float) (мс)	Время решения на GPU (double) (мс)
10000	15	16	3,27	5,2
20000	16	16	3,88	7,75
50000	47	31	8,47	14,88
100000	141	47	11,23	29,13
250000	234	78	21	63,29
500000	390	125	39,7	123,17
750000	687	171	54,53	179,45
1000000	827	249	73,47	239,23
2500000	2278	562	170	588

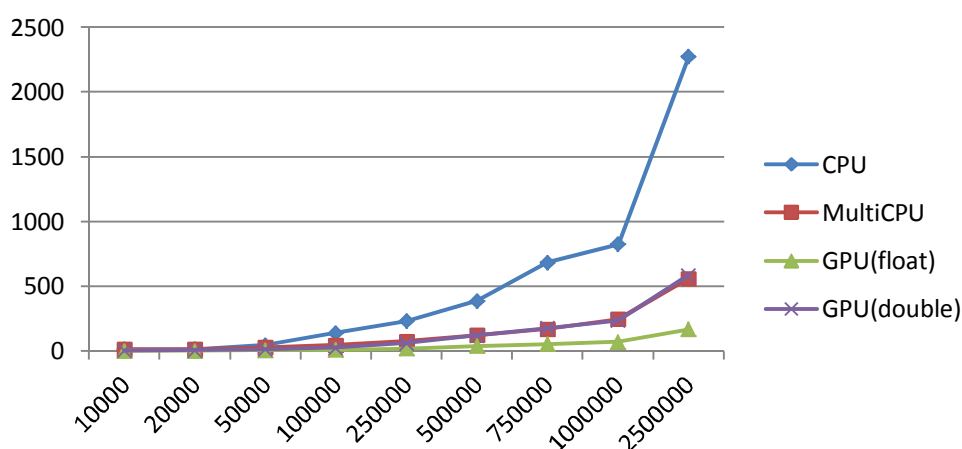


Рис. 7. График зависимости времени вычисления от размерности исходного массива

Заключение. Рассмотрены примеры алгоритмов, позволяющих осуществить параллельные вычисления коэффициентов отображающей функции. Результаты экспериментальных расчетов показали, что на многоядерном процессоре с технологией hyper-threading быстродействие пропорционально количеству физических ядер и соизмеримо с реализацией на графическом процессоре.

Также результаты эксперимента показали, что время исполнения алгоритма на процессорах видеокарты GeForce GTX 295 сравнимо со временем вычисления на четырехядерном процессоре Intel Core i7-965 EE 3,2 ГГц при использовании двойной точности. Однако применение одинарной точности на GPU позволяет снизить время вычислений более чем в три раза, в случае применения многопоточного программирования на CPU. Если же работает только одно ядро центрального процессора, то вычисления на GPU происходят быстрее в четыре раза для типа double, и в 13 раз – для типа float. Полученные результаты объясняются большими затратами времени на обмен данными и результатами вычислений между памятью CPU и GPU.

Также на различных этапах отладки программы для вычисления на GPU было отмечено, что при больших объемах входных данных и малой вычислительной нагрузке (незначительное число действий на один элемент массива) вычисления на графических ускорителях становятся нерентабельными из-за копирования данных.

Рассматривая результаты исследований, можно заметить, что для современных моделей видеокарт время вычисления на одном ядре графического процессора сравнимо

со временем вычисления на всех четырех ядрах центрального процессора, причем при вычислениях на GPU центральный процессор практически не используется. Имея несколько видеокарт, можно закрепить каждую из них за отдельным ядром CPU, получив при этом некий аналог кластерной системы, где на каждом GPU будет обрабатываться свой сигнал, а центральный процессор только управлять вычислениями.

Список литературы

1. Введение в комплексный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. В. Кревецкий, А. К. Передреев и др. Под общей редакцией Я. А. Фурмана. – М.: Физматлит, 2002. – 592 с.
2. Роженцов, А. А. Оценка параметров и распознавание изображений трехмерных объектов с неупорядоченными отсчетами / А. А. Роженцов, А. А. Баев, А. С. Наумов // Автометрия. – 2010. – №1 – С. 57 – 69.
3. Джеффри Рихтер. Создание эффективных Win32-приложений с учетом специфики 64-разрядной версии Windows / Джеффри Рихтер. – СПб.: Питер, 2001. – 752 с.
4. CUDA Programming Guide Version 3.0. <http://developer.download.nvidia.com>
5. Ковальчук, С. В. Особенности адаптации вычислительных алгоритмов под параллельную вычислительную архитектуру GPU / С. В. Ковальчук, С. М. Вишняков, А. С. Мордвинцев, А. В. Бухановский // 8-я международная конференция «Высокопроизводительные параллельные вычисления на кластерных системах» (НПС-2008). – Казань, 2008. – С. 48 – 52.
6. Программирование на CUDA. <http://steps3d.narod.ru/tutorials/cuda-2-tutorial.html>

Статья поступила в редакцию 23.04.10.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект №10-01-00445-а, и по программе «Развитие научного потенциала высшей школы», проект 2.1.2/2204.

A. A. Rozhentsov, A. A. Baev, R. V. Eruslanov

PROBLEM SOLVING OF CALCULATION PARALLELIZATION DURING PROCESSING OF QUATERNION SIGNALS

The problem solving of parallel computing application for the realization of the algorithms of the processing of quaternion signals is suggested. The features of the use of parallel calculations on the central and graphics processors are described. The approaches to the parallelization of the base operations of the processing of quaternion signals for the problem solving of the analyses of spatial images are offered. The comparison of the quick-action of algorithms realized on the central and graphics processors is executed. The conditions which provide 10-15 times as much gain in the quick-action using the graphics coprocessor are shown. The received results show the appropriateness of the application of parallel calculations in the algorithms of the processing of quaternion signals.

Key words: parallel calculations, graphics processor, central processor, quaternion signals, computing streams.

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

E-mail: krtmbs@marstu.net

БАЕВ Алексей Александрович – аспирант кафедры радиотехнических и медико-биологических систем МарГТУ. Область научных интересов – цифровая обработка изображений и сигналов. Автор более 20 публикаций.

E-mail: krtmbs@marstu.net

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

E-mail: krtmbs@marstu.net

УДК 621.391.266

*А. Н. Леухин, Э. А. Курбанов, Н. В. Парсаев,
О. Н. Воробьев, А. В. Губаев, А. С. Шувалов,
Х. Э. Рахманов, С. А. Лежнин, А. В. Харитонов,
Е. Н. Потехин, С. А. Незамаев, Ю. А. Полевищикова*

ОЦЕНКА ТИПОВ НАДЗЕМНОГО ПОКРОВА ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАНДШАФТА НА КОСМИЧЕСКИХ СНИМКАХ

Рассмотрены вопросы анализа мультиспектральных космических снимков на территории Республики Марий Эл с целью распознавания объектов ландшафта надземного покрова. Выделены восемь типов надземного покрова для решения задачи сегментации изображения на различные классы ландшафта. Создана тематическая карта растительного покрова исследуемого региона.

Ключевые слова: космические снимки, лесные насаждения, спектральная яркость, геоинформационные системы, классификация, корреляционный анализ.

Введение. В последнее время возрастает актуальность автоматизации обработки космических снимков подстилающей поверхности ландшафтов поверхности Земли в геоинформационных системах. В частности, при региональной оценке лесных ресурсов важным направлением является распознавание типов растительного покрова и породного состава лесных насаждений по снимкам среднего разрешения. Среди исследователей при работе над картированием растительного покрова широкое распространение получили снимки американского спутника Landsat-7 ETM+ [1–3]. Полоса захвата в мультиспектральном диапазоне покрытия одного снимка этого спутника составляет более 34000 км², что по площади больше, чем территория Республики Марий Эл (РМЭ). Такой масштаб территориального покрытия позволяет решать множество задач в области лесного и сельского хозяйства, для выполнения которых в России в настоящее время широко используются зарубежные специализированные программные комплексы по работе со спутниковыми снимками (ENVI, ERDAS IMAGINE, Arc GIS и др.) [4].

Мультиспектральные космические снимки Landsat-7 ETM+ имеют разрешающую способность 30 м, то есть одному пикселю изображения соответствует участок земной поверхности размером 30×30 м. Ввиду такого разрешения, при дешифрировании снимков возрастает сложность их обработки, что также влияет на правильность принятия решения о принадлежности различных растительных объектов на исследуемой сцене к одному классу типа наземного покрытия. Для решения задач по дешифрированию растительного покрова и породного состава лесов на космических снимках среднего разрешения становится недостаточной оценка только одного признака. Признаковое пространство включает в себя учет таких параметров, как яркость и цветность опти-

ческих изображений в видимом диапазоне, а также учет изображений поверхности в других спектральных диапазонах (инфракрасном и ультрафиолетовом).

Целью работы была оценка наиболее важных типов наземного покрытия на мультиспектральных снимках спутника Landsat-7 ETM+, используемых при классификации в геоинформационных программных пакетах и тематическом картировании ландшафта поверхности Земли. Для выполнения этой цели были решены следующие **задачи**:

- заложены тестовые пробные площади на территории РМЭ для различных классов растительного покрова с их географической привязкой на местности и нахождении на космических мультиспектральных снимках спутника Landsat-7 ETM+;
- создана тематическая карта на синтезированном спутниковом снимке в программном пакете ENVI-4.7 методом управляемой классификации, с последующим выявлением наиболее представленных классов типов наземного покрытия территории РМЭ;
- проанализированы признаки мультиспектральных изображений для различных классов ландшафта (типов наземного покрова) на спутниковых снимках среднего разрешения: статистические характеристики, гистограммы распределений яркости, корреляционные и спектральные характеристики мультиспектральных изображений.

1. Описание исходных данных. Для решения задачи классификации типа наземного покрытия и выделения классифицируемых признаков были использованы космические мультиспектральные снимки пяти спектральных диапазонов сцены (p172r021_7dt20010510 от 05.10.2001) спутника Landsat-7 ETM+. В табл. 1 приведена характеристика спектральных каналов спутника. Каналы 1, 2 и 3 соответствуют видимому излучению (каналам В, G, R, соответственно), а каналы 4 и 5 – ближнему и среднему инфракрасным спектральным диапазонам.

Т а б л и ц а 1

Характеристики мультиспектральных снимков радиометра ETM+ Landsat 7

Номер канала	Название спектрального диапазона	Спектральный диапазон (мкм)	Пространственное разрешение (м)
1	В	0,45 - 0,515	30
2	G	0,525 – 0,605	30
3	R	0,63 – 0,690	30
4	ближнее ИК	0,75-0,90	30
5	среднее ИК	1,55 – 1,75	30

На рис. 1 представлены фрагменты пяти спектральных диапазонов изучаемой сцены космического снимка на территории РМЭ.

Полевые исследования были проведены с июня по сентябрь в 2008–2010 годах таким образом, чтобы максимально учесть густоту и пространственное распределение растительного покрова на площадках 10x10 м [5]. Каждая пробная площадь на абрисе привязывалась к квартальной сети или ближайшему хорошо распознаваемому объекту местности. Кроме того, географические координаты каждой пробной площади фиксировались с помощью GPS-приёмника GARMIN eTrex.

2. Тематическая карта представляет собой форму представления знаний с ориентацией на улучшение поиска информации [6]. При работе со спутниковыми снимками формирование тематической карты представляет собой процесс дешифрирования объектов местности (типов наземного покрова), осуществляемый при помощи классификации изучаемой сцены на основе выделенных информативных признаков. Распознавание

объектов ландшафта на мультиспектральных снимках обычно базируется на выявлении различий в спектральных характеристиках исследуемых типов наземного покрова.

Под классификацией спутниковых изображений понимают процесс выделения объектов растрового изображения к одному из заранее заданных тематических классов. В основе этого процесса лежит использование различий между спектральной яркостью выделенных классов в различных спектральных каналах снимка. Оба процесса классификации (управляемая и неуправляемая) изображений основаны на использовании наборов спектральных, текстурных и других характеристик объектов, называемых сигнатурами [7]. Каждому заданному кластеру соответствует своя сигнатура, которая используется для установления принадлежности к нему классифицируемых объектов изображения земной поверхности. Сигнатуры могут быть параметрическими, то есть основанными на статистических параметрах объектов, относящимися к обучающей выборке, и непараметрическими, представляющими кластеры в пространстве признаков (пиксели, выделения и т.п.).

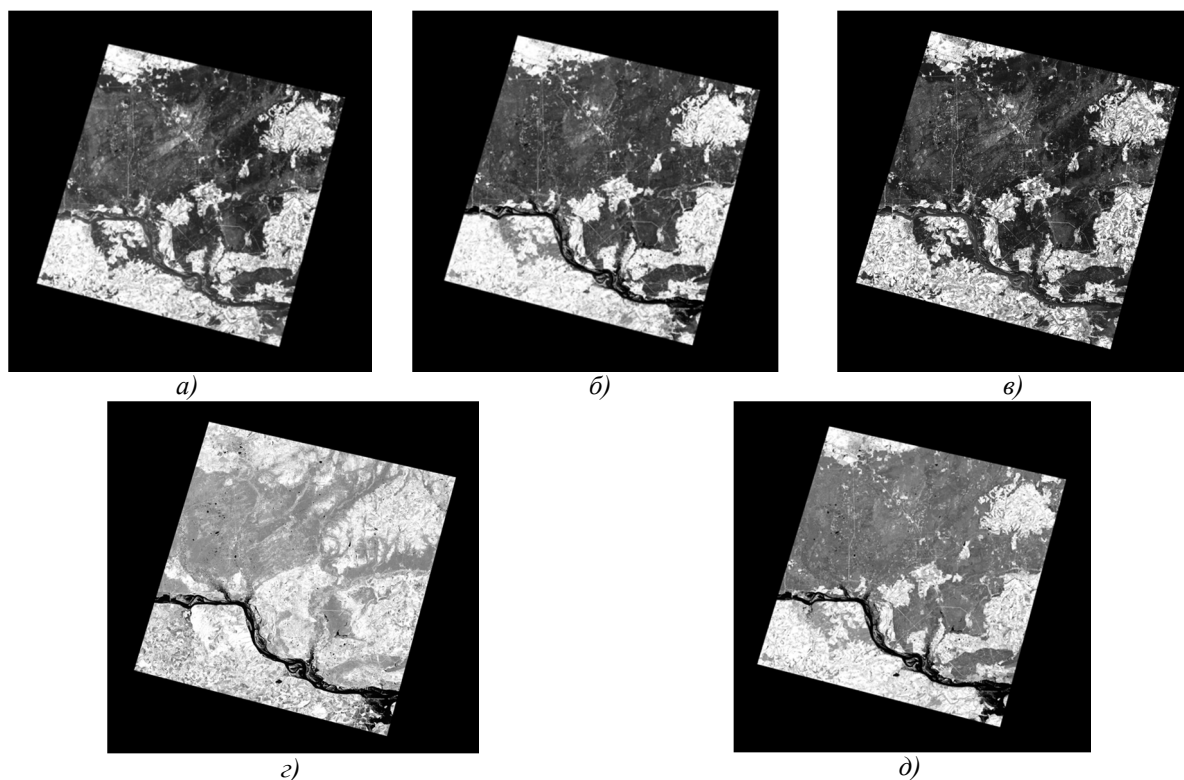


Рис. 1. Мультиспектральные космические снимки территории ландшафта Республики Марий Эл:
а) 1-го канала, б) 2-го канала, в) 3-го канала, г) 4-го канала, д) 5-го канала

На исследуемую площадь была создана тематическая карта методом управляемой классификации на основании данных тестовых полевых исследований, а также глазомерной таксации (рис. 2). Для повышения точности классификации использовались планы лесонасаждений и таксационные описания лесничеств, позволившие определить местоположение всех объектов классификации на космическом снимке. На мультиспектральных снимках для каждого класса типа наземного покрова ландшафта сцены было выбрано по 50 тестовых эталонных участков, представляющих собой растровые изображения площадью 20×20 пикселей. В качестве тестовых объектов на снимках выбирались участки, принадлежность которых к одному из классов была установлена в ходе проведения полевых работ [5].

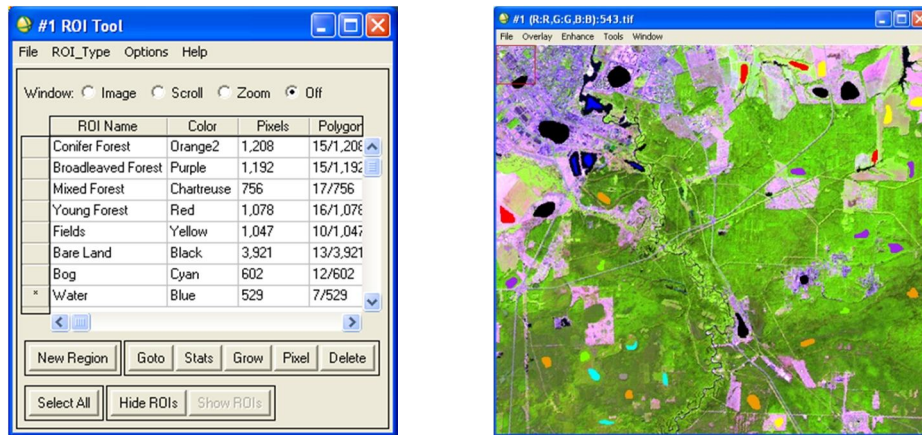


Рис. 2. Формирование обучающей выборки на спутниковом снимке Landsat-7 ETM+ (комбинация каналов 543) в программном пакете ENVI-4.7. Выделенные области интереса (классы) по цветам: оранжевый – хвойный лес, фиолетовый – лиственный лес, зеленый – смешанный лес, красный – участки лесовозобновления, желтый – сельхозугодья, черный – открытые участки, голубой – болото, синий – вода

По мультиспектральным снимкам была проведена классификация типов наземной поверхности и построена тематическая карта основных объектов ландшафта исследуемого региона (рис. 3). Для этого каждый пиксель спектрального изображения должен быть отнесен к одному из восьми типов наземного покрова: 1) открытые участки (ОУ); 2) сельхозугодья (СУ); 3) участки лесовозобновления (УЛ); 4) лиственный лес (ЛЛ); 5) хвойный лес (ХЛ); 6) смешанный лес (СЛ); 7) вода (В); 8) болото (Б). К открытым участкам были отнесены населенные пункты, участки лесовозобновления представлены в основном молодыми лиственными породами деревьев.

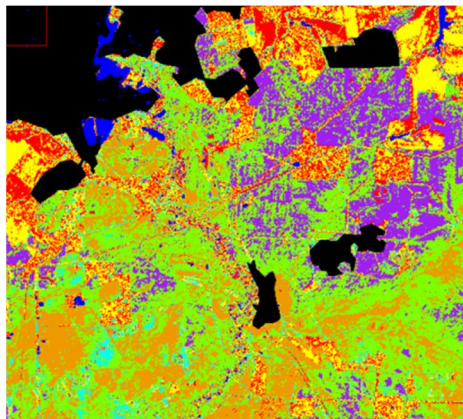


Рис. 3. Фрагмент тематической карты восьми типов наземного покрова, построенный с применением обучающей выборки в пакете ENVI-4.7

Таким образом, для распознавания типов наземного покрова по мультиспектральным снимкам сформирован набор типов наземного покрова, характеризующий каждый из тестовых участков, на основании которых возможно разбиение элементов спутникового изображения на классы с заданной точностью.

3. Анализ спектральных значений типов наземного покрова. Методы цифровой обработки изображений рассмотрены в работах [8 – 13].

В данной работе проведен корреляционный анализ изображений тестовых участков, соответствующих каждому из вышеуказанных классов ландшафта. Для этого были определены корреляционные характеристики между тестовыми изображениями, принадлежащими к одному классу, а также корреляционные характеристики между тестовыми изображениями, принадлежащими различным классам.

Корреляционную функцию двух изображений $\mathbf{X}^{(m)} = \{x_{k_m, l_m}^{(m)}\}_{0, K_m-1; 0, L_m-1}$ и $\mathbf{X}^{(n)} = \{x_{k_n, l_n}^{(n)}\}_{0, K_n-1; 0, L_n-1}$ определим следующим образом:

$$R_{m,n} = \max_{d,s} \left[\frac{1}{\sqrt{E_m E_n}} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} x_{(k+d) \bmod K, (l+s) \bmod L}^{(m)} \cdot x_{k,l}^{(n)} \right],$$

$$E_m = \frac{1}{K_m L_m} \sum_{k=0}^{K_m-1} \sum_{l=0}^{L_m-1} (x_{k,l}^{(m)})^2, \quad E_n = \frac{1}{K_n L_n} \sum_{k=0}^{K_n-1} \sum_{l=0}^{L_n-1} (x_{k,l}^{(n)})^2, \quad (1)$$

$$d = 0, 1, \dots, K-1, \quad s = 0, 1, \dots, L-1, \quad m, n = 1, \dots, N,$$

где $K = \max(K_m, K_n)$ – максимальное значение числа строк в изображениях $\mathbf{X}^{(m)}$ и $\mathbf{X}^{(n)}$; $L = \max(L_m, L_n)$ – максимальное значение числа столбцов в изображениях $\mathbf{X}^{(m)}$ и $\mathbf{X}^{(n)}$; E_m и E_n – значение энергии изображений $\mathbf{X}^{(m)}$ и $\mathbf{X}^{(n)}$, соответственно.

Коэффициент корреляции, определяющий меру схожести тестовых изображений класса i с тестовыми изображениями j , представляет собой меру различия тестовых изображений, соответствующих разным классам (в случае, когда $i \neq j$), или определяет меру схожести тестовых изображений, соответствующих одному классу (в случае, когда $i = j$):

$$K_{i,j} = \begin{cases} \min(R_{m,n}), & \text{если } i = j \\ \max(R_{m,n}), & \text{если } i \neq j \end{cases}, \quad m, n = 1, \dots, N, \quad (2)$$

где $R_{m,n}$ – коэффициент корреляции между m -м тестовым изображением, принадлежащим классу i и n -м тестовым изображением, принадлежащим классу j .

В табл. 2 – 6 приведены коэффициенты корреляции между тестовыми изображениями в пяти спектральных каналах, соответствующими распознаваемым классам наземной поверхности.

Т а б л и ц а 2

Значение коэффициентов корреляции в спектральном канале 1

	ОУ	СУ	УЛ	ЛЛ	ХЛ	СЛ	В	Б
ОУ	0.4507	0.9901	0.9506	0.885	0.7462	0.7987	0.7101	0.8258
СУ	0.9901	0.8051	0.9964	0.9437	0.7332	0.7135	0.7445	0.7934
УЛ	0.9506	0.9964	0.9413	0.945	0.7302	0.6483	0.7434	0.7848
ЛЛ	0.885	0.9437	0.945	0.6719	0.6984	0.6261	0.7091	0.7512
ХЛ	0.7462	0.7332	0.7302	0.6984	0.4868	0.9052	0.9352	0.9605
СЛ	0.7987	0.7135	0.6483	0.6261	0.9052	0.5185	0.8876	0.9578
В	0.7101	0.7445	0.7434	0.7091	0.9352	0.8876	0.2482	0.9352
Б	0.8258	0.7934	0.7848	0.7512	0.9605	0.9578	0.9352	0.3885

Т а б л и ц а 3

Значение коэффициентов корреляции в спектральном канале 2

	ОУ	СУ	УЛ	ЛЛ	ХЛ	СЛ	В	Б
ОУ	0.4005	0.9813	0.945	0.9052	0.7562	0.8156	0.6877	0.83
СУ	0.9813	0.8051	0.9999	0.9746	0.7446	0.7466	0.7409	0.8061
УЛ	0.945	0.9999	0.9537	0.9764	0.745	0.6967	0.7454	0.8083
ЛЛ	0.9052	0.9746	0.9764	0.8679	0.7337	0.7065	0.736	0.8033
ХЛ	0.7562	0.7446	0.745	0.7337	0.5008	0.9613	0.8258	0.9638
СЛ	0.8156	0.7466	0.6967	0.7065	0.9613	0.5526	0.658	0.9898
В	0.6877	0.7409	0.7454	0.736	0.8258	0.658	0	0.6563
Б	0.83	0.8061	0.8083	0.8033	0.9638	0.9898	0.6563	0.3765

Т а б л и ц а 4

Значение коэффициентов корреляции в спектральном канале 3

	ОУ	СУ	УЛ	ЛЛ	ХЛ	СЛ	В	Б
ОУ	0.472	0.982	0.9443	0.8615	0.754	0.7845	0.7793	0.8404
СУ	0.982	0.8051	0.9954	0.9237	0.7462	0.7263	0.8428	0.8053
УЛ	0.9443	0.9954	0.942	0.9311	0.731	0.6594	0.8417	0.8097
ЛЛ	0.8615	0.9237	0.9311	0.6679	0.7006	0.645	0.7761	0.7413
ХЛ	0.754	0.7462	0.731	0.7006	0.4938	0.889	0.9528	0.9757
СЛ	0.7845	0.7263	0.6594	0.645	0.889	0.5103	0.8429	0.9604
В	0.7793	0.8428	0.8417	0.7761	0.9528	0.8429	0.08992	0.9199
Б	0.8404	0.8053	0.8097	0.7413	0.9757	0.9604	0.9199	0.3897

Т а б л и ц а 5

Значение коэффициентов корреляции в спектральном канале 4

	ОУ	СУ	УЛ	ЛЛ	ХЛ	СЛ	В	Б
ОУ	0.4303	0.989	0.9481	0.9216	0.7495	0.8081	0.7134	0.8269
СУ	0.989	0.8144	0.9991	0.999	0.7647	0.7714	0.7456	0.7926
УЛ	0.9481	0.9991	0.9574	0.9999	0.7466	0.7068	0.7463	0.7744
ЛЛ	0.9216	0.999	0.9999	0.9249	0.7479	0.6916	0.7468	0.776
ХЛ	0.7495	0.7647	0.7466	0.7479	0.5068	0.9992	0.9288	0.9983
СЛ	0.8081	0.7714	0.7068	0.6916	0.9992	0.5442	0.9098	0.9994
В	0.7134	0.7456	0.7463	0.7468	0.9288	0.9098	0.2898	0.9114
Б	0.8269	0.7926	0.7744	0.776	0.9983	0.9994	0.9114	0.3568

Т а б л и ц а 6

Значение коэффициентов корреляции в спектральном канале 5

	ОУ	СУ	УЛ	ЛЛ	ХЛ	СЛ	В	Б
ОУ	0.4344	0.9829	0.946	0.9135	0.7528	0.8073	0.7012	0.8301
СУ	0.9829	0.805	0.9994	0.9989	0.7555	0.7574	0.6718	0.7989
УЛ	0.946	0.9994	0.9577	0.9986	0.7403	0.7104	0.6625	0.7868
ЛЛ	0.9135	0.9989	0.9986	0.9266	0.7418	0.6954	0.6671	0.7809
ХЛ	0.7528	0.7555	0.7403	0.7418	0.5069	0.9958	0.8799	0.996
СЛ	0.8073	0.7574	0.7104	0.6954	0.9958	0.5534	0.876	0.9981
В	0.7012	0.6718	0.6625	0.6671	0.8799	0.876	0.2835	0.8767
Б	0.8301	0.7989	0.7868	0.7809	0.996	0.9981	0.8767	0.3793

Проведенные исследования показали, что корреляционные признаки не являются информативными ввиду высокой неоднородности распределений яркостей наземных объектов во всех рассматриваемых спектральных диапазонах, что исключает возможность распознавания типа наземного покрова на основании корреляционного анализа.

Проведем статистический анализ тестовых изображений, соответствующих каждому из классов. Для этого вычислим математическое ожидание и среднеквадратическое отклонение значений яркостей тестовых изображений во всех рассматриваемых спектральных диапазонах, соответствующих всем рассматриваемым классам.

Математическое ожидание тестового изображения $\mathbf{X} = \{x_{k,l}\}_{0,K-1;0,L-1}$ определяется на основании выражения:

$$M = \frac{1}{KL} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} x_{k,l}, \quad (3)$$

а среднеквадратическое отклонение определяется на основании выражения:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{KL-1} \sum_{k=0}^{K-1} \sum_{l=0}^{L-1} (x_{k,l} - M)^2}. \quad (4)$$

В табл. 7 и 8 приведены групповые математические ожидания и групповые дисперсии значений математических ожиданий тестовых изображений, соответствующих определенному классу, которые определяются по формулам:

групповое математическое ожидание:

$$M^{(j)} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} M_n^{(j)}, \quad (5)$$

где $M^{(j)}$ – групповое математическое ожидание для класса j , $M_n^{(j)}$ – математическое ожидание n -го тестового изображения класса j , N – количество тестовых изображений в классе j ;

групповое среднеквадратическое отклонение:

$$\sigma^{(j)} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} (M_n^{(j)} - M^{(j)})^2}, \quad (6)$$

где $\sigma^{(j)}$ – групповое среднеквадратическое отклонение математических ожиданий для класса j .

Т а б л и ц а 7

**Значение групповых математических ожиданий
математических ожиданий тестовых изображений**

Номер канала	Класс подстилающей поверхности							
	ОУ	СУ	УЛ	ЛЛ	ХЛ	СЛ	В	Б
1	162.3	255	158.6	23.28	76.33	35.01	29.12	153.3
2	153.6	255	221.2	70.1	59.64	119.4	7.481	129.1
3	181.8	254.9	176.1	43.52	86.15	58.63	48.95	120.4
4	116.7	200.2	254.6	250.4	138.2	245.7	6.926	186.8
5	123.5	254.7	211.8	121.6	107.1	140.5	5.049	140.2

Т а б л и ц а 8

**Значение групповых среднеквадратических отклонений
математических ожиданий тестовых изображений**

Номер канала	Тип подстилающей поверхности							
	ОУ	СУ	УЛ	ЛЛ	ХЛ	СЛ	В	Б
1	72.41	0.06325	33.22	5.19	10.06	11.13	27.27	41.46
2	83.02	0.03162	18.98	8.271	9.198	35.64	9.749	26.02
3	71.44	0.08498	31.77	9.707	9.478	16.11	29.81	26.86
4	43.43	24.12	0.7276	3.678	6.618	19	3.142	6.992
5	45.14	0.4927	15.56	3.407	8.155	14.43	2.693	7.711

Как видно из табл. 7 и 8, наиболее информативными с точки зрения максимального расстояния математических ожиданий эталонных изображений, соответствующих распознаваемым классам, являются 4-й и 5-й спектральные каналы. В каналах видимого диапазона (1, 2 и 3) большинство распознаваемых классов образуют пересекающиеся

множества, и поэтому распознавание типа подстилающей поверхности в данных спектральных диапазонах с требуемой точностью не представляется возможным.

Гистограммы распределения яркости эталонных изображений, соответствующих распознаваемым классам, для спектральных диапазонов 4 и 5 приведены на рис. 4.

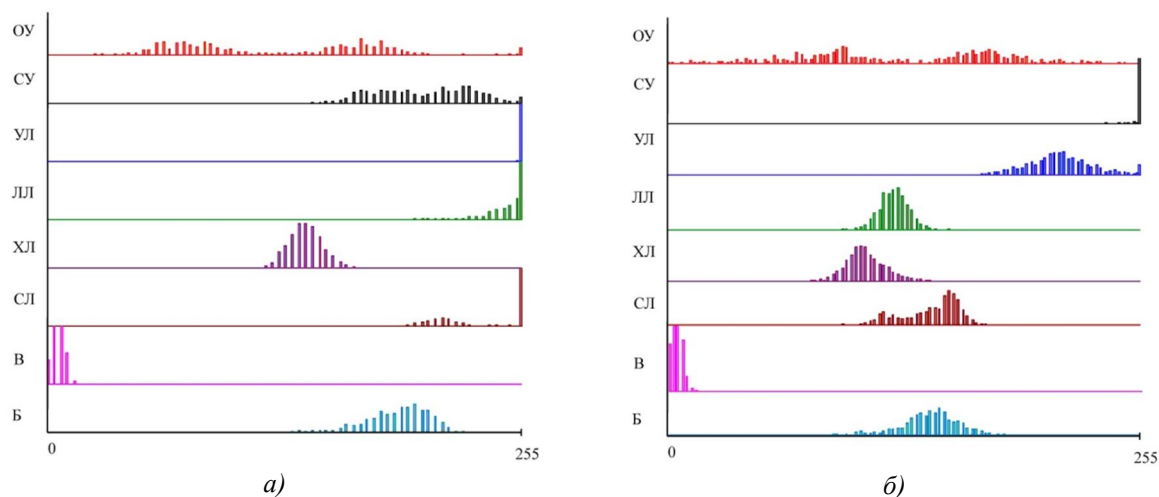


Рис. 4. Гистограммы распределения яркости эталонных изображений:
а) для 4-го канала, б) для 5-го канала

Закключение. Выполненные исследования позволили выявить основные информативные спектральные диапазоны космических снимков Landsat-7 ETM+, учитывающие распределение яркости для восьми типов наземного покрова. На основе выделенных признаков спектральной яркости с применением метода управляемой классификации составлена тематическая карта типов наземного покрова ландшафта Республики Марий Эл. Было установлено, что тематическая карта, полученная при автоматическом использовании выделенных информативных диапазонов, без дополнительной процедуры обучения является менее точной. Применение обучающей выборки является необходимым, так как выделенные информативные признаки в признаковом пространстве сильно пересекаются.

Список литературы

1. Курбанов, Э. А. Использование спутниковых снимков высокого и среднего разрешений для изучения естественного возобновления сосны на землях запаса / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, А. В. Губаев и др. // Международное сотрудничество в лесном секторе: баланс образования, науки и производства: материалы международной конференции. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2009. – С. 249 – 253.
2. Hall, R. J. Modeling forest stand structure attributes using Landsat ETM+ data: Application to mapping of aboveground biomass and stand volume / R. J. Hall, R. S. Skakun, E. J. Arsenault, B. S. Case // Forest Ecology and Management. – 2006. – No. 225. – Pp. 378 – 390.
3. Labrecque, S. A. Comparison of four methods to map biomass from Landsat-TM and inventory data in western Newfoundland / S. A. Labrecque, R. A. Fournier, J. E. Luther, D. Piercey // Forest Ecology and Management. – 2006. – No. 226. – Pp. 129 – 144.
4. Колесникова, О. Н. Новые возможности ПК ENVI 4.7. Интеграция ENVI EX и Arc GIS Desktop / О. Н. Колесникова, Н. Б. Ялдыгина // Геоматика. – 2010. – № 2(7). – С. 43 – 49.
5. Курбанов, Э. А. Пространственная динамика фитомассы березняков на бывших сельскохозяйственных землях Марийского Заволжья / Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев, Л. С. Устюгова и др. // Лесной журнал. – 2010. – №3. – С. 8 – 14.

6. ISO/IEC 13250 Topic Maps. – second edition. – 2002. [Электронный ресурс]: http://www1.y12.doe.gov/capabilities/sgml/sc34/document/0322_files/iso13250-2nd-ed-v2.pdf (Дата обращения: 04.11.2010)
7. Сухих, В. И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: Учебник. – Йошкар – Ола: МарГТУ, 2005. – 392 с.
8. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений / У. Прэтт; Пер. с англ. – М.: Мир, 1981. – 518 с.
9. Методы компьютерной обработки изображений / Под ред. В. А. Сойфера. – М.: Физматлит, 2001. – 784 с.
10. Narendra, P. M. A non-parametric clustering scheme for LANSATSAT / P. M. Narendra, M. Goldberg // Pattern Recognition. – 1977. – No. 9. – Pp. 207 – 215.
11. Kropatsch, W. Digital image analysis: selected techniques / W. Kropatsch, H. Bischof. – New York: Springer-Verlag, 2001. – 505 p.
12. Фурман, Я. А. Введение в контурный анализ и его приложения к обработке изображений и сигналов / Я. А. Фурман, А. К. Передреев, А. В. Кревецкий и др.; Под ред. Я. А. Фурмана. – М.: Физматлит, 2003. – 592 с.
13. Сидорова, В. С. Оценка качества классификации многоспектральных изображений гистограммным методом / В. С. Сидорова // Автометрия. – 2007. – Т. 43. – №1. – С. 37 – 43.

Статья поступила в редакцию 10.11.10.

Работа выполнена при финансовой поддержке по темам НИР в рамках ГК №02.740.11.0838; ГК №02.740.11.5202.

*A. N. Leukhin, E. A. Kurbanov, N. V. Parsaev,
O. N. Vorobiev, A. V. Gubaev, A. S. Shuvalov,
H. E. Rakhmanov, S. A. Lezhnin, A. V. Haritonov,
E. N. Potekhin, S. A. Nezamaev, Y. A. Polevshchikova*

ESTIMATION OF OVERGROUND COVER TYPES FOR IDENTIFICATION OF LANDSCAPE OBJECTS ON SATELLITE PHOTOGRAPHS

The problems of the analyses of multispectral space images on the territory of the Republic Mari El for the identification of the landscape objects of the overground cover have been studied. Eight types of the overground cover were allocated for the problem solving of the image segmentation into different classes of the landscape. The thematic map of the vegetation cover of the investigated region has been made.

Key words: *space photographs, afforestation, spectral radiance, geo information systems, classification, correlation analyses.*

ЛЕУХИН Анатолий Николаевич – доктор физико-математических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой информационной безопасности МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор более 170 научных публикаций, в том числе соавтор двух монографий, изданных в издательстве «Физматлит».

E-mail: code@marstu.net

КУРБАНОВ Эльдар Аликрамович – доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства МарГТУ, руководитель Центра устойчивого управления лесами. Область научных интересов – устойчивое управление лесами, биологическая продуктивность лесных экосистем, депонирование углерода лесными экосистемами, дистанционное зондирование земли, леса Киото. Автор более 90 научных и учебно-методических работ.

E-mail: kurbanovea@marstu.net

ПАРСАЕВ Николай Владимирович – кандидат технических наук, доцент кафедры информационной безопасности МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор более 20 публикаций.

E-mail: code@marstu.net

ВОРОБЬЕВ Олег Николаевич – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование лесов, депонирование углерода лесными экосистемами, мониторинг лесных экосистем. Автор более 20 научных и учебно-методических работ.

E-mail: vorobievon@marstu.net

ГУБАЕВ Александр Владимирович – соискатель кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 10 публикаций.

E-mail: galex@marstu.net

ШУВАЛОВ Андрей Сергеевич – аспирант кафедры информационной безопасности МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор шести публикаций.

E-mail: code@marstu.net

РАХМАНОВ Хошим Эрдашович – аспирант кафедры информационной безопасности МарГТУ. Область научных интересов – программирование в области решения задач распознавания образов (обработка, анализ и распознавание изображений и сигналов). Автор трех публикаций.

E-mail: hoshimbek@mail.ru

ЛЕЖНИН Сергей Анатольевич – аспирант кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 10 публикаций.

E-mail: lejnsa@marstu.net

ХАРИТОНОВ Андрей Васильевич – студент 5 курса специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности» МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор трех публикаций.

E-mail: code@marstu.net

ПОТЕХИН Егор Николаевич – студент 5 курса специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности» МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор трех публикаций.

E-mail: code@marstu.net

НЕЗАМАЕВ Сергей Александрович – программист кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор 10 публикаций.

E-mail: nezamaevsa@marstu.net

ПОЛЕВЩИКОВА Юлия Александровна – программист кафедры лесоводства МарГТУ. Область научных интересов – дистанционное зондирование земли, биологическая продуктивность лесных экосистем. Автор пяти публикаций.

E-mail: polevshikovaya@marstu.net

УДК 004.896; 681.2.082; 681.518.3

А. Г. Коробейников, Ю. А. Копытенко, В. С. Исмагилов

ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрено применение интеллектуальных информационных систем магнитных измерений, разработанных в Санкт-Петербургском филиале учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН» (СПбФ ИЗМИРАН). Данные системы основаны на знаниях и представляют собой комплекс программных, лингвистических и логико-математических средств для решения конкретных задач в режиме диалога на естественном языке.

Ключевые слова: интеллектуальные системы, магнитометрия, прогноз землетрясений, навигация по магнитному полю Земли, поиск магнитных объектов.

Введение. Интеллектуальные системы (ИС) обычно подразделяются на два класса: системы общего назначения и специализированные [1]. Технология использования систем общего назначения состоит в следующем. Пользователь (эксперт) формирует знания (данные и правила), описывающие выбранную проблемную область. Далее на основании этих знаний, заданной цели, исходных данных и метапроцедур система генерирует и исполняет решение задачи. Данную технологию называют технологией систем, основанных на знаниях, или технологией инженерии знаний. Она позволяет специалисту, не обладающему профессиональными знаниями в области программирования, разрабатывать информационные прикладные приложения. В настоящее время инструментальными средствами общего назначения являются экспертные оболочки и языки обработки знаний [2, 3].

В общем случае все системы, основанные на знаниях, можно подразделить на системы, решающие задачи анализа, и на системы, решающие задачи синтеза. Основное отличие задач анализа от задач синтеза заключается в том, что если в задачах анализа множество решений может быть перечислено и включено в ИС, то в задачах синтеза множество решений потенциально не ограничено и строится из решений наиболее удовлетворяющих техническому заданию.

Многие задачи, где используются данные магнитных измерений, относятся к плохо или слабо формализованным задачам. Для их решения в настоящее время широко применяются разновидности ИС – экспертные системы (ЭС) и интеллектуальные информационные системы (ИИС).

Задачи, решаемые при помощи ИИС, обычно классифицируют следующим образом: интерпретация, планирование, прогнозирование, мониторинг, проектирование, диагностика, обучение, контроль и управление.

ИИС магнитных измерений (МИ) в реальной практике учитывают специфику предметной области, и поэтому используют методы соответствующего класса. Обычно это интерпретация, прогнозирование, контроль и управление.

ИИС магнитных измерений для прогнозирования местоположения очага будущего сильного землетрясения. Наблюдения сверхнизкочастотных (СНЧ) и ультранизкочастотных (УНЧ) электромагнитных волн ($F = 10 - 0,001$ Гц) в сейсмоактивных зонах проводятся в течение последних 15 – 20 лет, после появления высокочувствительных магнитометров. Результаты измерений в различных сейсмически активных районах Земли показали, что как на подготовительной стадии развития очаговых зон средних и сильных (магнитуда $M > 5$) землетрясений, так и в период афтершоковой активности, на больших расстояниях от будущего эпицентра наблюдаются аномальные СНЧ электромагнитные излучения большой интенсивности. Как правило, эти эмиссии имеют шумовой характер, возникают задолго до главного сейсмического толчка и продолжаются в течение всего периода сейсмической активности.

Измерения параметров геомагнитных вариаций в одной точке на поверхности Земли не позволяют определить направление на источник вариаций. ИИС МИ позволяют решить эту задачу, используя дифференциальные методы измерений. В настоящее время одним из основных методов является фазово-градиентный метод для исследования геомагнитных пульсаций. Этот метод позволяет по трем трехкомпонентным магнитным станциям, расположенным на земной поверхности треугольником на небольшом (до 5 км) расстоянии друг от друга (магнитный градиентометр), построить векторы градиентов и фазовых скоростей геомагнитных пульсаций вдоль земной поверхности для любой из трех компонент магнитного поля. При этом предполагается, что расстояние между станциями много меньше расстояния до источника геомагнитных вариаций и длины геомагнитной волны. В этом случае градиенты магнитного поля вариаций и фазовые скорости геомагнитных волн будут близки к истинным величинам. Векторы градиентов геомагнитных волн, как правило, направлены к локальному источнику пульсаций, а векторы фазовых скоростей – от источника. Если имеются данные МИ от двух магнитных градиентометров, разнесенных на расстояние примерно в 100 км, то ИИС МИ по пересечению направлений этих векторов позволяет определять местоположение источника (точнее, его проекцию на земную поверхность), то есть проводить магнитную локацию [4].

ИИС МИ в каждом конкретном случае принимает решение о нахождении градиентов и фазовых скоростей геомагнитных вариаций одним из двух способов – чисто экспериментальным путем или в рамках модели плоской электромагнитной волны.

В первом случае необходимо определять фазовые задержки и разности величин амплитуд вариаций между двумя любыми парами станций магнитного градиентометра, состоящего из трех разнесенных станций. Поскольку координаты магнитных станций и расстояние между ними известно, то можно определить градиенты и фазовые скорости для двух пар станций, выбранных из трех станций магнитного градиентометра, и затем построить вектор фазовой скорости и градиента пульсаций вдоль земной поверхности.

В рамках модели плоской электромагнитной волны величина фазовой скорости между двумя точками на земной поверхности определяется через амплитуды соответствующих компонент вариаций магнитного поля с учетом фазовой задержки.

Экспериментальная эксплуатация ИИС МИ для решения задач прогнозирования местоположения очагов будущих сильных землетрясений проводилась с 1998 года в Японии на полуостровах Изу и Босо, где велась регистрация вариаций магнитного поля Земли (МПЗ) и теллурических токов шестью высокочувствительными цифровыми трехкомпонентными магнитными станциями MVC-3DS, разработанными в СПбФ ИЗМИРАН. На рис. 1 показано расположение магнитных станций (треугольники) на территории Японии.

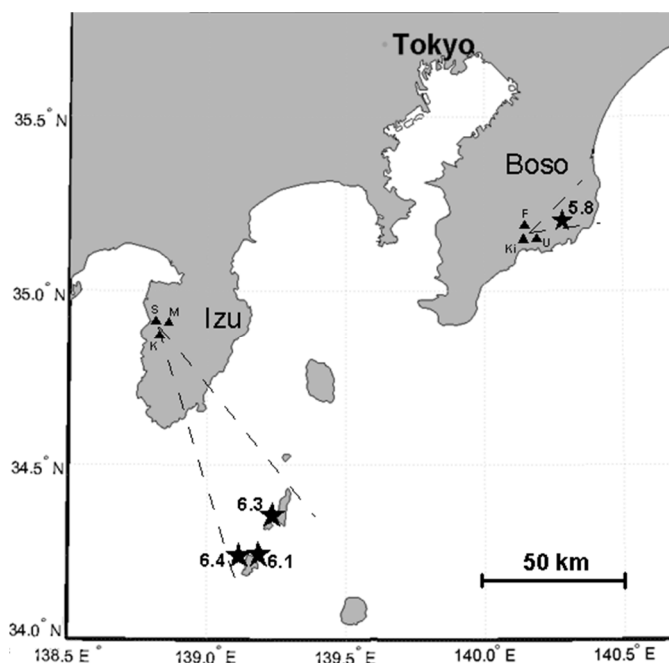


Рис. 1. Расположение магнитных станций и эпицентров сильных землетрясений в Японии. Треугольники – станции S, M, K (Сейкоши, Мочикоши, Камо) и F, Ki, U (Фудаго, Киосуми, Учиура), звездочки – эпицентры землетрясений, цифры рядом – магнитуда землетрясения

Три станции расположены на полуострове Изу (Сейкоши, Мочикоши и Камо) и три – на полуострове Босо (Фудаго, Учиура и Киосуми). Дискретность регистрируемых данных составляет 50 Гц, а для синхронизации одновременной работы магнитных датчиков используется система GPS на каждой станции. В состав ИИС МИ входили две группы по три станции MVC-3DS, представляющие собой магнитный градиентометр. Станции в каждой группе располагались на расстоянии 4 – 7 км друг от друга. Эпицентры землетрясений показаны звездочками. Цифры рядом с эпицентрами означают магнитуду землетрясения, определенную по 9-балльной шкале в соответствии с классификацией Японского метеорологического агентства (JMA). Землетрясения с $M > 6$ произошли в 2000 году, а с $M = 5,8$ – в 2003 году.

Сейсмически активный период, в ходе которого произошло три землетрясения с магнитудой больше шести, начался 26.06.2000, и продолжался затем более трех месяцев. Самый сильный сейсмический толчок произошел 01.07.2000 и имел магнитуду $M=6,4$. Эпицентр этого землетрясения был расположен на глубине примерно 15 км под морской поверхностью на расстоянии примерно 85 км к юго-востоку от магнитных станций, размещенных на полуострове Изу, и на расстоянии примерно 140 км к юго-западу от магнитных станций, расположенных на полуострове Босо (рис. 1).

Сейсмическая активность в районе полуострова Босо развивалась в течение всего 2003 года и характеризовалась большим количеством слабых и средних сейсмических толчков ($M < 4$) вокруг магнитных станций, установленных здесь. Самый сильный толчок имел магнитуду 5,8 балла (по шкале JMA) и произошел 20.09.2003 на глубине 60 км. Эпицентр его находился примерно в 15 км к северо-востоку от станции Киосуме (рис. 1).

На рис. 2 показано полученное при помощи ИИС МИ anomальное поведение градиентов и фазовых скоростей геомагнитных эмиссий в частотном диапазоне $F = 0,1-0,4$ Гц.

На рисунке символы V_g , V_z , G_g , G_z означают фазовые скорости и градиенты в полной горизонтальной и вертикальной компонентах МПЗ. Верхняя панель – магнитуды сейсмических толчков ($M > 2$) в окрестности до 50 км от магнитных станций. Из рисунка

видно, что в 2003 году на полуострове Босо примерно за полгода до момента землетрясения с магнитудой $M = 5,8$, отмеченного на рис. 2 вертикальной пунктирной линией, градиенты в полной горизонтальной и в вертикальной компоненте МПЗ начинают возрастать и достигают своего максимума за 2 – 3 месяца до землетрясения. В это же время фазовые скорости уменьшаются, и минимальные значения наблюдаются перед землетрясением.

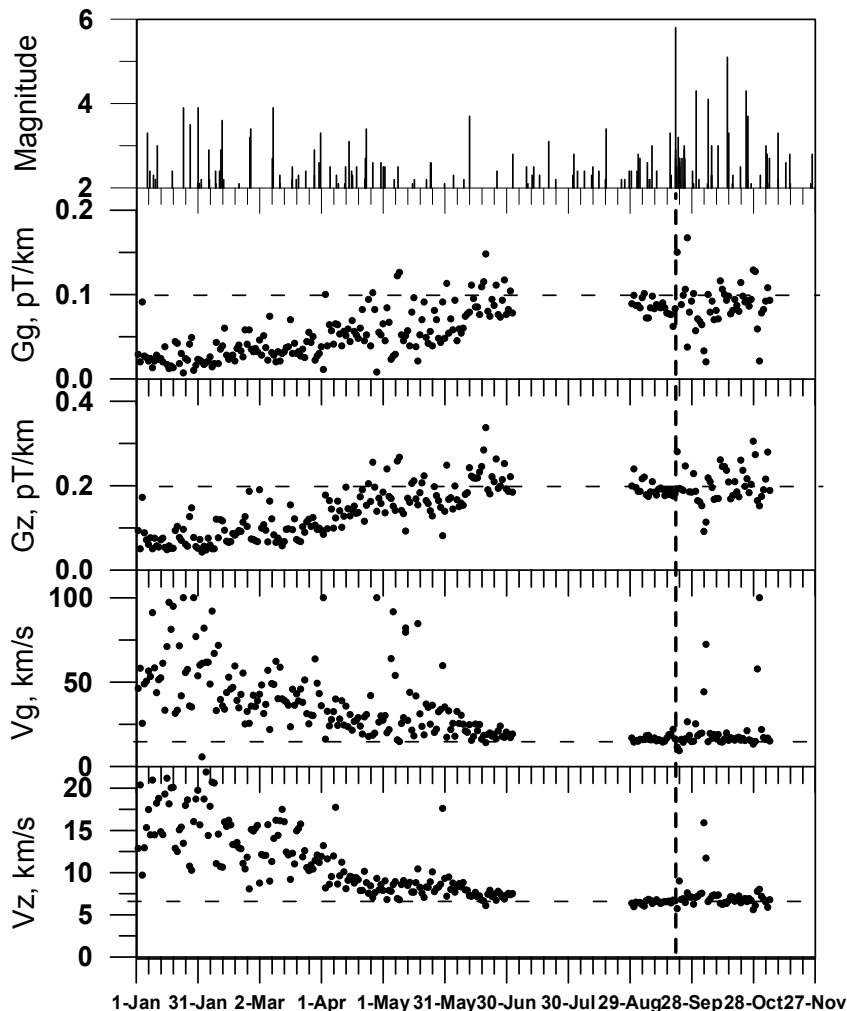


Рис. 2. Градиенты и фазовые скорости геомагнитных эмиссий ($F=0,1-0,4$ Гц) до и после землетрясения $M=5,8$ на п-ве Босо (Япония) в 2003 году

Такое же, но менее выраженное anomальное поведение градиентов и фазовых скоростей наблюдается также и в более низкочастотном диапазоне СНЧ геомагнитных возмущений ($F < 0,1$ Гц). К сожалению, данные за июль и август 2003 года на одной из магнитных станций отсутствуют, что не позволяет построить векторы градиентов и фазовых скоростей.

Таким образом, представленные результаты показывают, что применение ИИС ММ позволяет определять местоположение источника будущего сильного землетрясения, то есть давать краткосрочный прогноз сильного землетрясения.

ИИС магнитных измерений в навигационных системах беспилотных летательных аппаратов. В настоящее время в России и за рубежом растет интерес к ис-

пользованию ИИС МИ для построения систем автономной магнитной навигации (САМН) по МПЗ для различных типов летательных аппаратов (ЛА), таких как: самолеты, космические аппараты (КА) и беспилотные летательные аппараты (БЛА) на малых высотах [5, 6].

Это обусловлено преимуществами САМН: высокой автономностью, помехозащищенностью и точностью, малым весом и потреблением электроэнергии, малыми габаритами, возможностью функционирования в любых метеоусловиях и времени суток. Кроме того, эта система практически не накладывает ограничений на угловые эволюции БЛА в процессе полета. Помимо этого использования САМН, особенно на борту БЛА, предназначенных для полета на малых высотах, позволяет увеличивать точность навигационного обеспечения БЛА при проведении измерений МПЗ с уменьшением высоты его полета в соответствии с известным свойством МПЗ, и особенно аномального МПЗ (АМПЗ): повышения его информативности в связи с уменьшением расстояния до ферромагнитных источников при использовании больших градиентов АМПЗ.

Многие из вышеперечисленных преимуществ САМН обусловлены достоинствами существующих и разрабатываемых в настоящее время магнитометров, в частности, на основе магниторезистивных датчиков (МРД).

Для повышения эффективности обеспечения БЛА целесообразно использовать САМН в сочетании с инерциальной системой навигации (ИСН).

ИИС МИ, находящаяся на борту БЛА, производит сравнение измеренных X_u и модельных значений X_p параметров АМПЗ, определяемых на основе бортовой магнитной карты (МК) заданного района. После этого ИИС МИ определяется вектор поправок состояния параметров движения БЛА – ΔX . С помощью этого вектора производится коррекция расчетного вектора состояния X_p , определяемого ИСН или скоростной системой счисления пути. Кроме этого ИИС МИ, на основе данных от ИСН, также обеспечивает решение задач навигации БЛА и выполнение его основных задач в аварийных ситуациях. Например, при отказе МРД, переходя в режим «памяти», а также, используя его, при больших естественных и искусственных возмущениях МПЗ, особенно при движении по маршрутам, проходящим по мерным участкам, где АМПЗ мало информативно, т.е. его градиенты характеризуются малыми величинами.

ИИС МИ при решении задачи определения параметров движения БЛА, помимо использования измерений АМПЗ, также привлекает дополнительную информацию в виде измерений магнитных полей ферромагнитных объектов, находящихся на маршрутах полетов БЛА, например, железнодорожных мостов, рельсовых путей, трубопроводов, линий электропередачи и т.д. При этом магнитные поля этих объектов должны быть занесены в МК заданного района.

Известные в настоящее время ИИС МИ, использующие абсолютные измерения и градиентный принцип формирования приращений измерений АМПЗ, в полной мере не учитывают длиннопериодные составляющие ошибок основных возмущающих факторов: вариаций МПЗ, магнитных бурь; собственных магнитных полей БЛА, ошибок построения МК (моделей МПЗ), ошибок МРД. Эти неточности учета возмущений, особенно вариаций МПЗ в период магнитных бурь, могут приводить к значительным, а в ряде случаев и к недопустимо большим ошибкам. В результате анализа основных возмущающих факторов выявлено, что длиннопериодные составляющие ошибки магнитометрических измерений имеют в большинстве случаев большую амплитуду по сравнению с высокочастотными составляющими.

Эта закономерность, т.е. существенно большее отрицательное влияние длиннопериодных возмущений на точностные характеристики САМН, относится не только к ва-

риациям МПЗ, но и к помехам, создаваемым собственными магнитными полями БЛА, ошибкам построения магнитных карт, а также погрешностям магнитометрической аппаратуры, магниторезистивных датчиков.

Для уменьшения отрицательного влияния возмущающих факторов, как долгопериодических, так и высокочастотных составляющих, на точностные параметры САМН необходимо использовать в ИИС МИ адаптивные статистические методы линейного и нелинейного оценивания вектора состояния.

Адаптивные методы оценивания разработаны в СПбФ ИЗМИРАН на основе способа формирования взвешенных приращений параметров АМПЗ и усовершенствованных статистических методов линейного и нелинейного оценивания вектора состояния, которые, в частности, осуществляют осреднение высокочастотных составляющих ошибок измерений.

ИИС магнитных измерений для поиска стационарных магнитных объектов, находящихся под водой. Для проведения поисковых работ по обнаружению стационарных магнитных объектов, находящихся под водой, или проведения магнитной съемки акватории моря для построения карт распределения пространственных вариаций градиентов магнитного поля также применяются ИИС МИ.

Основной особенностью ИИС МИ, разработанной в СПбФ ИЗМИРАН, является нахождение магнитных чувствительных элементов (магнитометров) на борту носителя (судна). В состав такой ИИС МИ входят мобильные автоматизированные градиентометрические установки (АГУ), состоящие из двух пространственно разнесенных высокочувствительных цифровых трехкомпонентных магнитовариационных станций GI-MTS-1, изготовленные в СПбФ ИЗМИРАН. Высокая чувствительность магнитометров комплекса GI-MTS-1 позволяет проводить высокоточный мониторинг вариаций УНЧ электромагнитных и сейсмических полей с целью изучения динамики источников УНЧ возмущений: ионосферного, литосферного и техногенного происхождения.

Измеренные вариации магнитного поля включают в себя естественные вариации ионосферного происхождения, поле локальной магнитной аномалии (если оно существует), помехи, возникающие вследствие вибраций и индуцирования токов в электропроводящих элементах носителя, и вариации, возникающие при качке вследствие изменения ориентации магнитных датчиков. Естественные вариации ионосферного происхождения в районе работ в дневные часы в диапазоне частот $F=0,5-0,1$ Гц обычно имеют малую амплитуду ($<0,2$ нТл) и могут быть проигнорированы. Помехи, возникающие вследствие вибраций при движении носителя, имеют частоты выше 1 Гц и частично подавляются виброгасящими основаниями под датчиками, и частично цифровой фильтрацией.

Наибольший вклад в помеху измерений вариаций МПЗ вносит изменение ориентации магнитных датчиков вследствие изменения курса, бортовой и килевой качки. Например, величина вертикальной компоненты МПЗ на широте Санкт-Петербурга составляет примерно 50000 нТл. Отклонение от вертикальной оси на 1° при качке приводит к появлению в горизонтальных компонентах квазисинусоидального сигнала с частотой качки и амплитудой ~ 1000 нТл ($\sin(1^\circ) * 50000 \approx 1000$). Проблема для этого типа помехи решается с помощью дифференциальных измерений на малой базе разнеса датчиков (2–6 м). Оба блока разнесенных магнитных датчиков жестко связаны с носителем. Поэтому изменения ориентации носовых и кормовых магнитных датчиков происходят одинаковым образом и синхронно, вследствие чего помеха от качки при вычислении разности соответствующих компонент магнитного поля (дифференцировании) исчезает. Угловыми перекасами, возникающими вследствие скручивания носителя

вокруг продольной оси, при малой базе разноса также можно пренебречь. Сигнал же от источника магнитной аномалии остается, т.к. кормовые датчики регистрируют поле источника с задержкой относительно носового. Градиент вариаций магнитного поля находится путем деления разности сигналов двух разнесенных датчиков на расстояние между ними.

Для проверки методики измерений и работоспособности градиентных установок на глубине 10 м была затоплена мишень (верхняя часть бакена весом около 200 кг). АГУ был установлен внутри малого гидрографического катера (МГК) с разномом магнитных датчиков 4 м вдоль диаметральной плоскости катера. МГК в течение двух дней выполнил 50 галсов в районе расположения мишени. После обработки зарегистрированных вариаций МПЗ построена карта двумерного распределения дифференциальных величин вариаций компонент МПЗ.

На рис. 3 различными оттенками серого цвета и изолиниями показано распределение дифференциальных величин вариаций Y -компоненты поля на площадке 40×40 м. Линиями на рисунке нанесены треки движения МГК. Серым треугольником на рисунке отмечено положение мишени, черным треугольником – положение мишени по распределению градиентов магнитного поля. Погрешность в определении местоположения мишени составляет 4 м. Поскольку для определения координат МГК использовался входящий в состав ИИС МИ недифференциальный приемник GPS со среднеквадратичной погрешностью 8 м, то результаты тестирования методики измерений и аппаратуры можно считать успешными.

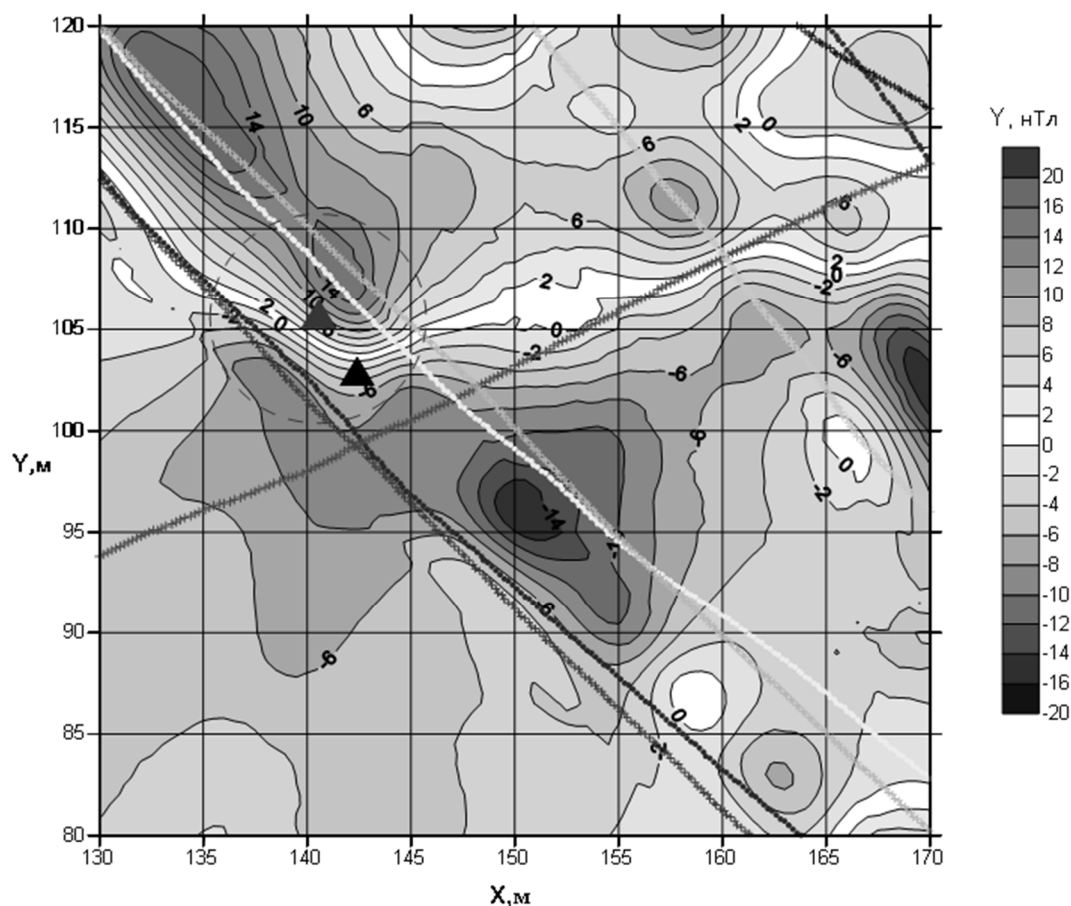


Рис. 3. Пространственное распределение Y -компоненты градиента магнитного поля в районе мишени

Заключение. Применение ИИС МИ позволяет эффективно решать различные задачи. В данной работе рассмотрено применение этих систем для решения трех задач. Дальнейшее развитие ИИС МИ предполагается проводить в нескольких направлениях: модификация и разработка математического, лингвистического, программного и технического обеспечения. Например, в задаче поиска стационарных магнитных объектов, находящихся под водой, дополнительное введение в состав ИИС МИ системы косвенной стабилизации позволит повысить на порядок способность системы к обнаружению намагниченных объектов.

Список литературы

1. Гаврилова, Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем / Т. А. Гаврилова, В. Ф. Хорошевский. – СПб.: Питер, 2000. – 384 с.
2. Попов, Э. В. Экспертные системы: Решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ / Э. В. Попов. – М.: Наука, 1987. – 288 с.
3. Корнеев, В. В. Базы данных. Интеллектуальная обработка информации / В. В. Корнеев, А. Ф. Га- раев, С. В. Васютин, В. В. Райх. – М.: Нолидж, 2001. – 352 с.
4. Копытенко, Ю. А. Магнитная локация источников геомагнитных возмущений / Ю. А. Копытенко, В. С. Исмагилов, Е. А. Копытенко и др. // ДАН. Серия: Геофизика. – 2000. – Т. 371. – № 5. – С. 685–687.
5. Табачук, И. Угроза с предельно малых высот / И. Табачук, Л. Ташкев. – Воздушно-космическая оборона. – 2007. – № 1 (32). – С. 50–57.
6. Лебедев, Д. В. Магнитометрическая система определения параметров движения космического аппарата / Д. В. Лебедев, А. И. Ткаченко // Проблемы управления и информатики. – 1997. – № 4. – С. 139–154.

Статья поступила в редакцию 08.11.10.

A. G. Korobeynikov, Y. A. Kopytenko, V. S. Ismagilov

APPLICATION OF INTELLIGENCE SYSTEMS OF MAGNETIC MEASUREMENTS

The application of intelligence information systems of magnetic measurements, developed in St. Petersburg Branch of the Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation named after N. V. Pushkov of the Russian Academy of Sciences (IZMIRAN) has been considered. The given systems are based on knowledge and represent a complex of programmed, linguistic and logic-mathematical means for the solution of specific problems in a dialogue mode in a natural language.

Key words: *intelligence systems, magnetometry, the forecast of earthquakes, earth magnetic field navigation, the search of magnetic objects.*

КОРОБЕЙНИКОВ Анатолий Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заместитель директора по науке Санкт-Петербургского филиала учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН». Область научных интересов – геофизика, математика, информатика, интеллектуальные системы, информационная безопасность. Автор более 200 публикаций.

E-mail: Korobeynikov_A_G@mail.ru

КОПЫТЕНКО Юрий Анатольевич – доктор физико-математических наук, профессор, директор Санкт-Петербургского филиала учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН». Область научных интересов – геофизика, математика, информатика, интеллектуальные системы, информационная безопасность. Автор более 200 публикаций.

E-mail: office@izmiran.spb.ru

ИСМАГИЛОВ Валерий Сарварович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского филиала учреждения Российской академии наук «Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкина РАН». Область научных интересов – геофизика, математика, информатика, интеллектуальные системы, информационная безопасность. Автор более 100 публикаций.

E-mail: IVS@izmiran.spb.ru

УДК 621.317.3:004.3

И. В. Петухов, Л. А. Стешина, М. Г. Глушкова

ИНФОРМАЦИОННОЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРА ЧЕЛОВЕКО-МАШИННЫХ СИСТЕМ

Предложена математическая модель исследования деятельности человека-оператора с использованием методов нечеткой логики и ее практическая реализация на основе среды моделирования MatLab. Модель позволяет определить степень соответствия индивидуальных качеств человека профессионально важным качествам, характерным для определенного вида операторской деятельности.

Ключевые слова: человек-оператор, человеко-машинные системы, моделирование, нечеткая логика.

Введение. Человек-оператор является одним из ключевых звеньев в управлении технологическими процессами. Деятельность оператора характеризуется наличием ряда опасных и вредных производственных факторов, высокой напряженностью труда, возможностью возникновения экстремальных ситуаций, связанных с риском аварийности и травматизма. При этом уровень ответственности оператора и цена допускаемых ошибок существенно возрастают.

Известно, что для успешного обучения и эффективной профессиональной деятельности человек должен обладать соответствующими профессионально важными качествами (ПВК). Последние определяются как физические, анатомо-физиологические, психические и личностные свойства и отношения человека к миру, полезные или необходимые для быстрого и точного освоения и решения его профессиональных задач.

Таким образом, задача определения профпригодности является актуальной и востребованной для решения в самых различных областях профессиональной деятельности человека.

В то же время, несмотря на значительное количество разработанных тестов, позволяющих определить наличие у человека определенных ПВК, следует отметить, что задача оценки профпригодности человека в целом не тривиальна, в силу сложных перекрестных связей ПВК, сложности интерпретации результатов тестирования и формализации процессов когнитивной деятельности человека.

Целью работы является разработка математической модели человека-оператора, позволяющей осуществить комплексную оценку его профпригодности к определенному роду операторской деятельности.

Теоретический анализ. Принято считать, что вне зависимости от специфики деятельности человека-оператора основные этапы операторской деятельности выглядят следующим образом [1]:

1) прием, восприятие поступающей информации, где выполняются следующие основные действия: обнаружение сигнала; выделение наиболее важных сигналов; расшифровка и декодирование информации; построение предварительного образа ситуации;

2) оценка и переработка информации, предполагающие выполнение следующих действий: запоминание информации; извлечение из памяти нормативных информационных образцов; декодирование информации;

3) принятие решения, при котором важную роль играет выделение оператором критерия правильного решения и соответствующего представлениям оператора о цели и результате своей работы;

4) реализация принятого решения, которая во многом зависит от готовности оператора быстро, на уровне автоматизма выполнять сложные действия в экстремальных условиях;

5) проверка решения и его коррекция.

Анализируя каждый из этапов операторской деятельности, можно констатировать, что каждый из выделенных этапов может рассматриваться с позиции ПВК.

В то же время очевидно, что для успешного решения какой-либо профессиональной задачи человек должен обладать не простым набором отдельных ПВК, а их системой, которая у разных профессионалов может не совпадать по составу, структуре, степени выраженности или включенности ПВК в процесс решения задачи. Именно это и определяет сложность построения модели оценки профпригодности человека-оператора.

Анализ научно-информационных источников выявил ряд подходов и моделей, используемых для описания отдельных этапов операторской деятельности, в том числе процессов восприятия и переработки информации, моделей операторского труда и надежности человеко-машинных систем (ЧМС) в целом.

Так, В. Г. Абашиным [2] предложена модель слежения, полученная на основе операционного метода представления технологического процесса с участием человека, где функция поведения человека-оператора описывается передаточной функцией второго порядка с учетом времени упреждения. При этом представленная модель линейна и не учитывает особенности психофункционального состояния человека-оператора и его динамику.

Известные модели зрительного восприятия человека, в том числе модель стереоскопического зрения В. А. Ляховецкого [3], модель формирования компенсаторных движений глаз в ответ на вестибулярный стимул Е. А. Муратовой [4], модель зрительного анализатора В. В. Роженцова [5] и т.д. не отражают взаимосвязь человека-оператора с технологической системой и носят частный характер.

В теории надежности программного обеспечения находит широкое применение математическая модель J. Muya [6], ориентированная на использование дискретной математической модели оператора.

В основу математической модели деятельности человека-оператора, предложенной В. М. Муниповым и В. П. Зинченко [7], положена идея использования методов Монте-Карло для имитации вероятностно-временных характеристик деятельности операторов. Данная модель предполагает декомпозицию деятельности оператора на отдельные операции. Однако следует отметить, что степень декомпозиции зависит от цели расчета и ограничивается выполнением только запланированных операций.

Наиболее полно отражение процессов когнитивного восприятия и познания представлено в работе по разработке и компьютерной реализации технологии прогнозирования эффективности деятельности оператора [8]. При этом под эффективностью деятельности подразумевается совместная оценка результативности процесса, психофизиологического обеспечения и социопсихофизиологической стоимости процесса взаимодействия, с использованием унифицированной технологии проведения психофизио-

логических исследований, включающей набор технических и программных средств проведения экспериментов, обработки результатов, интегрированной оценки психофизиологической структуры и состояний личности.

Очевидно, что обеспечение и поддержание на требуемом функциональном уровне когнитивных функций человека-оператора на каждом из отдельных этапов его деятельности является одним из подходов обеспечения надежности его профессиональной деятельности и, следовательно, и ЧМС в целом.

Предполагается, что профпригодность оператора характеризуется определенным набором общепсихологических (профессионально неспецифичных) и профессионально специфичных тестов, которые достоверно коррелируют с показателями успешности профессиональной работы в целом и на этом основании могут рассматриваться как ПВК. При этом набор тестовых методик для каждого вида операторской деятельности может быть различен.

Варьирование набора психофизиологических тестов позволяет эффективно моделировать большинство видов операторской деятельности в различных условиях среды обитания человека-оператора при воздействии на него различных факторов внешней среды, получать количественные и качественные характеристики его работоспособности.

Анализ нормативной документации свидетельствует, что большинство видов профессиональной деятельности и необходимых профессионально важных качеств, соответствующих им, строго регламентированы. Это обусловлено тем, что каждый вид операторской деятельности имеет свои особенности, определяемые технологией и объектом управления (различные виды работ и элементы трудового процесса, различный режим работы, сменность, различная напряженность труда, различный уровень автоматизации производственного процесса и т.д.).

Успешная реализация операторских функций обеспечивается определенными психофизиологическими качествами, такими, как внимание, память, технический интеллект, восприятие размеров (глазомер), вероятностное прогнозирование и т.д.

Анализ литературных источников свидетельствует, что фактически для каждого психофизиологического качества можно подобрать соответствующий психофизиологический тест.

В то же время следует отметить, что определение набора психофизиологических тестов также является далеко не простой задачей, имеющей много условий. Так, использование опросников не предусматривает многократное тестирование. Кроме того, многие психофизиологические тесты характеризуют не один ПВК, а несколько из них. Другой существенной проблемой является задача интерпретации результатов психофизиологического эксперимента и вынесения оценки. При этом оценка выносится на основе сравнения результатов испытуемого со среднестатистическими результатами.

Кроме того, следует отметить, что психофизическая деятельность человека не ориентирована на использование жесткой логики в категориях «да-нет», что находит отражение в результатах тестов.

Для устранения ряда указанных противоречий предложено использование методов нечеткой логики. Применение методов нечеткой логики на этапе обработки результатов позволит представить общую картину модели взаимодействия человека-оператора и технологической системы и выявить профессиональную пригодность индивидуума к операторской деятельности.

Модель профпригодности человека-оператора. Суть предложенного подхода к комплексной оценке ПВК и профпригодности человека-оператора в целом заключается в построении модели профпригодности человека-оператора на основе комплексного

анализа результатов психофизиологических экспериментов с применением методов нечеткой логики.

Очевидно, что ЧМС имеют совершенно другую системную сложность в отличие от технических систем, что и определяет сложность их моделирования. При этом следует отметить, что, подходя к построению математической модели профпригодности человека-оператора, нельзя забывать о главном свойстве человеческого интеллекта – способности принимать правильные решения в обстановке неполной и нечеткой информации. Поэтому применение математической теории нечетких множеств на этапах тестирования обработки и вывода результата позволяет построить модель, адекватную реальности.

Применение методов нечеткой логики наиболее эффективно в сложных трудно формализуемых и плохо структурированных процессах, которые могут управляться квалифицированными операторами без использования специфических знаний, лежащих в основе динамики функционирования этих процессов.

В данной работе построение математической модели профессиональной пригодности проводилось на основе установления функциональной связи между результатами тестирования и экспертными оценками.

Модель профессиональной пригодности представляет собой математическую зависимость показателя профессиональной пригодности от уровня развития профессионально важных психофизиологических и личностных качеств, определяемых по результатам тестирования.

Известно, что в общем случае механизм логического вывода включает четыре этапа: введение нечеткости (фазификация), нечеткий вывод, композиция и приведение к четкости, или дефазификация, как показано на рис. 1.

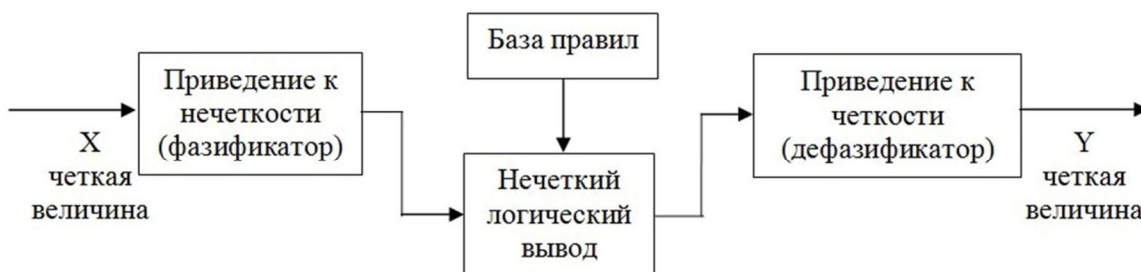


Рис. 1. Система нечеткого логического вывода

Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефазификации. В настоящее время наиболее широко известны модели нечеткого вывода Мамдани, Сугено, Ларсена и Цукамото.

Обобщенная структура нечеткой экспертной системы (ЭС) приведена на рис. 2.

Основу ЭС составляет подсистема логического вывода, которая использует информацию из базы правил (БП), генерирует рекомендации по решению искомой задачи. Обязательными частями ЭС являются модуль приобретения знаний и модуль отображения решений. Одновременная работа со знаниями и большими объемами информации из БП позволяет ЭС получить точные результаты.

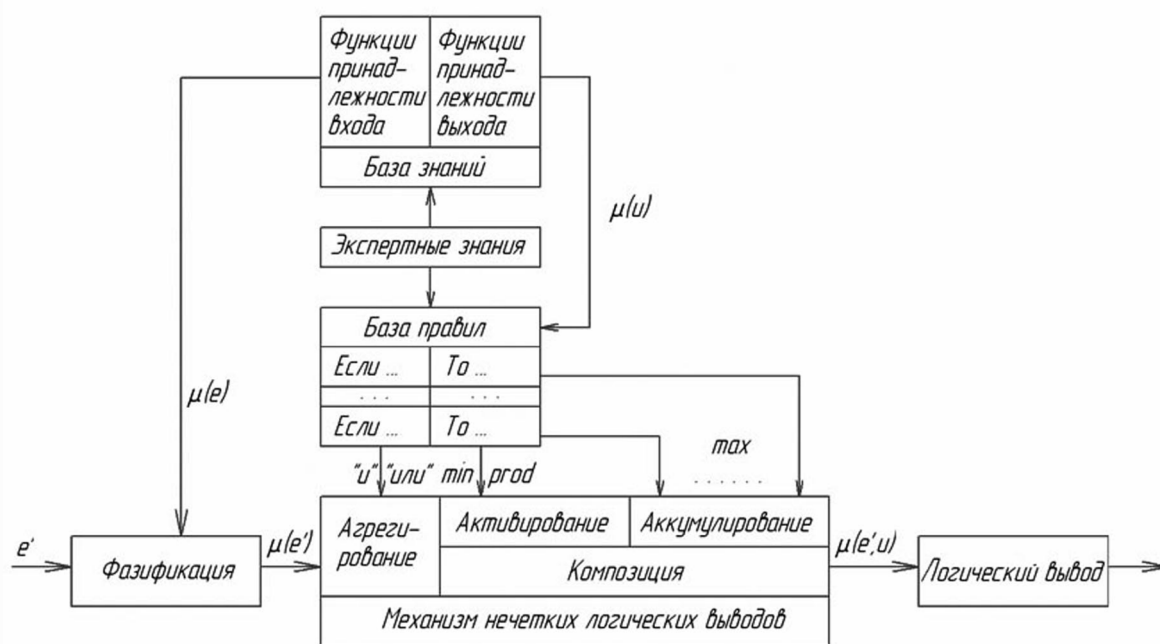


Рис. 2. Обобщенная структура нечеткой экспертной системы

Для реализации разработанного подхода на первом этапе предлагается выявление ПВК и соответствующих им психофизиологических качеств, характерных конкретному виду профессиональной деятельности.

Затем, на основе анализа апробированных и соответствующих стандартам психологической практики методик тестирования, определяют набор психофизиологических тестов.

Далее следует оценка важности соответствующих ПВК данному виду профессиональной деятельности человека-оператора и определение их взаимосвязи с тестами.

При этом предложено выбрать 12 наиболее значимых ПВК и разбить их на три группы по четыре ПВК в каждой: особо важные качества, важные качества и маловажные качества. Каждый из выбранных психофизиологических тестов может использоваться для тестирования нескольких ПВК.

На рис. 3 представлена структура перекрестных связей между психофизиологическими тестами и ПВК в общем виде.

Отличительной особенностью представленной модели является применение аппарата нечетких множеств уже на этапе тестирования.

Принимаем, что входная переменная x_i – значения тестов (T_i), на выходе y_i – значения профессионально важных качеств (ПВК_i).

Лингвистическая переменная для каждого из выбранного теста (T_i) состоит из пяти терм-множеств (очень плохой результат – 1, плохой результат – 2, нормальный – 3, хороший – 4, отличный результат – 5).

Лингвистическая переменная представлена следующим образом:

$$T_i = \left\{ \frac{\mu_{T_i}(x_i)}{x_i} \right\}, \quad (1)$$

где x_i – входная переменная – результаты тестов (T_i).

При этом входная функция принадлежности, или функция принадлежности к множеству T_i , задается в треугольном виде и описывается следующим образом:

$$\mu_{T_i}(x_i) = \begin{cases} 1 - \frac{b_i - x_i}{b_i - a_i}, & a \leq x \leq b \\ 1 - \frac{x_i - b_i}{c_i - b_i}, & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (2)$$

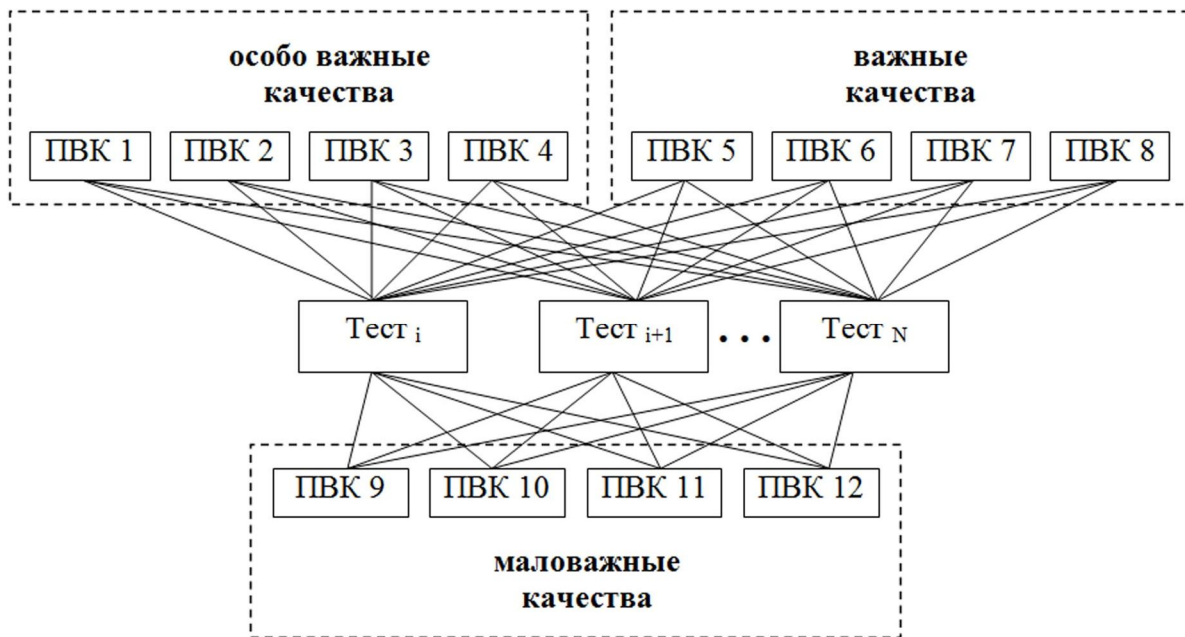


Рис. 3. Схема перекрестных связей между психофизиологическими методами тестирования и ПВК

По результатам тестирования представлен нечеткий вывод на основе механизма Мамдани (Mamdani). Это наиболее распространенный способ логического вывода в нечетких системах. В нем используется минимаксная композиция нечетких множеств. Данный механизм включает в себя следующую последовательность действий.

Процедура фазификации: определяются степени истинности, т.е. значения функций принадлежности для левых частей каждого правила (предпосылок). Для базы правил с m правилами обозначим степени истинности как $A_{ik}(x_k)$, $i=1..m$, $k=1..n$.

База правил в общем виде для первого этапа по результатам тестирования:

R_1 : Если $Тест_1(x_1)$ это очень плохо (A_{11}) и $Тест_2(x_2)$ это плохо (A_{12}) и $Тест_3(x_3)$ это плохо (A_{13}) и $Тест_4(x_4)$ это нормально (A_{14}), то $ПВК_1(y_1)$ это плохо (B_1);

R_n : Если $Тест_1(x_1)$ это очень плохо (A_{n1}) и $Тест_2(x_2)$ это хорошо (A_{n2}) и $Тест_3(x_3)$ это плохо (A_{n3}) и $Тест_4(x_4)$ это нормально (A_{n4}), то $ПВК_1(y_1)$ это хорошо (B_n).

Для представления нечеткого вывода сначала определяем уровни «отсечения» для левой части каждого из правил:

$$\alpha f A_i = \min(A_{ik}(T_k)).$$

Далее находим «усеченные» функции принадлежности:

$$B_i(y) = \min(\alpha f A_i, (B_i(y))).$$

Используя максимальную композицию нечетких множеств посредством объединения полученных усеченных функций, получим:

$$\mu(y) = \max(B_j(y)),$$

где $\mu(y)$ – функция принадлежности итогового нечеткого множества.

Рис. 4 графически показывает процесс нечеткого вывода по Мамдани для базы правил первого этапа. Причем на первом этапе, на выходе, имеем функцию принадлежности в нечетком виде.

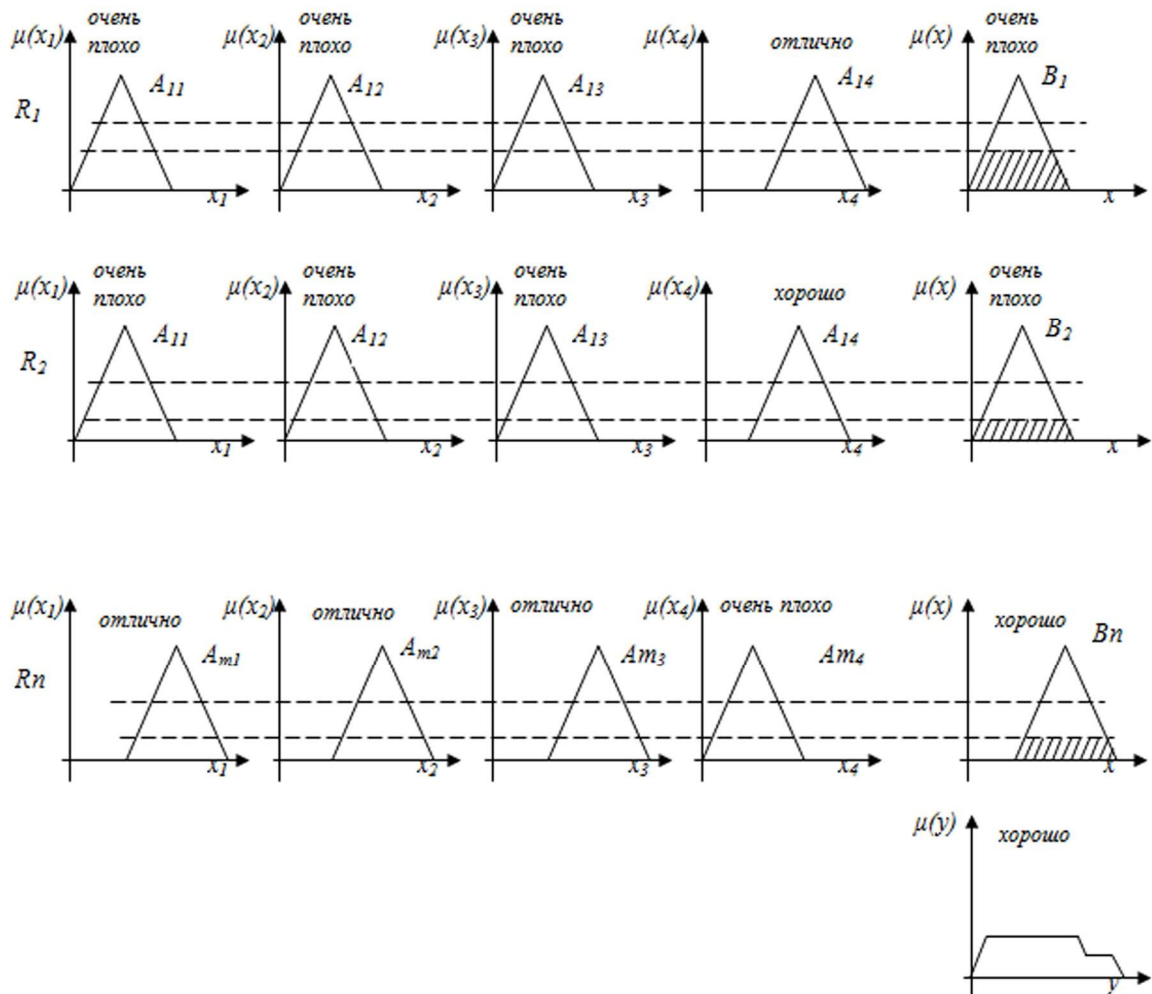


Рис. 4. Схема нечеткого вывода по Мамдани

Переходя ко второму этапу, представим следующую лингвистическую переменную $ПВК_i$, в которой входная переменная y_i – значения профессионально важных качеств ($ПВК_i$), на выходе z_i – значения группировки профессионально важных качеств ($ГПВК_i$). Лингвистическая переменная $ПВК_i$ содержит пять терм-множеств (очень плохой результат – 1, плохой результат – 2, нормальный – 3, хороший – 4, отличный результат – 5).

$$\text{Задание ЛП: } ПВК_i = \left\{ \mu_{ПВК_i}(y_i) \frac{\mu_{ПВК_i}(y_i)}{y_i} \right\}.$$

Функция принадлежности входа – это функция принадлежности выхода первого этапа в нечетком виде.

База правил строится для ОВК – особо важных качеств, ВК – важных качеств и МВК – маловажных качеств, представленных на рис. 3. Функция принадлежности выхода также представляется в нечетком виде.

На третьем этапе лингвистическая переменная говорит о профессиональной пригодности человека-оператора, где входная переменная z_i – значения ГПВК ($ГПВК_i$), на выходе d_i – значение годности оператора ТС (Г). Лингвистическая переменная $ГПВК_i$ содержит также пять терм-множеств (очень плохой результат – 1, плохой результат – 2, нормальный – 3, хороший – 4, отличный результат – 5).

$$\text{Задание ЛП: } ГПВК_i = \left\{ \frac{\mu_{ГПВК_i}(z_i)}{z_i} \right\}.$$

Функция принадлежности входа – это функция принадлежности выхода второго этапа в нечетком виде.

База правил для профессиональной годности человека-оператора определяется значениями ОВК, ВК и МВК. В результате функция принадлежности выхода представляется в нечетком виде, состояние которой может быть от 0 до 100 % годности. Для приведения к четкости, то есть дефазификация осуществляется по методу среднего центра.

Заключение. Представленная модель отражает в общем виде функциональную зависимость показателя профессиональной пригодности от уровня развития профессионально важных психофизиологических и личностных качеств, определяемых по результатам тестирования на основе методов нечетких множеств, позволяет оценить профессиональную пригодность человека-оператора и сформулировать рекомендации при обучении оператора относительно к его профессиональной деятельности.

Формирование баз правил для конкретного вида операторской деятельности осуществляется с использованием методов экспертной оценки для каждого конкретного случая, что позволяет транслировать представленную модель в общем виде на частные области операторского труда.

Апробация разработанной модели в частном виде осуществлена для оценки профпригодности человека-оператора транспортных систем и выполнена в пакете прикладных программ для решения задач технических вычислений MatLab.

Результаты апробации свидетельствуют о высокой адекватности разработанной модели реальной успешности операторской деятельности, оцененной с использованием методов экспертной оценки по критерию безаварийного вождения.

Дальнейшим развитием модели является формулировка рекомендаций для построения индивидуальной модели обучения человека-оператора в зависимости от специфических условий профессионального труда.

Список литературы

1. Стрелков, Ю. К. Инженерная и профессиональная психология / Ю. К. Стрелков. – М.: Академия, 2001. – 360 с.
2. Абашин, В. Г. Автоматизация процесса определения психофизиологического состояния оператора автоматизированного рабочего места в АСУТП: Автореф. дис...канд. техн. наук / В. Г. Абашин. – Орел, 2007. – 20 с.
3. Ляховецкий, В. А. Имитационная модель, методы и технические средства исследования стереоскопического зрения человека: Дис. ... канд. техн. наук / В. А. Ляховецкий. – СПб., 2004. – 168 с.
4. Муратова, Е. А. Трёхнейронная модель формирования компенсаторных движений глаз в ответ на вестибулярный стимул: Автореф. дис... канд. техн. наук / Е. А. Муратова. – М., 2006. – 20 с.

5. Роженцов, В. В. Моделирование процесса возбуждения зрительного анализатора / В. В. Роженцов // Биомедицинская радиоэлектроника. – 2008. – № 11. – С. 64–70.
6. Смагин, В. А. Дискретный аналог математической модели J. Muya и рекомендации по его применению в исследовании безошибочной работы коллективов и надежности программного обеспечения: Автореф. дис... канд. техн. наук / В. А. Смагин. – СПб., 2005. – 40 с.
7. Зинченко, В. П. Основы эргономики / В. П. Зинченко, В. М. Мунипов. – М.: МГУ, 2001. – 179 с.
8. Кузьмина, К. И. Байесовское прогнозирование эффективности деятельности оператора по психофизиологическим характеристикам структуры личности / К. И. Кузьмина, Т. М. Семик, О. В. Верёвка // Проблемы программирования. – 2005. – №1. – С. 69–84.

Статья поступила в редакцию 14.09.10.

Работа выполнена при поддержке гранта по аналитической ведомственной целевой программе «Развитие научного потенциала высшей школы (2009-2010 годы)» № 2.1.2/4841 «Методическое, алгоритмическое и программно-техническое обеспечение исследования временных аспектов сенсорного восприятия человека-оператора».

I. V. Petukhov, L. A. Steshina, M. G. Glushkova

INFORMATION AND MATHEMATICAL SUPPORT OF RESEARCH OF ACTIVITY OF OPERATOR OF MAN-MACHINE SYSTEMS

The mathematical model of the research of the activity of a man-operator by means of fuzzy logic methods and its practical realization on the basis of modeling environment MatLab is suggested. The model allows determining the degree of correspondence between individual and professionally significant qualities of a man, characteristic of the certain kind of operator work.

Key words: *man-operator, man-machine systems, modeling, fuzzy logic.*

ПЕТУХОВ Игорь Валерьевич – кандидат технических наук, профессор кафедры проектирования и производства ЭВС МарГТУ. Область научных интересов – информационные технологии в человеко-машинных системах управления. Автор 94 публикаций.

E-mail: laboratory502@rambler.ru

СТЕШИНА Людмила Александровна – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой проектирования и производства ЭВС МарГТУ. Область научных интересов – распределенные системы управления энерго- и материалоемкими технологическими процессами. Автор 39 публикаций.

E-mail: laboratory502@rambler.ru

ГЛУШКОВА Марина Герантьевна – магистрант радиотехнического факультета. Область научных интересов – моделирование, методы нечеткой логики. Автор двух публикаций.

E-mail: laboratory502@rambler.ru

ЭЛЕКТРОНИКА

УДК 621.391.266

И. А. Калашников, Л. Ю. Грунин, А. Н. Леухин

ГЕНЕРАТОР ФАЗОМАНИПУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ

Выполнен обзор фазоманипулированных последовательностей с хорошими и идеальными свойствами периодической автокорреляционной функции. Разработана схема генератора многофазных фазоманипулированных последовательностей на базе программируемой логической интегральной схемы Spartan-3E.

Ключевые слова: *многофазные последовательности с хорошими корреляционными свойствами, дельта-коррелированные фазоманипулированные последовательности, точность задания фазы, фазовый аккумулятор, программируемая логическая интегральная схема.*

Введение. Концепция широкополосных сложных сигналов нашла широкое применение в современных радиотехнических устройствах. Сигналы с хорошими корреляционными свойствами используются в радио- и гидролокации, в связи, в различных измерительных системах и системах синхронизации. Особое место занимают фазоманипулированные последовательности (ФМП). Такие последовательности требуются для систем широкополосного кодирования и разграничения множественного доступа (CDMA/SSMA) [1]. В глобальных спутниковых радионавигационных системах повышенные требования к точности, целостности и надежности позиционирования привели к созданию концепции введения в пользовательский интерфейс новых дальномерных сигналов, фазоманипулированных кодами больших длин. Причем в диапазоне L3 изначально ориентация строилась на применение фазоманипулированных сигналов с кодовым разделением. При этом предполагалось, что кодовое разделение позволит максимально рассредоточить энергию каждого из сигналов космического аппарата по всей отведенной полосе в противовес дроблению ресурса между спутниками, свойственному частотному разделению [2].

Наиболее привлекательным с практической точки зрения является применение последовательностей как можно с меньшим фазовым алфавитом, например, $\varphi = \{0, \pi\}$. Однако сетка периодов бифазных фазоманипулированных последовательностей с хорошими корреляционными свойствами является сравнительно редкой. С целью уплотнения сетки длин возможных кодовых последовательностей приходится увеличивать число градаций фазы в фазоманипулированном коде.

В данной работе будет описан практически реализованный способ генерации сложных сигналов с точностью задания фазы в тысячные доли градуса. Генератор фазоманипулированных сигналов (ГФС) выполнен на базе программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) класса FPGA (Field Program Gate Array) Spartan 3E производства концерна Xilinx [3].

1. Разновидности фазоманипулированных последовательностей с хорошими корреляционными характеристиками. На сегодняшний день разработаны конструкции различных фазоманипулированных последовательностей с хорошими и идеальными корреляционными свойствами. Фазоманипулированную последовательность можно определить в виде вектора $\Gamma = \{\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_{N-1}\}$ длины N . Каждый n -й кодовый элемент представляется в виде комплексного числа $\gamma_n = \exp(i2\pi\varphi_n)$ единичного модуля $|\gamma_n| = 1$, $n = 0, 1, \dots, N-1$, $i = \sqrt{-1}$. Фазоманипулированная последовательность может обладать одноуровневой периодической автокорреляционной функцией (ПАКФ)

$$r_\tau = \sum_{n=0}^{N-1} \gamma_n \cdot \gamma_{n+\tau \pmod{N}} = \begin{cases} N, & \tau = 0; \\ a, & \tau = 1, 2, \dots, N-1 \end{cases}, \quad (1)$$

где $a = [a_{\min}; a_{\max}]$ – уровень боковых лепестков (БЛ), принимающий любое произвольное значение из указанного диапазона. Глобальный максимум БЛ может достигать значений $a_{\max} = N$, а глобальный минимум $a_{\min} = N/(1-N)$. В случае $a = 0$ фазоманипулированную последовательность принято называть идеальной (дельта-коррелированной).

Полный обзор известных оптимальных бинарных последовательностей с фазовым алфавитом $\varphi = \{0, \pi\}$, уровнем БЛ $a = -1$ и длинами $N = 2^n - 1$, $p, p_1 \cdot p_2$ ($p = 4t - 1$, $p_1, p_2 = p_1 + 2$ – простые числа), построенных на основе циклических разностных множеств Адамара, представлен в работе [4]: последовательности Лежандра, Якоби, Холла, М-последовательности, GMW-последовательности, 3-term последовательности, 5-term последовательности, WG-последовательности, гипервальные конструкции Segre, гипервальные конструкции Glynn 1-го и 2-го типов, последовательности степенных функций Касами H и B_k типов. Также известен ряд бинарных последовательностей с хорошими корреляционными свойствами: код Кердока [5, 6] длины $N = 2 \cdot (2^n - 1)$ (n – нечетное) и уровнем БЛ $a = 1$; коды, построенные на основе неадмаровых разностных множеств [7]. В работах [8, 9] на основе бинарных оптимальных последовательностей был предложен способ построения ФМП с идеальной ПАКФ с фазовым алфавитом $\varphi = \left\{0, \arccos\left(\frac{1-N}{1+N}\right)\right\}$. В работе [10] предложен способ построения

ФМП с одноуровневой ПАКФ и с фазовым алфавитом $\varphi = \left\{0, \pi - \arccos\left(\frac{N-1-2a}{N+2}\right)\right\}$, где уровень БЛ изменяется в пределах $a = [-1; N]$.

В работах [11–13] предложены конструкции ФМП с трехфазным алфавитом $\varphi = \left\{0, \pm \arccos\left(\frac{-1 + \sqrt{N + (N-1) \cdot a}}{N-1}\right)\right\}$ и уровнем БЛ из диапазона $a = [N/(1-N); N]$, с

трехфазным алфавитом $\varphi = \left\{ 0, \pm \arccos \left(\frac{-1 - \sqrt{N + (N-1) \cdot a}}{N-1} \right) \right\}$ и уровнем БЛ из диапа-

зона $a = [N/(1-N); N-4]$ простых длин $N = p = 4t + 1$. В работе [14] предложены кон-

струкции для трехфазных последовательностей с идеальной ПАКФ с алфавитом $\varphi = \{0, \alpha, \beta\}$, (где $\alpha = \arccos \left(c \sqrt{\frac{2}{1+c}} \right) + 12 \arccos(c)$, $\beta = \alpha + \arccos(c)$, $c = \frac{1-3^{m-1}}{2 \cdot 2^{m-1}}$)

длины $N = q^m - 1$, где $q = 3$.

В работах [15–17] предложены конструкции ФМП с идеальной ПАКФ с четырех-
фазным алфавитом $\varphi = \{0, \alpha, \beta, \gamma\}$ длин $N = 2p$ [15], длин $N = 3p$, $p \equiv 3 \pmod{4}$ [16],
длин $N = p_1 p_2$, $p_2 > p_1 > 3$, $p_{1,2} \equiv 3 \pmod{4}$ [17], где фазы α, β, γ принимают ирраци-
ональные значения.

В работах [11–13] предложены конструкции ФМП с пятифазным алфавитом $\varphi = \{0, \pm\alpha, \pm\beta\}$ длины $N = p = 2^{2^k} + 1$, $k \geq 2$,

$$\alpha = \arccos \left(\frac{-\sqrt{N + (N-1)d^2 + 2d\sqrt{(N-1)N}(-\sqrt{N-1} + d\sqrt{N})}}{-N + (N-1)d^2} \right), \quad \beta = \arccos(d),$$

$c = 1 - \sqrt{(a+1)N-a}$, $d = \left(\sqrt{(N-1)N} - c - \sqrt{N-1+c^2} \right) / (N-1)$ с уровнем БЛ из допу-
стимого диапазона $a = [N/(1-N); N]$.

$$\alpha = \arccos \left(\frac{-\sqrt{N + (N-1)d^2 + 2d\sqrt{(N-1)N}(-\sqrt{N-1} + d\sqrt{N})}}{-N + (N-1)d^2} \right), \quad \beta = \arccos(d),$$

$c = 1 + \sqrt{(a+1)N-a}$, $d = \left(\sqrt{(N-1)N} - c - \sqrt{N-1+c^2} \right) / (N-1)$ с уровнем БЛ из допу-
стимого диапазона $a = [N/(1-N); N-4]$.

Достаточно полный обзор конструкций ФМП с идеальными и хорошими свойства-
ми ПАКФ с большим объемом фазового алфавита можно найти в работе [18]. На сего-
дняшний день задача поиска идеальных многофазных последовательностей с рацио-
нальными фазами $\{\varphi\}$ считается решенной полностью [19]. В рамках предложенного
метода [19] удалось построить такие известные многофазные последовательности, как:

1) обобщенные (модулированные) коды Френка длины $N = k^2$ (k – любое поло-
жительное целое), частными случаями которых являются коды Френка, коды класса P1;

2) обобщенные (модулированные) коды Задорфа-Чу длины $N = s \cdot k^2$ (k и s – лю-
бые положительные целые), частными случаями которых являются модулированные
коды Френка и коды Милевского, коды классов P1, P3 и P4;

3) все разновидности кодов Задорфа-Чу произвольной длины N , частными случа-
ями которых являются коды Задорфа, коды Чу, коды классов P3 и P4, многофазные ко-
ды Голомба, многофазные коды Ипатова;

4) многофазные последовательности, ассоциированные с обобщенными бент-
функциями.

Среди ФМП с хорошими корреляционными свойствами следует отметить также последовательности [19]: Голда, Касами, Люка 1, 2 и 3-го типов, последовательности кубических фаз, последовательности степенных вычетов, четырехфазные последовательности бент-функций, четырехфазные последовательности над Z_4 , последовательности Трахтенберга, последовательности Хеллесефа, последовательности Матсуфиджи-Имамура, последовательности Сидельникова, последовательности Кумар-Морено, а также последовательности, предложенные в авторских работах [20–22].

В отличие от решенной задачи построения полного множества идеальных многофазных последовательностей с рациональными фазами задача построения многофазных дельта-коррелированных последовательностей с иррациональными фазами остается по-прежнему нерешенной.

В цикле авторских работ [15–17, 23, 24] предложен общий подход к решению задачи построения ФМП с одноуровневой ПАКФ. Отдельные решения поставленной задачи представлены в работах [10–13, 20–24], где фазовые алфавиты состоят как из рациональных, так и из иррациональных фаз. Отметим, что в работах [25, 26] предложен общий подход к построению ФМП с идеальной ПАКФ. В работе [27] разработан общий подход к синтезу фазоманипулированных последовательностей длин $N = p$, основанный на Гауссовых циклотомических классах, задача решена в явном виде для разбиения вида $p - 1 = 2f$ и разбиения вида $p - 1 = 3f$ (в последнем случае f – обязательно четное число).

Если сконструировать идеальную фазоманипулированную последовательность, то на ее основе с помощью специальных преобразований эквивалентности можно построить множество новых последовательностей, эквивалентных ей. Известны следующие преобразования эквивалентности [18]: циклические сдвиги, поворот, децимации, комплексное сопряжение и преобразование Фурье. Применяя перечисленные преобразования к исходной дельта-коррелированной последовательности, получим эквивалентную ей дельта-коррелированную последовательность такой же длины N .

Кроме того, известны такие преобразования исходных дельта-коррелированных последовательностей, в результате которых могут быть сконструированы последовательности новых длин. Например, преобразование – прямое произведение [18]. Если последовательность $\mathbf{a} = \{a_n\}_{0, N_1}$ и последовательность $\mathbf{b} = \{b_n\}_{0, N_2}$ дельта-коррелированы, то последовательность $\mathbf{\Gamma} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} = \{\gamma_n\}_{0, N-1}$ будет также дельта-коррелированной при условии, что длины N_1 и N_2 исходных последовательностей будут взаимно простыми, $N = N_1 \cdot N_2$ – длина новой дельта-коррелированной последовательности. В работах [25, 26] представлен ряд других преобразований, приводящих к последовательностям новых длин:

- из исходной произвольной ФМП длины $N_1 = p^m$, $p > 2$ – простое число, можно сконструировать дельта-коррелированную ФМП длины $N = p^{2m}$;
- из исходной произвольной ФМП длины $N_1 = p^m$, $p > 2$ – простое число и семейства из p^m любых дельта-коррелированных последовательностей длин $N_2 = p$ можно сконструировать дельта-коррелированную ФМП длины $N = p^{2m+1}$;
- из исходной дельта-коррелированной последовательности длины $N_1 = p^{m_1-m_2}$ и исходной произвольной ФМП длины $N_2 = p^{m_2}$, где p – простое число, $m_1 \geq m_2 \geq 0$, можно сконструировать дельта-коррелированную ФМП длины $N = p^{m_1+m_2}$;

- из исходной дельта-коррелированной последовательности длины $N_1 = p$ можно сконструировать одну дельта-коррелированную ФМП длины $N = p^{2m+1}$.

В результате обзора методов построения многофазных последовательностей можно сделать следующий вывод: известны идеальные многофазные последовательности для любых длин N . Корреляционные свойства рассмотренных многофазных последовательностей при представлении фаз с точностью до тысячных долей градуса не изменяются. Далее рассмотрим вопросы практической реализации многофазных последовательностей на базе ПЛИС класса FPGA. Достижимая точность задания фазы $3 \cdot 10^{-30}$ рад.

2. Генератор фазоманипулированных последовательностей на базе ПЛИС. Интегральные схемы FPGA в настоящее время являются наиболее многообещающими при построении систем цифрового синтеза и real-time анализа радиотехнических сигналов. Если в начале 2000-х годов реально достижимая тактовая частота подобных схем была не более нескольких десятков мегагерц, то сегодня она превосходит гигагерцовые значения. Это делает возможным прямой цифровой синтез (Direct Digital Synthesis – DDS) сигналов с несущей до нескольких сотен мегагерц с возможностью управления амплитудой и фазой получаемых колебаний.

Смысл прямого цифрового синтеза частот состоит в следующем. Тактовая частота поступает на аккумулятор фазы – двоичный счетчик, инкремент inc которого рассчитывается по соотношению:

$$inc = \frac{2^N f_{out}}{f_{clk}}, \quad (2)$$

где f_{out} – желаемая выходная частота, f_{clk} – частота тактового сигнала, N – количество двоичных разрядов таблицы, содержащей значения одного периода гармонической функции. Аккумулятор фазы, изменяя свою величину на inc , перебирает адрес в таблице, и каждый период тактового сигнала на выход DDS поступает соответствующее табличное значение. При желании осуществить сдвиг фазы на θ достаточно к величине фазового аккумулятора добавить число

$$\xi = \frac{2^N \theta}{2\pi}. \quad (3)$$

Понимая, что минимальное значение, на которое можно осуществить сдвиг фазового аккумулятора, равно 1, получаем разрешение по фазовому сдвигу $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{2^N}. \quad (4)$$

Таким образом, при типичной длине таблицы косинусов в 2^{30} можно получить разрешение по фазе до $3 \cdot 10^{-30}$ рад, что перекрывает любую точность фазового сдвига, необходимую для решения практических задач.

Еще одним важным преимуществом FPGA можно назвать гибкость к изменениям дизайна, поскольку внутрисхемное содержание, хранящееся на отдельной мелкосхеме Flash-памяти, загружается каждый раз при подаче питания и может быть модифицировано сколько угодно раз без изменения аппаратной части устройства.

Таким образом, для построения генератора фазоманипулированного сигнала достаточно сконструировать на FPGA устройство синтеза цифрового прообраза, которое имеет отдельную схему управления на входе для задания частот и последовательностей фазокодированных сигналов и цифроаналоговый преобразователь на выходе с соответ-

ствующим согласующим устройством, осуществляющим низкочастотную фильтрацию и буферизирование на выходную нагрузку.

Конструирование функциональных узлов на FPGA может осуществляться как в режиме редактирования принципиальных схем, которые строятся из отдельных стандартных и пользовательских компонентов, доступных в соответствующей палитре редактора, так и на уровне языкового описания функциональных логических узлов при помощи унифицированного языка VHDL (Very high speed integrated circuits) Hardware Description Language). Для наиболее типичных узлов, таких как DDS, различные преобразования и интерфейсы, возможно использование специфических компиляторов – ядер интеллектуальной собственности (IP Cores), поставляемых как изготовителем ПЛИС, так и многими другими компаниями-разработчиками.

Из компаний, присутствующих на рынке FPGA, наиболее признанными являются Altera, Lattice и Xilinx. Продукт семейства Spartan 3E последнего из перечисленных изготовителей был выбран нами в качестве базовой платформы для построения ГФС благодаря удачному сочетанию быстродействия, удобного корпуса (TQFP144) для макетирования и стоимости. Интегральная схема XC3S250E – TQG144 содержит в себе 250 тысяч системных защелок (system gates), что эквивалентно 5508 базовым логическим ячейкам, которые можно использовать в разработке. Так как язык описания схемных решений является унифицированным, разработанный дизайн в дальнейшем возможно использовать и на других более современных ПЛИС.

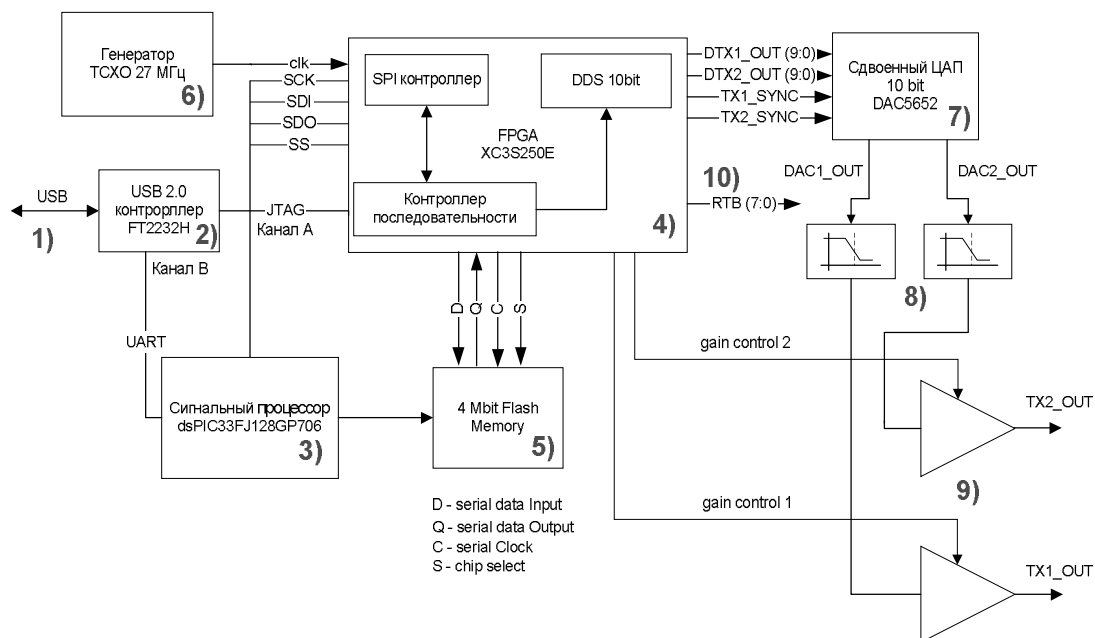
Как наиболее удобное, и, скорее всего, оптимальное решение для построения ГФС можно рассматривать использование готового ядра DDS (DDS Compiler 5.0) программы навигатора проектов Xilinx ISE 10.1 совместно со схемой контроля, которая должна получать информацию от управляющего компьютера о параметрах сигнала. Компилятор DDS позволяет генерировать схемный компонент – табличный синтезатор гармонического колебания с максимальной частотой для используемой интегральной схемы до 300 МГц, разрешением по частоте до сотых долей герц и по фазе до тысячных долей градуса. При этом, имея двоичный 10-разрядный выходной сигнал, данное решение обеспечивает хороший диапазон, свободный от гармоник (Spurious Free Dynamic Range – SFDR), не менее 60 дБ.

Структурно-функциональная схема разработанного генератора фазоманипулированных последовательностей представлена на рис. (с. 74). В устройство входят 1 – шина USB, 2 – мелкосхема двухканального контроллера USB FT2232H [28], канал «А» которого используется в качестве on-line конфигурирования FPGA, в основном во время отладки, а канал «В» настроен на работу в режиме последовательного асинхронного порта UART, по которому осуществляется связь с 3 – системой полуавтономного управления ГФС, выполненной на сигнальном процессоре dsPIC33FJ128GP706 фирмы Microchip [29]. Этот контроллер, помимо передачи данных для генератора фазоманипулированных последовательностей через последовательный порт SPI со скоростью 10 Мбит в секунду, используется для записи программы 4 – FPGA в 5 – SPI flash-конфигурационную память M25P40 емкостью 4 Мбит.

Центральная часть устройства, выполненная в программируемой логической электронной схеме, содержит преобразователь протокола SPI (SPI-контроллер) для обмена данными со схемой управления, контроллер последовательности, который хранит информацию о длительности, фазе, частоте и амплитуде отдельных кодовых интервалов.

Непосредственно фазовый модулятор реализован в виде функционального блока FPGA DDS 10 bit, сгенерированного программой Logicore DDS Compiler 5.0. Он содер-

жит параллельную шину управления частотой и фазой, которая используется в реальном времени контроллером последовательности. Тактирование DDS выполняется от 6 – термокомпенсированного внешнего кварцевого генератора через систему ФАПЧ (PLL), реализованную внутри ПЛИС, позволяющую повысить тактовую частоту до 265 МГц. Два канала цифрового выхода синтезатора частоты выведены параллельной шиной на двоянный 7 – цифроаналоговый преобразователь DAC5652 фирмы Texas Instruments [30]. Аналоговый сигнал через 8 – дифференциальные трансформаторы и фильтры низкой частоты, подавляющие нежелательные комбинационные частоты и гармоники, поступает на 9 – буферные усилители с регулируемым коэффициентом усиления: регулировка производится на интегральной схеме аналогового перемножителя AD835, а усиление и согласование – на 50-омную нагрузку на операционном усилителе с токовой обратной связью AD8009, что обеспечивает достаточно ровную частотную характеристику вплоть до частоты Найквиста.



Структурно-функциональная схема ГФС

В схеме ГФС также предусмотрено 8 дополнительных цифровых дифференциальных (LVDS) входов-выходов RTB(7:0) шины реального времени – 10. Эти сигналы могут быть использованы для синхронизации и обмена данными с другими внешними устройствами.

Заключение. В работе выполнен обзор результатов построения фазоманипулированных последовательностей с хорошими и идеальными корреляционными свойствами. Идеальные многофазные фазоманипулированные последовательности существуют для любой длины N . Для их практической реализации разработан генератор фазоманипулированных сигналов, выполненный на базе программируемой логической интегральной схемы класса FPGA: Spartan 3E производства концерна Xilinx. Теоретическая точность задания фазы на каждом кодовом интервале может достигать значений $3 \cdot 10^{-30}$ рад. Для практической реализации и сохранения корреляционных свойств синтезирую-

мых фазоманипулированных сигналов достаточно обеспечить точность задания фазы до тысячных долей градуса.

Список литературы

1. Ипатов, В. П. Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов: принципы и приложения / В. П. Ипатов; перевод с англ. – М.: Техносфера, 2007. – 488 с.
2. Гайворонский, Д. В. К выбору сигнатурных ансамблей / Д. В. Гайворонский, В. П. Ипатов // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2009. – Вып. 6. – С. 44 – 55.
3. www.xilinx.com (Дата обращения: 04.11.2010).
4. Golomb, S. W. Signal design for good correlation for wireless communication, cryptography, and radar / S. W. Golomb, G. Gong. – New York: Cambridge University Press, 2005. – 438 p.
5. Kerdock, A. M. Longest binary pulse compression codes with given peak sidelobe levels / A. M. Kerdock, R. Mayer, D. Bass // Proceedings of the IEEE. – 1986. – Vol. 74. – No. 2. – 366 p.
6. Нечаев, А. А. Код Кердока в циклической форме / А. А. Нечаев // Дискретная математика. – 1989. – Т. 1. – Вып. 4. – С. 123 – 139.
7. Холл, М. Комбинаторика / М. Холл; Пер. с англ. Под ред. А. О. Гельфонда и В. Е. Тараканова. – М.: Мир, 1973. – 424 с.
8. Амиантов, И. Н. Избранные вопросы статистической теории связи / И. Н. Амиантов. – М.: Сов. радио, 1971. – 416 с.
9. Golomb, S. W. Two-valued sequences with perfect periodic autocorrelation / S. W. Golomb // IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems. – March 1992. – Vol. 28. – No. 2. – Pp. 383 – 386.
10. Леухин, А. Н. Полное решение задачи синтеза дискретных фазокодированных сигналов с одноуровневой циклической автокорреляционной функцией / А. Н. Леухин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2008. – Т. 13. – № 2–3. – С. 48 – 55.
11. Леухин, А. Н. Синтез шумоподобных фазокодированных последовательностей / А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев // Ученые записки Казанского государственного университета. Серия: Физико-математические науки. – 2008. – Т. 150. – Кн. 2. – С. 38 – 50.
12. Леухин, А. Н. Решение системы нелинейных уравнений для задачи синтеза шумоподобных фазокодированных последовательностей / А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев, Л. Г. Корнилова // Нелинейный мир. – 2009. – Т. 7. – № 10. – С. 749 – 756.
13. Леухин, А. Н. Общий подход к построению фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией / А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2009. – Вып. 6. – С. 5 – 12.
14. Kirimoto, T. Orthogonal periodic sequences derived from m-sequences on GF(q) / T. Kirimoto, Y. Oh-Hashi // IEEE Trans. on Inform. Theory. – March 1994. – Vol. 40. – No. 2. – Pp. 526 – 532.
15. Gabidulin, E. M. New perfect sequences of length $2p$ / E. M. Gabidulin // Proc. of the Sixth International Workshop on Algebraic and Combinatorial Coding Theory. – Pskov, Russia, 1998. – Pp. 119 – 122.
16. Gabidulin, E. M. Perfect sequences of length $3p$ / E. M. Gabidulin, V. V. Shorin // Proc. 2003rd IEEE Int. Symp. Inform. Theory. – Yokohama, Japan, June 30 – July 04 2003.
17. Gabidulin, E. M. Perfect sequences of length $p_1 p_2$ / E. M. Gabidulin, V. V. Shorin // Proc. Seventh International Symposium on Communication Theory and Applications. Ambleside, Lake District, UK, July 13–18 2003.
18. Fan, P. Sequence Design for Communications Applications / P. Fan, M. Darnell. – New York: Wiley & Sons, 1996. – 493 p.
19. Mow, W. H. A unified construction of perfect polyphase sequences / W. H. Mow // Proc. of the 1995 IEEE Int. Symp. on Inform. Theory. – Whistler, B.C. Canada, Sept. 1996.
20. Леухин, А. Н. Новые фазокодированные последовательности с хорошими корреляционными характеристиками / А. Н. Леухин, А. Ю. Тюкаев, С. А. Бахтин, Л. Г. Корнилова // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12. – № 6. – С. 51 – 54.
21. Леухин, А. Н. Симплексные фазокодированные последовательности / А. Н. Леухин, Д. А. Назаров // Известия вузов России. Радиоэлектроника. – 2010. – Вып. 1. – С. 3 – 11.
22. Леухин, А. Н. Бесконечные множества фазокодированных последовательностей с одноуровневой периодической автокорреляционной функцией / А. Н. Леухин, Н. В. Парсаев // Радиотехника. – 2009. – №12. – С. 6 – 11.
23. Leukhin, A. N. Algebraic solution of the synthesis problem for coded sequences / A. N. Leukhin // Quantum Electronics. – 2005. – Vol. 35. – No. 8. – Pp. 688 – 692.
24. Леухин, А. Н. Синтез и анализ сложных фазокодированных последовательностей / А. Н. Леухин, А. Ю. Тюкаев, С. А. Бахтин // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2007. – Т. 12. – № 4. – С. 32 – 37.

25. *Gabidulin, E. M.* Family of PSK Sequences with the perfect periodic autocorrelation function / E. M. Gabidulin // Proc. 5th Soviet-Swedish workshop on information theory. – Moscow, January 1992. – Pp. 69 – 72.
26. *Gabidulin, E. M.* Further results on PSK-sequences with the perfect periodic autocorrelation function / E. M. Gabidulin, B. Honary, M. Darnell, P. Farell // Communication theory and applications. – 1993. – №6 – Pp. 171 – 176.
27. *Gabidulin, E. M.* New families of unimodular perfect sequences of prime length based pn Gaussian periods / E. M. Gabidulin // Proc. 2002'IEEE Int. Symp. Inform. Theory. – Lausanne, Switzerland, June 30 – July 05 2002.
28. www.ftdichip.com (Дата обращения: 04.11.2010).
29. www.microchip.com (Дата обращения: 04.11.2010).
30. www.ti.com (Дата обращения: 04.11.2010).

Работа выполнена при финансовой поддержке по темам НИР в рамках гранта Президента РФ МД-5418.2010.9, ГК №П783, ГК №02.740.11.0838 и гранта РФФИ 09-07-000723-а.

Статья поступила в редакцию 05.11.10.

I. A. Kalashnikov, L. Y. Grunin, A. N. Leukhin

GENERATOR OF PHASE-MANIPULATED SIGNALS

Phase-manipulated sequences with good and ideal properties of periodic autocorrelation function were reviewed. The circuit of the generator of multiphase phase-modulated sequences based on the programmable logic integrated circuit Spartan -3E FPGA has also been developed.

Key words: *multiphase sequences with good correlation properties, delta-correlated phase-manipulated sequences, the accuracy of phase commencement, phase accumulator, programmable logic integrated circuit.*

КАЛАШНИКОВ Иван Анатольевич – аспирант МарГТУ. Область научных интересов – синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов, разработка аппаратного обеспечения физического эксперимента. Автор одной публикации.

E-mail: kalyvan@gmail.com

ГРУНИН Леонид Юрьевич – кандидат химических наук, доцент кафедры физики МарГТУ. Область научных интересов – физическая и коллоидная химия, молекулярная биофизика, ЯМР-спектроскопия, ЯМР-томография, разработка цифровых систем синтеза и анализа радиотехнических сигналов. Автор более 60 публикаций, соавтор трех монографий.

E-mail: mobilennmr@hotmail.com

ЛЕУХИН Анатолий Николаевич – доктор физико-математических наук, исполняющий обязанности заведующего кафедрой информационной безопасности МарГТУ. Область научных интересов – теория информации и кодирования, синтез, анализ и цифровая обработка сложных сигналов. Автор более 170 научных публикаций, в том числе соавтор двух монографий, изданных в издательстве «Физматлит».

E-mail: code@marstu.net

УДК 621.382:612.08

М. Т. Алиев, С. Л. Тихонов

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ЧЕЛОВЕКА

Предложена структурная схема устройства предъявления парных световых импульсов и программное обеспечение аппаратно-программного комплекса для оценки эффективной деятельности человека. Приведены результаты экспериментальных исследований по определению случайной погрешности операционной системы Windows XP и оценки эффективной деятельности человека.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, случайная погрешность, эффективная деятельность, экспериментальные исследования, функциональное состояние, межимпульсный интервал, программное обеспечение.

Введение. Проблема оценки эффективной деятельности человека сохраняет и сейчас свою актуальность, несмотря на то, что технический прогресс все более освобождает человека от тяжелого физического труда. Эффективная деятельность и ее уровни зависят от внешних и внутренних факторов. Внешние факторы определяют специфику нагрузки, а именно: интенсивность, длительность и сложность. К внутренним факторам относятся: уровень квалификации, психофизиологические особенности и функциональное состояние человека. Психофизиологические особенности и функциональное состояние человека являются базовыми для оценки эффективной деятельности. Впервые проанализировав изменения в функционировании анализаторных систем, обеспечивающих эффективную деятельность, Э. Крепелин (1898) выделил следующие основные стадии: I – вработывание; II – оптимальная эффективная деятельность; III – утомление; IV – конечный порыв [1]. Данный комплекс методов позволяет получать информацию о наличии и выраженности зрительного и мышечного утомления [2, 3]. В то же время выводы исследователей в целом ряде случаев достаточно противоречивы, что свидетельствует о недостаточной информативности используемых методов. Также серьезной проблемой является решение задач инструментального обеспечения для оценки эффективной деятельности человека под влиянием длительного воздействия нагрузки.

При разработке программного обеспечения используют наиболее распространенное семейство операционных систем Windows NT, которое представляет собой систему с вытесняющей многозадачностью на основе уровней приоритетов. Данные операционные системы являются системами общего назначения и не поддерживают спецификацию систем реального времени.

Целью работы является разработка аппаратно-программного комплекса, который минимизирует случайную погрешность измерений для приложений пользовательского уровня.

Провести экспериментальные исследования эффективной деятельности человека и определить временные связи при повышении инертности в динамике нервных процес-

сов, используя метод последовательного приближения с дискретным изменением длительности межимпульсного интервала парных световых импульсов.

Аппаратно-программный комплекс для оценки эффективной деятельности человека. Аппаратно-программный комплекс выполнен на базе ПЭВМ, в состав которого входят устройство предъявления парных световых импульсов и программное обеспечение, написанное на языке Delphi 7.0. академической версии, работает под управлением операционной системы Windows XP.

В разработанном аппаратно-программном комплексе реализован метод последовательного приближения с дискретным изменением длительности межимпульсного интервала парных световых импульсов, который заключается в следующем [4–6]. Испытуемому предъявляют последовательность парных световых импульсов длительностью $t_{\text{имп}}$, разделенных межимпульсным интервалом $t_{\text{мин}}$, повторяющихся через постоянный временной интервал T , как показано на рис. 1.

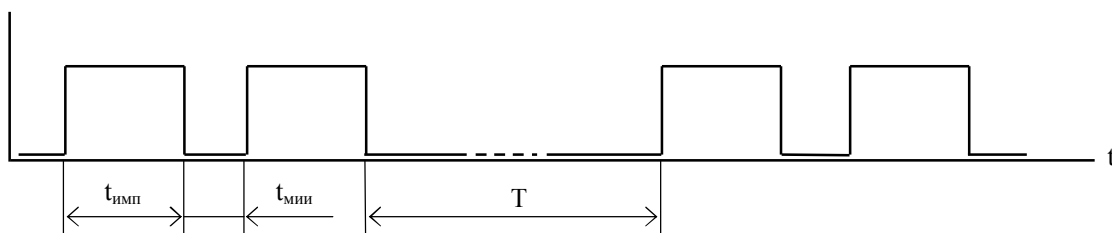


Рис. 1. Временная диаграмма предъявляемых световых импульсов

Временной интервал повторения парных импульсов (T) принят равным 1 с для устранения эффекта маскировки, которая отсутствует или слабо выражена при времени повторения, равном 500 мс [7].

Временная диаграмма изменения длительности межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре при оценке эффективной деятельности человека представлена на рис. 2.

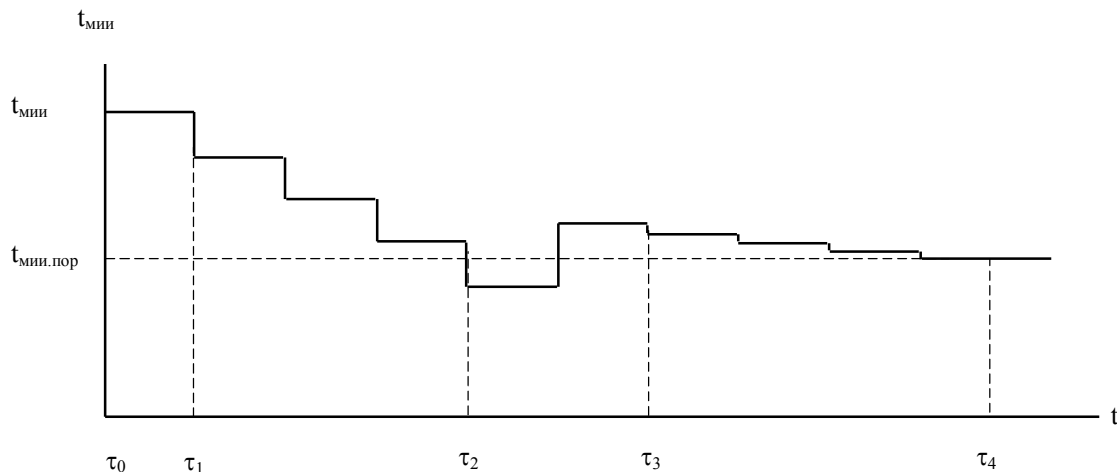


Рис. 2. Временная диаграмма изменения длительности межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре

Испытуемому предъявляют последовательность парных световых импульсов, длительностью ($t_{\text{имп}}$) 200 мс каждый, разделенных начальным межимпульсным интервалом длительностью ($t_{\text{мин}}$), равным 50 мс (рис. 5, интервал времени τ_0 – τ_1). При первом измерении в серии межимпульсный интервал между световыми импульсами в паре уменьшается дискретно (рис. 5, интервал времени τ_1 – τ_2) с шагом 0,5 мс до момента субъек-

тивного слияния двух световых импульсов в паре в один. Затем межимпульсный интервал увеличивается на случайную величину (рис. 5, интервал времени $\tau_2-\tau_3$) в диапазоне от 0,7 до 1 мс, после которого уменьшается дискретно (рис 5, интервал времени $\tau_3-\tau_4$) с шагом 0,1 мс до момента субъективного слияния двух световых импульсов в паре в один. Значение длительности межимпульсного интервала ($t_{\text{мин.пор}}$) в этот момент времени принимается для оценки эффективной деятельности человека. При второй и последующей оценке в серии предыдущее зафиксированное значение межимпульсного интервала увеличивается на случайную величину в диапазоне от 3 до 4 мс, далее процедура оценки выполняется аналогично первому измерению.

Устройство предъявления парных световых импульсов. Для реализации аппаратно-программного комплекса оценки эффективной деятельности человека разработано устройство предъявления парных световых импульсов, структурная схема которого представлена на рис.3.

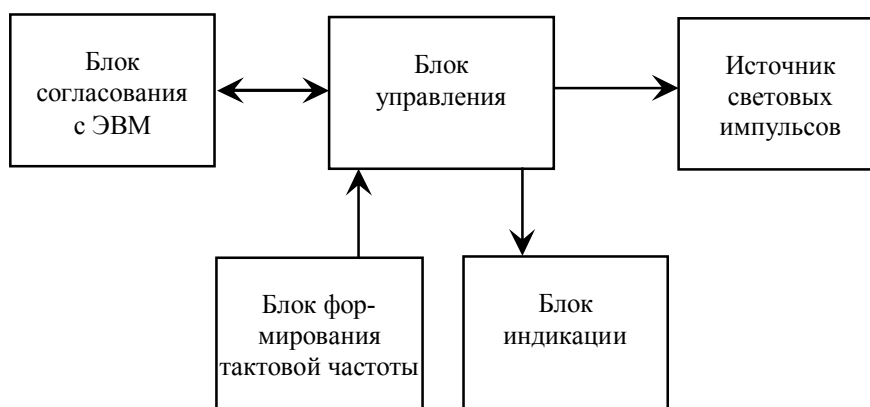


Рис. 3. Структурная схема устройства предъявления парных световых импульсов

Блок формирования тактовой частоты обеспечивает синхронизацию всего устройства. Блок индикации отображает длительность парных световых импульсов, длительность межимпульсного интервала. Источником световых импульсов служит светодиод желтого цвета диаметром 5 мм с силой света 2 кд, размещаемый в ближней точке ясного видения.

Устройство работает следующим образом. При подключении устройства к ЭВМ блок управления принимает текущие значения длительности парных световых импульсов и межимпульсного интервала с отображением в блоке индикации, формирует световые импульсы с заданными параметрами в источнике световых импульсов. В результате испытуемому предъявляется последовательность парных световых импульсов, разделенных межимпульсным интервалом, повторяющихся через определенный временной интервал. Далее испытуемый нажимает кнопки в блоке управления, изменяет длительность межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре, как показано на рис. 2. При определении момента субъективного ощущения слияния двух световых импульсов происходит фиксация и обработка измеренного значения на ЭВМ с учетом случайной погрешности измерения.

Программное обеспечение комплекса. К операционным системам семейства Windows NT уделяется повышенное внимание, так как они способны работать на многочисленных аппаратных платформах с разной архитектурой, обеспечивая повышенную работоспособность и надежность.

Компоненты операционной системы Windows NT спроектированы на основе принципов построения объектно-ориентированных систем и для передачи параметров, доступа или модификации структур данных используют формальный интерфейс [8].

Наиболее простой и эффективной при обработке приложений пользовательского уровня является схема циклического ожидания, которая позволяет наиболее своевременно реагировать на события, связанные со временем.

Однако данная схема не учитывает архитектурные особенности операционных систем, вызывает длинные временные задержки и на высоком уровне приоритета (рис. 4) способна привести к остановке функционирования графического интерфейса.

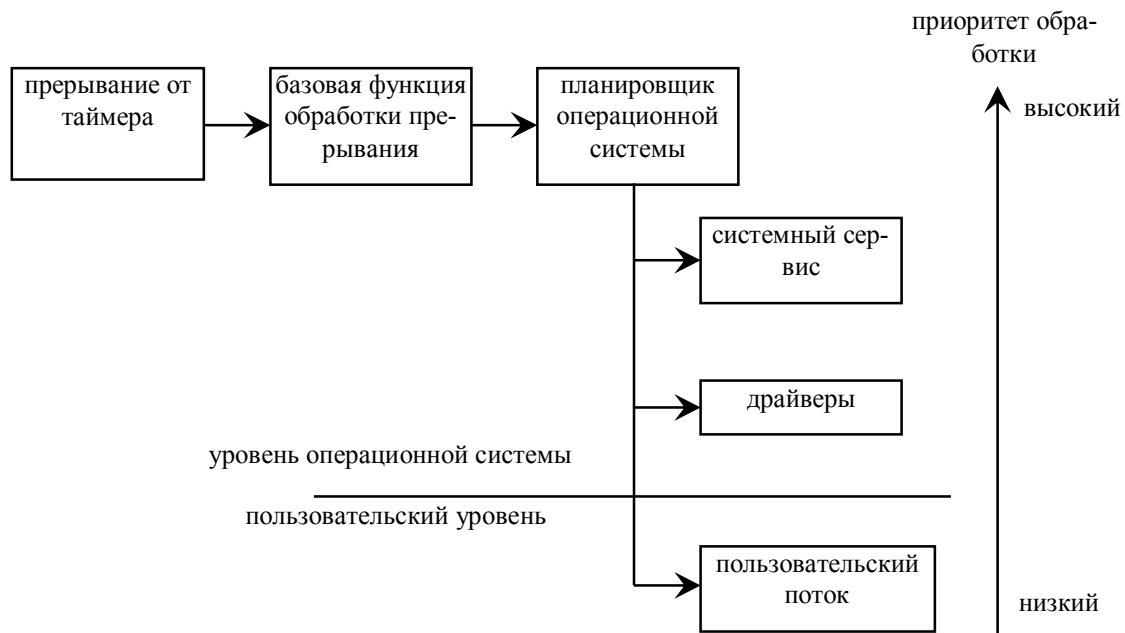


Рис. 4. Схема обработки событий для приложений пользовательского уровня

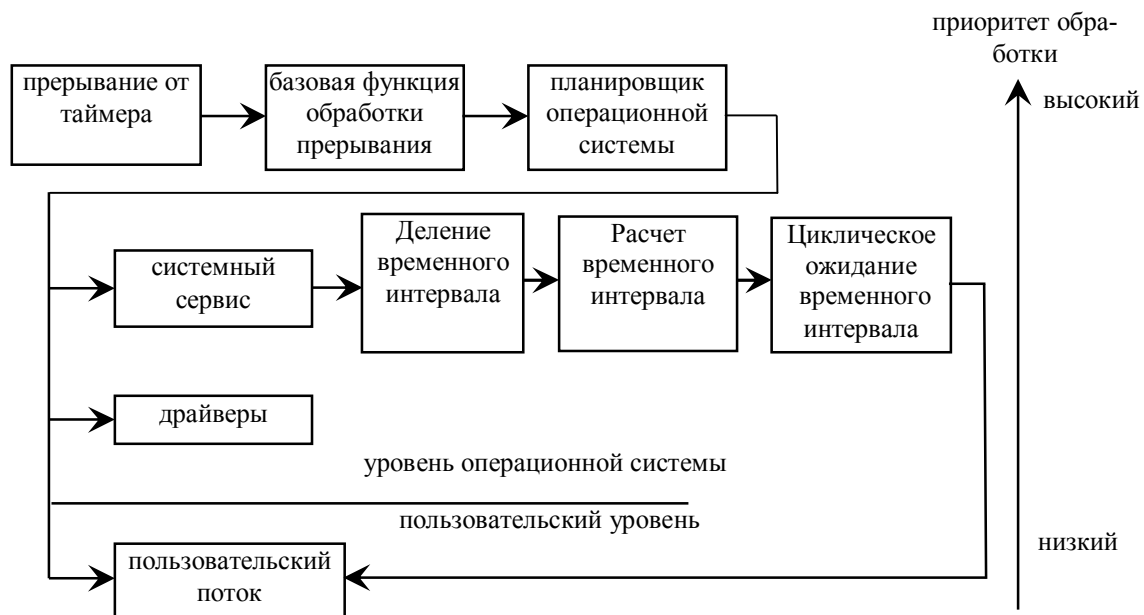


Рис. 5. Схема минимизации случайной погрешности измерения

Предлагается следующая схема минимизации случайной погрешности, которая учитывает специфику планирования задач семейств операционных систем Windows NT (рис. 5).

Основным достоинством данной схемы является то, что поток при повышенном уровне приоритета позволяет отдать процессорное время другим потокам, на момент его «бездействия», что исключает эффект «зависания».

Графический интерфейс программного обеспечения представлен на рис. 6. В разработанном аппаратно-программном комплексе реализованы два режима: режим настройки алгоритма генерации импульсов, предназначенный для достижения минимальной случайной погрешности измерения, связанной с архитектурными особенностями операционной системы по предложенной схеме, и пользовательский режим, который обеспечивает индивидуальную установку импульсов.

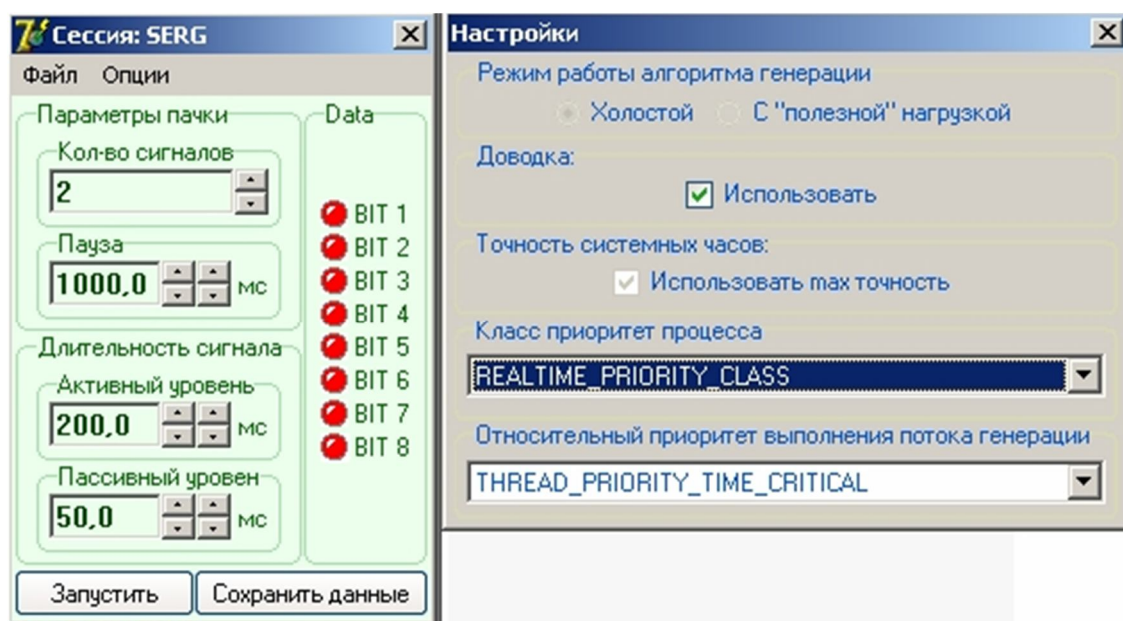


Рис. 6. Графический интерфейс программного обеспечения аппаратно-программного комплекса

Режим настройки алгоритма генерации импульсов обеспечивает следующие функции: автоматический выбор портов ввода/вывода; считывание и изменение состояния регистров портов ввода/вывода; управление активностью сигнала на соответствующих линиях; выбор режима работы алгоритма генерации сигнала; выбор точности системных часов; выбор класса приоритета процесса и приоритета выполнения потока генерации.

Пользовательский режим позволяет установить количество световых импульсов в пачке; временной интервал повторения импульсов; длительность световых импульсов в пачке; начальную установку и изменение межимпульсного интервала; формирование базы данных.

Экспериментальные исследования. На первом этапе проводилась оценка случайной ошибки измерения с использованием разработанного аппаратно-программного комплекса.

В таблице приведены значения экспериментальных данных по оценке случайной погрешности операционной системы Windows XP с использованием предложенной схемы измерения, которая учитывает архитектурные особенности в зависимости от типа процессора и выполнения других операций.

Экспериментальные данные по оценке случайной погрешности операционной системы Windows XP

Тип процессора	Выполнение процессором других операций, %	Средняя случайная погрешность, мс	Средняя случайная погрешность с предложенной схемой, мс
Pentium 4	1–4	0,83	0,004
Pentium 4	56–70	0,91	0,006
Core2 Duo	1–4	0,68	0,016
Core2 Duo	56–70	0,86	0,029

Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенная схема позволяет минимизировать случайную погрешность операционной системы, в зависимости от типа процессора и выполнения процессором других операций, в среднем на 0,8 мс.

На втором этапе проводилась оценка степени зрительного утомления по динамике значения межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре.

Экспериментальные исследования зрительного утомления выполнялись в соответствии с требованиями СанПиН 2.2.2.542–96, ГОСТ Р 50949–2001, ГОСТ Р 50923–96, СНиП 23-05-95, указаний и рекомендаций гигиены труда [9–14].

Типичные графики динамики изменения межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре для испытуемых из числа обследованных, полученные по результатам тестирования, представлены на рис. 7, где серым цветом отмечено время перерывов. По горизонтальной оси – время, час. мин; по вертикальной оси: слева – время ощущения, мс; справа – процент ошибок, М.

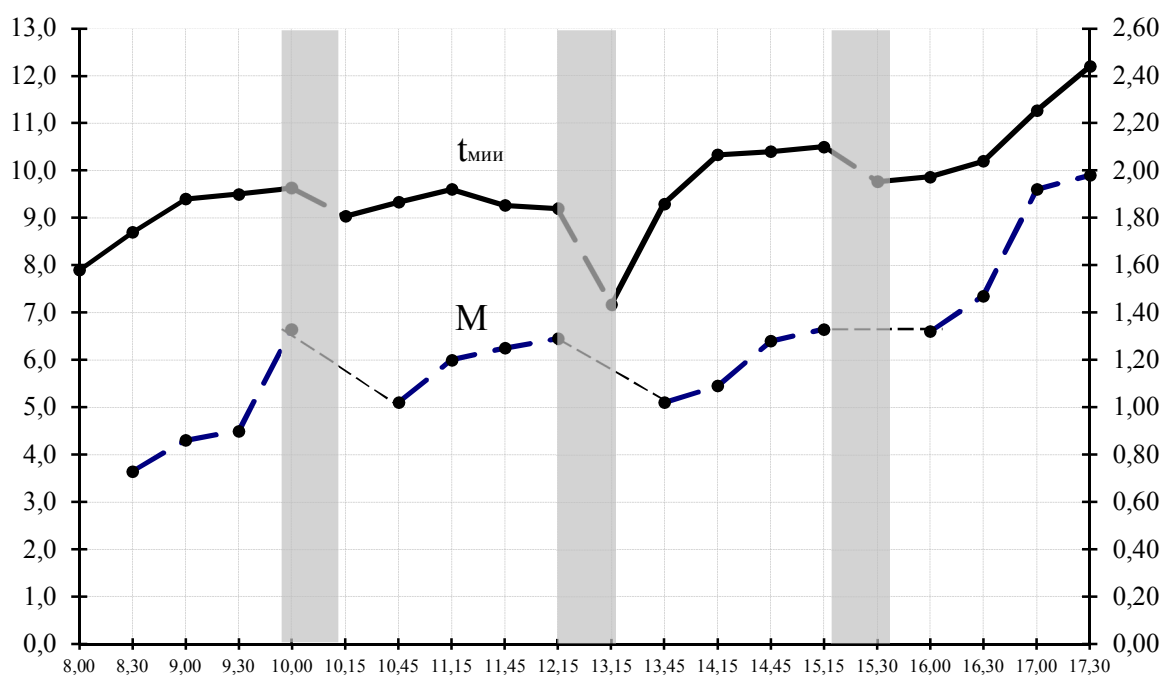


Рис. 7. Типичный график динамики значения межимпульсного интервала и процентного содержания ошибок (М) в набранном тексте

Исследование утомления выполнялось при восьмичасовой рабочей смене, регламентированные перерывы продолжительностью 15 минут каждый предоставлялись через каждые два часа после начала рабочей смены и через каждые два часа после обе-

денного перерыва. Обеденный перерыв предоставлялся через четыре часа после начала рабочей смены. Во время работы все операторы вводили один и тот же текст при максимальной индивидуальной скорости ввода.

Оценка межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре проводилась в начале рабочего дня, после перерывов и через каждые 30 мин работы.

В экспериментальных исследованиях приняли участие 10 испытуемых. Испытуемый при каждой оценке длительности межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре выполнял серию из 4–6 измерений до получения трех последних результатов оценки с вариабельностью не более 0,3–0,5 мс. Последние три результата оценки оставались, предыдущие отбрасывались.

После рабочей смены определялось процентное содержание ошибок в набранном тексте, являющееся диагностическим параметром зрительного утомления по числу ошибок, допущенных при вводе, и числу знаков введенной информации [15].

Результаты анализа показали высокую значимость связи длительности межимпульсного интервала и процентного содержания ошибок в набранном тексте, порядка 0,6 ... 0,9, что подтверждает возможность использования длительности межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре как информативного параметра оценки утомления под длительным воздействием нагрузки, что влечет к снижению производительности труда, скорости и качества работы.

На третьем этапе исследований проводились экспериментальные исследования толерантности к физической нагрузке, осуществляемые с использованием велоэргометра ВЭ-05 «Ритм» ТУ 200 УССР 45-86, при работе сидя.

Величина нагрузки постоянной мощности для не занимающихся физической культурой и спортом соответствовала 75 % должного максимального потребления кислорода, определяемого по номограммам Б. П. Преvarского. Скорость педалирования устанавливалась равной 40–60 об/мин.

Оценка длительности межимпульсного интервала выполнялась в начале тестирования и далее через каждые 2 мин. Во время тестирования осуществлялся постоянный контроль сердечной деятельности при помощи монитора сердечного ритма фирмы «Polar», артериального давления, общего состояния и внешнего вида испытуемого, изменения которых служили основанием для определения времени наступления состояния утомления, перехода от состояния утомления к состоянию переутомления и прекращения тестирования.

Оценка эффективной деятельности человека (ЭД) с учетом длительности межимпульсного интервала рассчитывалась по следующей формуле (1):

$$\text{ЭД} = \frac{I \cdot V}{\Delta t}, \quad (1)$$

где I – нагрузка; V – скорость педалирования, Δt – рассчитывается по формуле (2):

$$\Delta t = \frac{t_n}{t_{\text{мин}}}, \quad (2)$$

где t_n – длительность межимпульсного интервала в начале тестирования, $t_{\text{мин}}$ – длительность межимпульсного интервала в процессе измерения.

Типичные графики динамики изменения эффективной деятельности человека и частоты сердечных сокращений для нетренированных испытуемых, из числа обследованных, представлены на рис. 8.

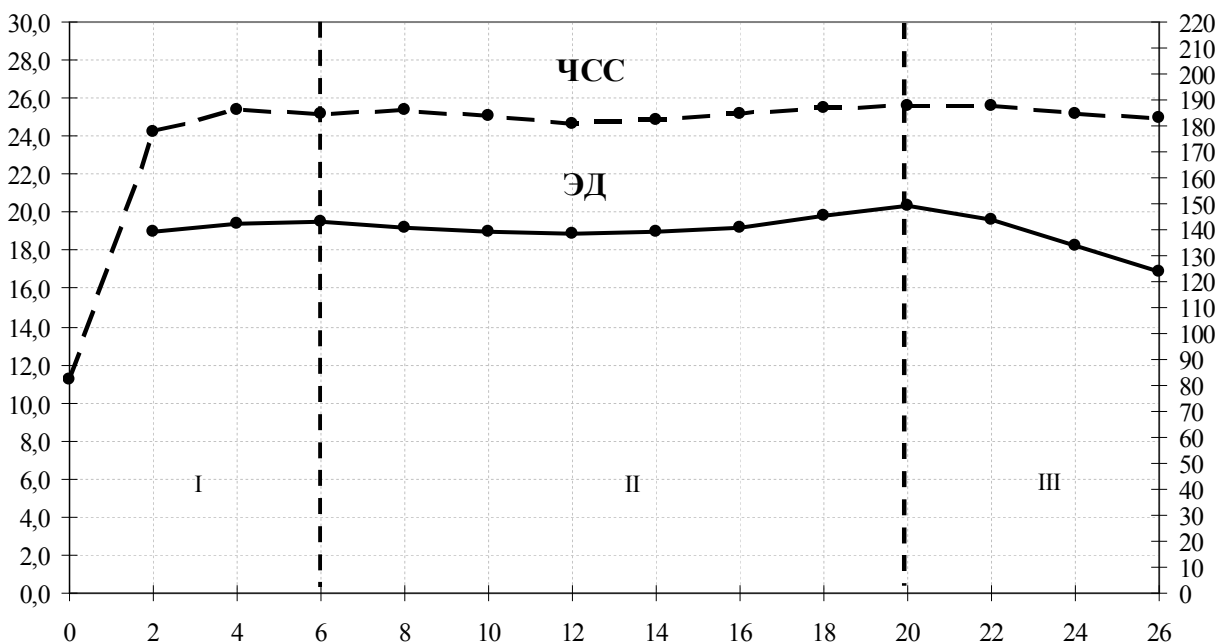


Рис. 8. Типичный график динамики изменения эффективной деятельности человека и частоты сердечных сокращений нетренированного испытуемого

По горизонтальной оси – время измерения, мин; по вертикальной оси: слева – эффективная деятельность человека (ЭД); справа – частота сердечных сокращений (ЧСС), уд/мин.

В экспериментальных исследованиях приняли участие 10 нетренированных испытуемых. Испытуемый при каждой оценке времени зрительного ощущения в ходе эксперимента выполнял одно измерение.

Анализ графиков, отображающих индивидуальный характер адаптации человека к мышечной нагрузке, позволяет выделить следующие периоды работоспособности:

- период вработываемости (этап I) составляет от 4 до 6 мин;
- период оптимальной эффективной деятельности (этап II) от 4 до 20 мин;
- период утомления (этап III) на физиологическом уровне, когда происходит затруднение выработки временных связей, повышение инертности в динамике нервных процессов и следует заканчивать тестирование в процессе физической или психофизиологической нагрузки.

Частота сердечных сокращений является показателем функционального состояния организма человека, но экспериментально выявлено, что данный показатель не показывает явную границу наступления утомления, что особенно важно в момент перехода в состояние острого утомления. Динамика изменения значения оценки межимпульсного интервала позволяет выявить этапы наступления утомления и момент перехода в состояние острого утомления.

Вывод. Результаты экспериментальных исследований показали, что предложенная схема позволяет минимизировать случайную погрешность операционной системы на 0,8 мс, что является важным параметром при дискретном изменении длительности межимпульсного интервала с шагом 0,5 и 0,1 мс в разработанном аппаратно-программном комплексе на базе ПЭВМ.

Установлено, что длительность межимпульсного интервала между световыми импульсами в паре можно использовать как информативный параметр оценки утомления

под длительным воздействием нагрузки. Анализ графиков динамики значения межпульсного интервала и процентного содержания ошибок в набранном тексте позволяет делать вывод о способности человека-оператора к обнаружению и восприятию полезного сигнала в условиях монотонной физической деятельности, оценить индивидуальные резервные возможности анализаторных систем к восприятию зрительной информации и выделить степень утомления на поведенческом уровне.

Анализ графиков динамики изменения эффективной деятельности человека и частоты сердечных сокращений нетренированного испытуемого позволяет выделить степень утомления на физиологическом уровне, когда происходит затруднение выработки временных связей и повышение инертности в динамике нервных процессов, также оценить характер адаптации человека к мышечной нагрузке, своевременно внести коррективы объема и интенсивности нагрузки.

Список литературы

1. Большой психологический словарь / Сост. и общ. ред. Б. Г. Мещеряков, В. П. Зинченко. – СПб.: прайм-ЕВРОЗНАК, 2005. – 672 с.
2. Роженцов, В. В. Критическая частота световых мельканий: применение, способы и устройства измерения: Монография / В. В. Роженцов. – Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. – 156 с.
3. Кисляков, Ю. Ю. Компьютерная методика диагностики и профилактики зрительного утомления у операторов персональных компьютеров / Ю. Ю. Кисляков, И. Г. Овечкин, С. Н. Пасечный и др. // Медицина труда и промышленная экология. – 2002. – № 6. – С. 39 – 42.
4. Блайвас, А. С. Описание зрительного анализа в сложных рецептивных полях зрительной коры на основе интегральных представлений группы вращений / А. С. Блайвас // Методические вопросы и техническое обеспечение физиологического эксперимента. – М.: Наука, 1976. – С. 5 – 10.
5. Роженцов, В. В. Время ощущения зрительного анализатора человека / В. В. Роженцов, М. Т. Алиев // Вестник Казанского государственного технического университета им. А. Н. Туполева. – 2005. – № 3 (39). – С. 20 – 23.
6. Патент 2231293 РФ, МПК⁷ А 61 В 5/16. Способ определения времени возбуждения зрительного анализатора человека / В. В. Роженцов, М. Т. Алиев (РФ). – Оpubл. 27.06.2004, Бюл. № 18.
7. Тароян, Н. А. Межполушарные функциональные отношения в процессе решения человеком зрительно-пространственной задачи / Н. А. Тароян, В. В. Мямлин, О. А. Генкина // Физиология человека. – 1992. – Т. 18, № 2. – С. 5 – 14.
8. Соломон, Д. Внутреннее устройство Microsoft Windows: Windows Server 2003, Windows XP и Windows 2000 / Д. Соломон, М. Руссинович; Пер. с англ. – 4-е изд. – М.: Издательско-торговый дом «Русская Редакция»; СПб.: Питер; 2005. – 992 с.
9. Ситдикова, И. Д. Рабочий стресс (оценка и прогнозирование астенического состояния): Метод. пособие / И. Д. Ситдикова. – Казань: КГМУ, 2001. – 14 с.
10. Руководство Р.2.2.013-99. Гигиена труда. Гигиенические критерии оценки условий труда по показателям вредности и опасности факторов производственной среды, тяжести и напряженности трудового процесса. – М.: Информационно-издательский центр Госкомсанэпиднадзора России, 1999. – 44 с.
11. СНиП 23-05-95. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы и правила Российской Федерации. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 35 с.
12. ГОСТ Р 50949-2001. Средства отображения информации индивидуального пользования. Методы измерения и оценки эргономических параметров и параметров безопасности. – М.: Изд-во стандартов, 2001. – 33 с.
13. СанПиН 2.2.2.542-96. Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 43 с.
14. ГОСТ Р 50923-96. Дисплеи. Рабочее место оператора. Общие эргономические требования и требования к производственной среде. Методы измерения. – М.: Изд-во стандартов, 1996. – 12 с.
15. Леонова, А. Б. Функциональное состояние человека в условиях трудовой деятельности / А. Б. Леонова, В. И. Медведев. – М.: Изд-во МГУ, 1981. – 111 с.

Статья поступила в редакцию 13.09.10.

M. T. Aliev, S. L. Tikhonov

**HARDWARE-SOFTWARE COMPLEX FOR ESTIMATION
OF EFFECTIVE ACTIVITY OF PERSON**

The skeleton diagram of the device of the presentation of conjugated light pulses and the software of a hardware-software complex for the estimation of the effective activity of a person is offered. The results of experimental researches on determination of the random error of the operating system Windows XP and the estimation of the effective activity of a person are presented.

Key words: *hardware-software complex, random error, effective activity, experimental researches, functional state, inter-impulse interval, software.*

АЛИЕВ Марат Туфикович – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных средств МарГТУ. Область научных интересов – разработка микропроцессорных систем, моделирование и исследование функционального состояния человека. Автор 49 публикаций.

E-mail: amt_home@rambler.ru

ТИХОНОВ Сергей Львович – студент радиотехнического факультета МарГТУ. Область научных интересов – исследование работы операционных систем, программирование.

E-mail: kppevs@marstu.net

УДК 612.84.001.8.088

В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина

СПОСОБ СОКРАЩЕНИЯ ВРЕМЕНИ ИЗМЕРЕНИЯ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗРЕНИЯ ПО ЧАСТОТЕ СВЕТОВЫХ МЕЛЬКАНИЙ

Предложен способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий с использованием десяти пар излучателей, позволяющий сократить время измерений. Приведены результаты экспериментальных исследований.

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

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

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

Ранее отмечались области применения и недостатки метода КЧСМ, одним из которых является его низкая точность, обусловленная отсутствием четкого перехода от видимости световых мельканий к их слиянию. Отсутствие такого перехода объясняется неразличением зрительной системой близких частот световых мельканий. Предложен способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий путем нахождения порога различения двух ближайших частот как минимальной разности между «верхней» и «нижней» частотами световых мельканий, которая вызывает у испытуемого ощущение их различения [4].

Однако определение разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий по предложенному способу занимает длительное время, что ограничивает его использование при массовых обследованиях.

Цель работы – разработка способа определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий, позволяющего сократить время измерений.

Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий. Для сокращения времени измерений предложено предъявлять испытуемому световые мелькания с заданной начальной частотой одновременно с использованием

десяти пар светодиодов, каждой из которых соответствует одна из десяти кнопок SA1 ... SA10 (рис. 1) [5].

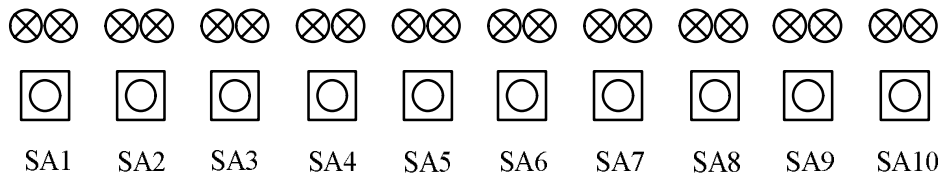


Рис. 1. Расположение пар светодиодов и соответствующих кнопок

На первом этапе измерений на первый светодиод первой пары подают световые мелькания с частотой, увеличенной по сравнению с начальной частотой на 0,25 Гц, на каждый первый светодиод последующей пары подают световые мелькания с частотой, увеличенной по сравнению с частотой первого светодиода предыдущей пары на 0,25 Гц. На второй светодиод первой пары подают световые мелькания с частотой, уменьшенной по сравнению с начальной частотой на 0,25 Гц, на каждый второй светодиод последующей пары подают световые мелькания с частотой, уменьшенной по сравнению с частотой второго светодиода предыдущей пары на 0,25 Гц. Испытуемый определяет пару светодиодов с наименьшим номером, частоты световых мельканий которой различаются, и нажимает соответствующую ей кнопку.

На втором этапе измерений на первый светодиод первой пары подают световые мелькания с частотой, меньшей на 0,25 Гц частоты первого светодиода пары, определенной на первом этапе испытуемым как пара, частоты световых мельканий которой различаются, на каждый первый светодиод последующей пары подают световые мелькания с частотой, увеличенной по сравнению с частотой первого светодиода предыдущей пары на 0,05 Гц. На второй светодиод первой пары подают световые мелькания с частотой, большей на 0,25 Гц частоты второго светодиода пары, определенной на первом этапе испытуемым как пара, частоты световых мельканий которой различаются, на каждый второй светодиод последующей пары подают световые мелькания с частотой, уменьшенной по сравнению с частотой второго светодиода предыдущей пары на 0,05 Гц. Испытуемый определяет пару светодиодов с наименьшим номером, частоты световых мельканий которой различаются, и нажимает соответствующую ей кнопку, фиксируя значение частот световых мельканий светодиодов этой пары.

Значение разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий вычисляют как разность между зафиксированными на втором этапе частотами первого и второго светодиодов.

Результаты исследований и их обсуждение. В обследовании приняло участие десять предварительно обученных испытуемых в возрасте от 18 до 24 лет с нормальным или скорректированным зрением, которые выполнили, в соответствии с рекомендациями [6], две серии по 10 измерений разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий на начальной частоте 10 Гц.

В первой серии измерений для пяти испытуемых частоты световых мельканий предъявлялись одновременно на десяти парах светодиодов. Во второй серии измерений начальная частота световых мельканий предъявлялась вначале одновременно на двух светодиодах. Затем частота световых мельканий первого светодиода не менялась, а частота световых мельканий второго светодиода изменялась непрерывно, со скоростью порядка 0,5 Гц/с, увеличиваясь и уменьшаясь, пока испытуемый методом последовательного приближения не определял порог различения частот световых мельканий, излучаемых светодиодами [7]. Для других пяти испытуемых порядок выполнения серий измерений был обратным.

Измерения выполнялись бинокулярно в помещении, оборудованном в соответствии с требованиями СНиП 23–05–95 [8], в первой половине дня с 9 до 12 часов с перерывами от 25 до 30 минут на отдых между сериями измерений. Излучателями служили светодиоды желтого цвета диаметром 5 мм с силой света 3 мкд. Формирование предъявляемых частот световых мельканий, их изменение и определение разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий выполнялось с использованием ПЭВМ Pentium III.

При предъявлении частот световых мельканий одновременно на десяти парах светодиодов на первом этапе измерений компьютер выдал на пары светодиодов импульсы с частотами, приведенными в табл. 1.

Т а б л и ц а 1

№ пары	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота мельканий первого светодиода, Гц	10,25	10,50	10,75	11,00	11,25	11,50	11,75	12,00	12,25	12,50
Частота мельканий второго светодиода, Гц	9,75	9,50	9,25	9,00	8,75	8,50	8,25	8,00	7,75	7,50

Один из испытуемых на первом этапе определил пару светодиодов с наименьшим номером (№ 4), частоты световых мельканий которой различаются, и нажал соответствующую ей кнопку SA4, на что потратил 4 с.

На втором этапе измерений компьютер выдал для этого испытуемого на пары светодиодов импульсы с частотами, приведенными в табл. 2.

Т а б л и ц а 2

№ пары	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Частота мельканий первого светодиода, Гц	10,75	10,80	10,85	10,90	10,95	11,00	11,05	11,10	11,15	11,20
Частота мельканий второго светодиода, Гц	9,25	9,20	9,15	9,10	9,05	9,00	8,95	8,90	8,85	8,80

Испытуемый определил пару с наименьшим номером (№ 3), частоты световых мельканий которой различаются, и нажал соответствующую ей кнопку SA3, на что потратил 7 с. В результате испытуемый определил значение разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий, равное 1,7 Гц, потратив на это 11 с.

При определении разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий с использованием двух светодиодов испытуемый потратил 23 с, то есть в 2,1 раза больше по сравнению со временем измерения по предлагаемому способу.

По результатам измерений вычислялись среднеарифметическое значение и среднеквадратическое отклонение значений разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий в каждой серии измерений. Анализ результатов вычислений показал, что при начальной частоте, равной 10 Гц, для здорового человека разрешающая спо-

способность зрения по частоте световых мельканий находится в пределах от 0,9 до 2,4 Гц, различие между индивидуальными значениями среднеарифметических значений и среднеквадратических отклонений, полученных испытуемыми в двух сериях измерений, статистически недостоверно.

Уменьшение времени измерений при определении разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий с использованием десяти пар светодиодов по сравнению с использованием двух светодиодов зафиксировано для каждого испытуемого и составило по группе испытуемых для одного измерения от 1,9 до 2,5 раза.

При предъявлении световых мельканий как с использованием двух светодиодов, так и десяти пар светодиодов, зрительная система человека сравнивает предъявляемые частоты световых мельканий. Однако при использовании двух светодиодов порог различения частот световых мельканий определяется путем изменения разности предъявляемых частот, что занимает определенное время.

При предъявлении световых мельканий с использованием десяти пар светодиодов разность между предъявляемыми частотами в каждой паре разная и увеличивается от первой пары до последней. Испытуемый при определении порога различения частот световых мельканий среди десяти пар находит пару светодиодов с наименьшим номером, частоты световых мельканий которой различаются, на что затрачивает меньше времени.

Выводы. Предложен способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий, позволяющий сократить время измерений. По результатам экспериментальных исследований уменьшение времени одного измерения с использованием десяти пар светодиодов по сравнению с использованием двух светодиодов составило от 1,9 до 2,5 раза.

Список литературы

1. Кравков, С. В. Глаз и его работа. Психофизиология зрения, гигиена освещения / С. В. Кравков. – М. – Л.: Изд-во АН СССР, 1950. – 531 с.
2. Семеновская, Е. Н. Электрофизиологические исследования в офтальмологии / Е. Н. Семеновская. – М.: Медгиз, 1963. – 279 с.
3. Вартанян, И. А. Физиология сенсорных систем: руководство / И. А. Вартанян. – СПб.: Изд-во «Лань», 1999. – 224 с.
4. Роженцов, В. В. Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий / В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина // Вестник МарГТУ. Серия: Радиотехнические и инфокоммуникационные системы. – 2009. – № 3. – С. 23–27.
5. Патент 2343822 РФ, МПК А61В 3/02. Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий / В. В. Роженцов. – Оpubл. 20.01.2009, Бюл. № 2.
6. Шайтор, Э. П. Описание стандартной методики измерения критической частоты слияния мельканий / Э. П. Шайтор, А. И. Шабанов, В. М. Ухин // Физиология человека. – 1975. – Т. 1. – № 3. – С. 570–572.
7. Патент 2357647 РФ, МПК А61В 3/00, А61В 5/16, А61F 9/00. Способ определения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий / В. В. Роженцов. – Оpubл. 10.06.2009, Бюл. № 16.
8. СНиП 23–05–95. Естественное и искусственное освещение. Строительные нормы и правила Российской Федерации. – М.: Изд-во стандартов, 1995. – 30 с.

Статья поступила в редакцию 12.03.10.

V. V. Rozhentsov, T. A. Lezhnina

**THE METHOD OF REDUCTION IN TIME OF MEASUREMENT
OF EYESIGHT RESOLUTION BY LIGHT FLICKER FREQUENCY**

The method of determining of the eyesight resolution by light flicker frequency using ten pairs of light sources, allowing reducing the time of measurements is suggested. The results of experimental investigations are presented.

Key words: *visual system, light flicker frequency, resolution, measurement time.*

РОЖЕНЦОВ Валерий Витальевич – доктор технических наук, профессор кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных средств МарГТУ. Область научных интересов – методы и средства исследования функционального состояния человека, адаптации к внешним воздействиям. Автор 271 публикации.

E-mail: RozhentsovVV@marstu.net

ЛЕЖНИНА Татьяна Александровна – кандидат технических наук, доцент кафедры проектирования и производства электронно-вычислительных средств МарГТУ. Область научных интересов – методы и программно-технические средства исследования временных параметров зрительной системы человека. Автор 76 публикаций.

E-mail: LezhninaTA@marstu.net

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

УДК 378.662(470.343):001.38

ФЕСТИВАЛЬ НАУКИ ВПЕРВЫЕ В РЕСПУБЛИКЕ МАРИЙ ЭЛ

С 8 по 10 октября 2010 года впервые в Республике Марий Эл Марийский государственный технический университет проводил Всероссийский фестиваль науки. В России фестиваль проводился под эгидой Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова уже в пятый раз.

Пятый фестиваль науки проходил одновременно в более чем ста крупнейших университетских и научных центрах России, ближнего и дальнего зарубежья. Его участниками стали такие крупнейшие вузы, как Институт Джона Адамса совместно с Европейским центром ядерных исследований, Королевское Общество Великобритании, Кембриджский и Мичиганский университеты, институты РАН и многие другие российские вузы.

Организатором фестиваля в Республике Марий Эл выступил МарГТУ, и это не случайно. Крупнейший технический вуз Поволжья, объединивший многоуровневый образовательный процесс и эффективную научно-исследовательскую деятельность, представляет собой наукоград, разносторонняя деятельность которого соответствует международным стандартам качества. Университет входит в сотню лучших организаций России в области науки и образования.

МарГТУ делает ставку на интеграцию образовательных технологий и вузовской науки, тесно связанной с производством, ежегодно увеличивая объемы научных исследований. Основной акцент делается на поиск новых подходов в решении проблемы рационального природопользования за счет развития био-, нано-, инфокоммуникационных, энергосберегающих технологий и электронных систем.

Преподаватели, студенты, аспиранты и молодые ученые МарГТУ активно участвуют в федеральных научно-технических программах, конференциях и конкурсах, выигрывают престижные российские и международные гранты. По программе «У.М.Н.И.К.» (участник молодежного научно-инновационного конкурса) университет входит в десятку лучших вузов России. А в нынешнем году шесть выпускников этой программы создали при МарГТУ малые инновационные предприятия и теперь успешно внедряют свои разработки, выполняя призыв правительства РФ о переходе страны от сырьевой экономики к экономике знаний.

Цель проводимого на базе технического университета фестиваля – дать возможность всем желающим прикоснуться к удивительному миру научных достижений, получить новые знания. И, конечно, привлечь к исследовательскому поиску талантливую молодежь.

МарГТУ принимал участие и в работе Фестиваля науки в Москве. С научно-популярными лекциями в аудиториях МГУ выступили два молодых профессора, доктора наук Дмитрий Иванов и Анатолий Леухин. А в столичном Экспоцентре была представлена экспозиция Марийского государственного технического университета.



*Торгово-промышленная палата РМЭ.
Ректор Е. М. Романов с проректором по научной работе
и инновационной деятельности В. А. Ивановым*



*Торгово-промышленная палата РМЭ.
Экспозиция радиотехнического факультета*



*Встреча ученых МарГТУ со школьниками.
Выставка роботов школьной организации «Инфосфера»*

В Йошкар-Оле Фестиваль науки стартовал 8 октября 2010 года на территории Торгово-промышленной палаты Республики Марий Эл. Здесь работала выставка инновационных разработок МарГТУ и продукции промышленных предприятий республики. Там же проходил конкурс молодежных инновационных проектов с участием инвесторов с целью воплощения лучших разработок в реальном производстве. А студенты старших курсов имели возможность присмотреть себе будущее место работы, для них была организована ярмарка вакансий.



Торгово-промышленная палата РМЭ. Ярмарка вакансий

9 октября фестивальные мероприятия проходили в главном корпусе МарГТУ, была также представлена техника, созданная в студенческом конструкторском бюро МарГТУ. В актовом зале состоялась официальная церемония открытия фестиваля с праздничным концертом. Более 150 различных фестивальных мероприятий были проведены и на факультетах университета. Посетителям фестиваля были представлены содержательные лекции ведущих ученых, выставки научно-технических и инновационных достижений, демонстрация новейшей техники, тематические экскурсии, увлекательные эксперименты и еще много интересного.



Торгово-промышленная палата РМЭ. Экспонаты СКБ-1



*Торгово-промышленная палата РМЭ.
Экспозиция «Робота сделать можно» школы-лицея № 28*

10 октября в университете был проведен День открытых дверей для школьников республики. Ребята получили ответы на все интересующие их вопросы, для них были организованы экскурсии по факультетам и лабораториям, поездки в ботанический сад и в новое современное общежитие МарГТУ.

Начиная с 2011 года, Фестиваль приобретает статус Всероссийского, а Марийский государственный технический университет вошел в состав оргкомитета. В феврале 2011 года будет проходить официальная церемония открытия Фестиваля. В октябре 2011 года планируется проведение основных мероприятий Фестиваля одновременно во всех вузах-участниках. А до этого времени в течение года планируется проведение серии обучающих семинаров и встреч, посвященных подготовке к Всероссийскому фестивалю науки.

П. А. Нехорошков

Статья поступила в редакцию 26.10.10.

P. A. Nekhoroshkov

FOR THE FIRST TIME IN MARSTU

On 8th –10th October, 2010 Mari State Technical University arranged All-Russian Science Festival in the Republic of Mari El for the first time. The Festival was held under the aegis of Lomonosov Moscow State University for the fifth time already.

НЕХОРОШКОВ Петр Аркадьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры автомобильных дорог, начальник отдела научно-технических программ и грантов УНИД МарГТУ. Область научных интересов – рациональное лесопользование, планирование и оптимизация лесотранспортных сетей, геоинформационные системы. Автор 37 публикаций.

E-mail: ntpg@marstu.net

УДК 378.001.76

ВСЕРОССИЙСКАЯ МЕЖДИСЦИПЛИНАРНАЯ ИНТЕРНЕТ-ОЛИМПИАДА С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ «ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В СЛОЖНЫХ СИСТЕМАХ»

В октябре 2010 года в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы по направлению 2 «Обеспечение привлечения молодежи в сферу науки, образования и высоких технологий, а также закрепления ее в этой сфере за счет развитой инфраструктуры» прошла вторая Всероссийская олимпиада студентов вузов по междисциплинарному направлению инновационного характера «Информационные технологии в сложных системах», которая стала настоящим праздником науки не только для студентов вузов всех федеральных округов России, но и ряда стран СНГ.

Олимпиада явилась логическим продолжением Всероссийской междисциплинарной олимпиады «Инфокоммуникационные технологии в сложных технических системах», проведенной в Йошкар-Оле в 2009 году. Однако в 2010 году она включила в себя новые направления, связанные с информационными технологиями в сложных социально-экономических и экологических системах.

Основной целью олимпиад является диагностика компетенций студентов, выявление талантливых и способных к научным исследованиям студентов, развитие у студентов творческих способностей, формирование и развитие имиджа социально успешного и творчески активного молодого исследователя.

Перед междисциплинарной Интернет-олимпиадой «Информационные технологии в сложных системах» ставился ряд важных задач:

- привлечение молодых исследователей к научной деятельности для решения проблем, продиктованных территориально-производственными кластерами, в том числе с использованием информационных технологий в различных сферах деятельности современного человека;
- развитие у обучающихся творческих способностей и способностей использования информационных технологий в сложных системах (технических, социально-экономических, экосистемах и т.п.) и адаптации полученных знаний на другие предметные области для решения потребностей современного общества;
- повышение интереса к решению практико-ориентированных междисциплинарных задач сложных систем с использованием современных информационных технологий, обеспечение возможности более четкого определения области научных интересов молодежи;
- разработка предложений и рекомендаций по разработке методов оценивания уровня сформированности универсальных компетенций (связанных со способностью к анализу и обработке информации с использованием информационных и коммуникационных технологий) и профессиональных компетенций для осуществления видов деятельности в сложных системах;
- повышение уровней взаимодействия отдельных научных школ, профессиональных сообществ и образовательных учреждений высшего профессионального образования;

– развитие инновационных образовательных программ и технологий, направленных на решение практических задач в сложных системах.

Проведение всероссийских математических олимпиад для студентов вузов имеет богатую историю и, несомненно, является сильным достижением советской – российской педагогической школы. Но, учитывая огромные размеры нашей страны, принять участие на Всероссийском уровне могло лишь относительно небольшое количество студентов. Новые инфокоммуникационные технологии открывают перед высшей школой невиданные ранее возможности, в том числе и при проведении инновационных олимпиад.

Очевидно, что успех реализации столь амбициозных задач зависит от информационно-технического сопровождения открытых студенческих интернет-олимпиад, разработки и внедрения технологии проведения интернет-олимпиад.

Технология включает в себя следующие этапы: подготовительный, этап подготовки инструментария (олимпиадных заданий), этапы проведения первого и второго туров; этапы обработки результатов первого и второго туров и принятия решения. Выделим некоторые из них.

Подготовительный этап предполагает создание регламентирующего, организационного, технического, программного, методического и инструктивного обеспечения процедур регистрации вузов-участников и процедуры проведения первого и второго туров.

На первом этапе осуществления проекта был подготовлен веб-сайт «Интернет-олимпиады в сфере профессионального образования» (www.i-olymp.ru), который в сентябре 2009 года стал открытым для широкого доступа. С открытием сайта активизировалась «просветительская» деятельность, то есть ознакомление с возможностями, которые могут дать интернет-олимпиады. В итоге идеи открытых студенческих интернет-олимпиад заинтересовали не только вузы Российской Федерации, но и получили распространение в ближнем и дальнем зарубежье России. В работе Программного комитета и оргкомитета олимпиады приняли участие ведущие ученые и педагоги Российской Федерации и стран ближнего (Азербайджан, Беларусь, Казахстан) и дальнего зарубежья (Израиль, Вьетнам).

Этап подготовки инструментария включает в себя анализ ГОС ВПО с целью формирования тематической структуры банка олимпиадных заданий по дисциплинам для проведения первого тура олимпиады, а также формирования структуры олимпиадных заданий междисциплинарного характера. Для проведения первого тура и обработки результатов требуется разработка специализированного программного обеспечения, позволяющего не только проводить отбор участников второго тура, но и проводить статистический анализ результатов олимпиады на всех уровнях управления образовательными процессами – вузовском, региональном, федеральном.

С целью привлечения максимального количества талантливой молодежи и уменьшения финансовых издержек была предложена схема проведения Всероссийской междисциплинарной интернет-олимпиады в два тура.

Первый тур (вузовский) проводится в вузах в форме компьютерного тестирования в режиме on-line. Основная цель данного тура – оказание методической помощи вузам с целью максимального привлечения студентов. Вузы имеют возможность воспользоваться едиными для всей страны высококачественными заданиями и единой централизованной системой проверки.

При проведении первого отборочного тура интернет-олимпиады инновационного характера «Информационные технологии в сложных системах» был реализован поли-

дисциплинарный подход, позволивший не только номинировать студентов вузов для участия во втором туре, но и оценить качество фундаментальной подготовки лучших студентов. Полидисциплинарный подход представляет собой компьютерное тестирование, где в одном сеансе тестирования участники олимпиады выполняют задания по трем дисциплинам.

Выбор дисциплин для проведения первого тура олимпиады осуществляется на основе макроанализа ГОС ВПО по группам направлений подготовки с учетом специфики сложных систем: технических, социально-экономических, экологических. Таким образом, на основе макроанализа ГОС для проведения первого отборочного тура интернет-олимпиады были разработаны задания по дисциплинам:

- математике, информатике и физике (сложные технические системы);
- математике, информатике и эконометрике (сложные социально-экономические системы);
- математике, информатике и экологии (сложные экосистемы).

Использование информационных технологий, в том числе возможностей глобальной сети Интернет, при проведении первого тура позволило значительно снизить издержки на организацию и проведение тестирования и одновременно повысить оперативность информационного обмена с участниками тестирования, уменьшить влияние человеческого фактора.

В первом туре олимпиады приняли участие более двух с половиной тысяч студентов из 92 вузов. География участников включает все федеральные округа Российской Федерации, а также ряд стран СНГ (Азербайджанскую Республику, Республику Беларусь, Республику Казахстан, Кыргызскую Республику, Республику Таджикистан, Республику Узбекистан).

Во втором, заключительном туре Интернет-олимпиады было реализовано решение задач междисциплинарного характера: инфокоммуникационные технологии в радиотехнических, вычислительных и механических системах, информационные технологии в сложных социально-экономических и сложных экологических системах, что позволило провести анализ знаний студентов-участников второго тура в этих областях.

Второй тур в виде очного состязания был проведен в Йошкар-Оле, на базе Марийского государственного университета, в котором участвовал 71 студент из 29 вузов. В процессе выполнения практико-ориентированных олимпиадных заданий студенты, приехавшие в Йошкар-Олу, продемонстрировали высокий уровень подготовки, умение творчески мыслить и предлагать нестандартные оригинальные решения в области информационных технологий в сложных системах.

В упорной борьбе определились победители и призеры олимпиады. В число призеров вошли студенты Саровского физико-технического института – филиала Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»; Северо-Кавказского государственного технического университета; Тульского государственного университета; Филиала Уфимского государственного нефтяного технического университета в г. Стерлитамаке; Военной академии воздушно-космической обороны имени Маршала Советского Союза Г. К. Жукова (г. Тверь); Белорусско-Российского университета; Кыргызско-Российского Славянского университета.

В своих выступлениях на закрытии олимпиады студенты-участники отмечали высокий уровень ее организации, гостеприимство йошкар-олинцев и говорили о тех перспективах, которые открывает олимпиада ее победителям студентам-инноваторам в

выборе правильных ориентиров в развитии карьеры. Она, несомненно, способствует активизации работы студенческой молодежи в направлении построения в России и странах Содружества экономики, основанной на знаниях.

В. Г. Наводнов, И. В. Журавлева, Л. Н. Шарафутдинова

Статья поступила в редакцию 17.11.10.

V. G. Navodnov, I. V. Zhuravleva, L. N. Sharafutdinova

**INTERDISCIPLINARY INTERNET-CONTEST
«INFORMATION TECHNOLOGIES IN COMPLEX SYSTEMS»**

Within the Federal target program «Scientific and scientific-pedagogical personnel of innovative Russia» for 2009–2013 in direction 2 «Attracting youth to the sphere of science, education and high technology and keeping scientific and educational succession due to the developed infrastructure» the second All-Russian contest between the students of institutes of higher education in the interdisciplinary innovative direction «Information technologies in complex systems» was held in October, 2010 that became a true celebration of science not only for students from all federal districts of Russia but also a number of the CIS countries.

НАВОДНОВ Владимир Григорьевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной математики и информационных технологий МарГТУ. Область научных интересов – системы управления качеством образования, технологии тестирования, системы автоматизированного проектирования педагогических измерительных материалов. Автор 193 публикаций.

E-mail: vgn8108@mail.ru

ЖУРАВЛЕВА Ирина Викторовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной математики и информационных технологий МарГТУ. Область научных интересов – физико-математические науки, педагогика. Автор 11 публикаций.

E-mail: irina.zhurav@gmail.com

ШАРАФУТДИНОВА Люция Назиповна – доцент кафедры высшей математики МарГТУ. Область научных интересов – системы управления качеством образования, технологии тестирования, системы автоматизированного проектирования педагогических измерительных материалов, статистический анализ данных. Автор 49 публикаций.

E-mail: sh-ln@yandex.ru

УДК 378.662 (470.343)

ФАКУЛЬТЕТУ ИНФОРМАТИКИ И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ МАРИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА ДЕСЯТЬ ЛЕТ

Факультет информатики и вычислительной техники (ФИиВТ) в Марийском государственном техническом университете (МарГТУ) был создан в ноябре 2000 года для обеспечения быстро растущих потребностей страны в высококвалифицированных кадрах в области вычислительной техники и автоматизированных систем, кибернетики и информатики. Требования времени определили необходимость в представлении на рынке образовательных услуг конкурентоспособных специалистов, работающих с интегрированными информационными технологиями на базе использования современных средств вычислительной техники и сетевых решений. Будущие специалисты в этой области сегодня получают расширенную профессиональную подготовку и высокий уровень знаний по дисциплинам, отражающим специфику образовательных программ факультета в лучших традициях МарГТУ и с учетом многолетнего опыта организации учебного процесса на радиотехническом факультете, из которого ФИиВТ был выделен.

В состав факультета вошли следующие кафедры.

Кафедра информационно-вычислительных систем (ИВС). В год создания кафедры (а ей сегодня уже 35 лет) кафедру возглавил д-р техн. наук, профессор Е. К. Лебедев. Первое название кафедры – кафедра вычислительной техники. Уже в то время, 35 лет назад, работая на радиотехническом факультете, он мечтал о создании факультета информационных технологий в вузе. Деятельность кафедры строилась в направлении использования цифровой обработки сигналов, микропроцессоров. Сегодня руководит научной и образовательной деятельностью кафедры канд. техн. наук, доцент В. И. Мясников.

Основные направления научной деятельности кафедры ИВС: архитектура вычислительных систем, микропроцессоры в системах контроля, измерения, управления, встраиваемые системы, интеллектуальные системы, системы биометрии, сети ЭВМ и средства коммуникаций, информационно-образовательные среды, САПР.

Кафедра информатики и системного программирования (ИиСП). Первым заведующим был канд. техн. наук В. С. Трахтенберг. Специальность, по которой готовили студентов, – «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем». Впоследствии В. С. Трахтенберга сменил д-р техн. наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники РФ, профессор А. Н. Соболев. Под его руководством была открыта специальность «Комплексное обеспечение безопасности автоматизированных систем». Сегодня возглавляет кафедру канд. техн. наук, профессор М. Н. Морозов.

Основные направления научной деятельности кафедры: разработка мультимедиа- и гипермедиасистем в образовании, разработка методов и систем распределенной обработки информации, исследование и разработка интернет-приложений. В 1996 году под руководством М. Н. Морозова создана лаборатория мультимедиасистем в образовании, ведущая разработки по заказам Министерства образования и науки РФ.

В год десятилетия факультета ИиВТ создана **кафедра информационной безопасности (ИБ)**, которую возглавляет д-р физ.-мат. наук, профессор А. Н. Леухин. Он же руководит учебно-исследовательской лабораторией «Кодирования, обработки и защиты информации». Научное направление кафедры связано с теорией сигналов, криптографией, кодированием и защитой информации. При кафедре создано малое инновационное предприятие ООО «Сигналс Лаб», на котором работают как аспиранты кафедры, так и студенты старших курсов специальности «Комплексное обеспечение информационной безопасности автоматизированных систем». Пять студентов и аспирантов кафедры являются победителями конкурса «У.М.Н.И.К.»

Кафедра информатики. Спектр ее деятельности включает обеспечение и подготовку в области информатики студентов МарГТУ. Научно-исследовательская работа кафедры проводится в рамках научного направления «Проблемы построения и функционирования единой системы навигационно-временного обеспечения РФ», включающего в себя широкий спектр задач, связанных с развитием и поддержкой геоинформационных систем Республики Марий Эл; решением фундаментальных проблем построения систем искусственного интеллекта, анализа изображений и обработки сигналов. Руководит кафедрой канд. техн. наук, профессор А. В. Кривецкий.

Направления бакалавриата «Информатика и вычислительная техника» и «Программная инженерия», по которым ведут подготовку кафедры факультета, дает выпускникам возможность работать и проводить научные исследования во всех сферах профессиональной деятельности, связанной с использованием, развитием и совершенствованием программного и технического обеспечения вычислительных машин и комплексов, сетевыми и интернет-технологиями, средствами компьютерного дизайна, базами данных, системами информатизации и компьютеризации различного производственного и административного назначения. Реализуемые на факультете магистерские программы: «Микропроцессорные системы» и «Технология разработки программных систем». Выпускники факультета ведут исследовательские проекты не только в магистратуре ФИиВТ, но и обучаются по магистерским программам в Санкт-Петербургском государственном университете информационных технологий механики и оптики (СПбГУ ИТМО), занимаются исследованиями под руководством ученых Санкт-Петербургского филиала учреждения Российской академии наук института Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН (СПбФ ИЗМИРАН), защищают диссертации на соискание ученых степеней в ведущих вузах России.

При факультете информатики и вычислительной техники функционирует ГОУ «Лицей информационно-вычислительных технологий «Мегатех»», где углубленно изучаются информатика, математика, физика. В лицее работают высококвалифицированные преподаватели МарГТУ и МарГУ, используются современные компьютерные классы. Лицейисты наравне со студентами участвуют в олимпиадах и конференциях.

С целью выявления наиболее способных учащихся в области программирования, стимулирования творческого развития одаренных детей популяризация информационных технологий в практике работы образовательных учреждений факультет проводит региональную научно-техническую конференцию учащихся «Информационные проекты. Практика программирования» в рамках национального проекта «Образование» по РМЭ. Учредителями ее являются: Министерство образования и науки Республики Марий Эл; ГОУ ВПО «Марийский государственный технический университет»; ГОУ РМЭ «Лицей информационно-вычислительных технологий «Мегатех»; ГОУ ДОД Республики Марий Эл «Центр детского и юношеского технического творчества».

В ноябре 2010 года впервые факультет стал площадкой для проведения этапа Межрегиональной олимпиады по математике и криптографии для школьников 8–11 классов. А 2009 год стал заключительным годом двух мероприятий всероссийского уровня, которые проводили МарГТУ и факультет в течение пяти лет. Это Третий тур олимпиады по информатике и Третий тур конкурса дипломных проектов по специальности 230100 «Вычислительные машины, системы, комплексы и сети». В 2010 году Всероссийская конференция с международным участием «Информационные технологии в профессиональной деятельности и научной работе» получила новое развитие: появилась секция «У.М.Н.И.К.», на которую съехались представители региона со своими проектами по направлению «Информатика и вычислительная техника».

Коллектив ФИиВТ ведет большую научно-исследовательскую работу – разработку по заявкам предприятий и организаций г. Йошкар-Олы, Республики Марий Эл, г. Москвы и зарубежья: систем мультимедиа и гипермедиа; защищенных локально-вычислительных систем; обучающих программ и средств дистанционного обучения; автоматизированных информационных систем поддержки принятия решения; автоматизированных систем управления и геоинформационных систем; методов и средств распознавания образов и логического вывода в системах искусственного интеллекта; других специализированных программных средств. Учеными факультета выполняется большой объем госбюджетных научно-исследовательских работ.

На факультете функционируют учебно-исследовательские лаборатории мультимедиа, «Коллективных электронных ресурсов образовательного процесса» и «Кодирования, обработки и защиты информации». Преподаватели факультета работают с программами послевузовского профессионального образования, сотрудничая с Институтом дополнительного профессионального образования МарГТУ.

Студенты, магистранты и аспиранты факультета принимают активное участие в научно-технических конференциях, конкурсах и олимпиадах по отдельным дисциплинам и занимают призовые места. Лидеров в программировании и использовании информационных технологий определяют олимпиады и турниры, организованные как на факультете, так и на других площадках Российских вузов. Таких, как всероссийские олимпиады по информационным проектам, региональные соревнования студенческих команд российских вузов по программированию (г. Саратов), Всероссийской студенческой олимпиаде по проектированию распределенных информационных систем (г. Красноярск), в конкурсах выпускных квалификационных работ по направлению «Информатика и вычислительная техника» (г. Новосибирск), группе конкурсов в области информационных технологий – ИТ ПРОРЫВ.

Активное использование новых форм обучения начинает входить в повседневную практику факультета. Интенсивное развитие информационных и телекоммуникационных технологий помогает успешно внедрять их в непрерывный образовательный процесс.

Задачи факультета на будущее: работа в различных инновационных проектах, освоение новой супервычислительной техники, подготовка и проведение научных и научно-практических конференций, олимпиад, работа по усилению образовательной составляющей магистерских и аспирантских программ, обсуждение различных траекторий развития учебного процесса, расширение академической мобильности, улучшение материально-технической базы.

Работать, совершенствоваться, достигать все больших и больших успехов в науке – основные задачи факультета.

И. Г. Сидоркина

Статья поступила в редакцию 07.11.10.

I. G. Sidorkina

**TENTH ANNIVERSARY OF INFORMATION SCIENCE AND COMPUTER
ENGINEERING DEPARTMENT OF MARI STATE TECHNICAL UNIVERSITY**

Information Science and Computer Engineering Department (ISCED) was established at Mari State Technical University in November, 2000 for providing fast increasing needs of the country with highly skilled personnel in the sphere of computer engineering and computer-based systems, circuit technique, cybernetics and information science. The future specialists in the sphere of computers and computer networks receive advanced professional training and a high level of knowledge in disciplines, reflecting the specificity of educational programs of the department in the best traditions of MARSTU and taking into account long-term experience of organization of the educational process at the Radio Engineering Department, which ISCED was segregated from.

СИДОРКИНА Ирина Геннадьевна – доктор технических наук, декан факультета информатики и вычислительной техники МарГТУ. Область научных интересов – использование современных информационных технологий, системы автоматизации проектирования, системы искусственного интеллекта, информационная безопасность. Автор более 90 публикаций.

E-mail: SidorkinaIG@marstu.net

УКАЗАТЕЛЬ МАТЕРИАЛОВ, ОПУБЛИКОВАННЫХ В ЖУРНАЛЕ В 2010 ГОДУ

ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ И РАДИОТЕХНИКА

А. П. Аноутин. О численном моделировании задач дифракции на 2D-телах из метаматериала

В. А. Иванов, Д. В. Иванов, Н. В. Рябова. Зондирование ионосферы и декаметровых каналов связи сложными радиосигналами

**В. А. Иванов, Д. В. Иванов, М. И. Рябова, Н. А. Со-
рокин.** Искажение сложных декаметровых ра-
диосигналов в дисперсных ионосферных радио-
каналах при квазизенитном распространении

В. А. Иванов, Н. В. Рябова, М. И. Бастрасова. Оптимизация информационно-технических ха-
рактеристик систем декаметровой радиосвязи
для повышения их надежности

В. А. Иванов, Н. В. Рябова, В. В. Павлов. Ис-
следование направленности КВ-антенн для зон-
дирования ионосферы по всем азимутальным
направлениям в условиях размещения над ре-
альной поверхностью Земли

**О. Г. Морозов, О. А. Степущенко, И. Р. Са-
дыков.** Модуляционные методы измерений в
оптических биосенсорах рефрактометрического
типа на основе волоконных решеток Брэгга с
фазовым сдвигом

Т. С. Садеев, О. Г. Морозов. Спектральные ха-
рактеристики фотонных фильтров микроволно-
вых сигналов на основе амплитудных электро-
оптических модуляторов

**А. Ю. Чернышев, Е. В. Петухова, Ю. В. Су-
шенцова.** Инвариантность двоичных кодов с
общей проверкой четности к структуре поро-
ждающих матриц

А. Ю. Чернышев. Недвоичные линейные блоко-
вые коды с произвольными коэффициентами
порождающих матриц

ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАТИКА

А. А. Власов, П. П. Шурховецкий. Модель де-
централизованной структурированной пиринго-
вой сети

**А. Г. Коробейников, П. А. Кудрин, И. Г. Сидор-
кина.** Алгоритм распознавания трехмерных
изображений с высокой детализацией

**А. Г. Коробейников, Ю. А. Копытенко, В. С. Ис-
магилов.** Применение интеллектуальных систем
магнитных измерений

А. Н. Леухин, А. С. Шувалов, А. С. Петухов. Многочастотные импульсные последовательности с
одноуровневой автокорреляцией

LIST OF MATERIALS PUBLISHED IN MarSTU REPORTER IN 2010

TELECOMMUNICATION AND RADIO ENGINEERING

A. P. Anyutin. About numerical modeling of
diffraction problems on 2D-bodies from the
meta material

V. A. Ivanov, D. V. Ivanov, N. V. Ryabova.
Sounding of the ionosphere and decametric
communication channels by complex radio signals

**V. A. Ivanov, D. V. Ivanov, M. I. Ryabova,
N. A. Sorokin.** Sounding of the ionosphere and
decametric communication channels by com-
plex radio signals

V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, M. I. Bastrakova.
Optimization of informational and technical
characteristics of decameter radio communica-
tion systems for improvement in their reliability

V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, V. V. Pavlov.
Investigation of directivity of short – wave aeri-
als for the ionospheric sounding in all azimuthal
directions when they are allocated over the real
surface of the Earth

**O. G. Morozov, O. A. Stepushchenko, I. R. Sady-
kov.** Modulation methods of measurements in
optical biosensors of refractometric type on
basis of fiber bragg gratings with phase-shift

T. S. Sadeev, O. G. Morozov. Spectral charac-
teristics of photon filters of microwave signals
on basis of amplitude electro-optical modula-
tors

**A. Y. Chernyshev, E. V. Petuhova, Y. V. Su-
shentsova.** Invariance of binary codes with
general even parity check to the structure of
generator matrices

A. Y. Chernyshev. Nonbinary linear block
codes with arbitrary coefficients of generating
matrixes

COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION TECHNOLOGY

A. A. Vlasov, P. P. Shurhovetskiy. The model
of decentralized structured peer-to-peer net-
work

**A. G. Korobeinikov, R. A. Kudrin, I. G. Sidor-
kina.** Algorithm of recognition of three-
dimensional images with high detailing

**A. G. Korobeynikov, Y. A. Kopytenko, V. S. Isma-
gilov.** Application of intelligence systems of
magnetic measurements

A. N. Leukhin, A. S. Shuvalov, A. S. Petuhov.
Multiphase impulse sequences with one-level
autocorrelation

А. Н. Леухин, Э. А. Курбанов, Н. В. Парсаев, О. Н. Воробьев, А. В. Губаев, А. С. Шувалов, Х. Э. Рахманов, С. А. Лежнин, А. В. Харитонов, Е. Н. Потехин, С. А. Незамаев, Ю. А. Полевицкова. Оценка типов надземного покрова для распознавания объектов ландшафта на космических снимках

И. В. Петухов, Л. А. Стешина, М. Г. Глушкова. Информационное и математическое обеспечение исследования деятельности оператора человеко-машинных систем

А. А. Рожнецов, А. А. Баев, А. С. Наумов. Формирование проволочных моделей изображений пространственных объектов на основе решения задачи коммивояжера

А. А. Рожнецов, А. А. Баев, Р. В. Ерусланов. Решение задачи распараллеливания вычислений при обработке кватернионных сигналов

Я. А. Фурман, Е. А. Попов, Р. В. Ерусланов. Восстановление изображения 3D-объекта по его перспективным проекциям на плоскую горизонтальную поверхность

Я. А. Фурман, Р. В. Ерусланов, А. О. Лазарев. Формирование границ плоских перспективных проекций 3D-объекта, заданных полями с неравномерной плотностью точек

ЭЛЕКТРОНИКА

М. Т. Алиев, С. Л. Тихонов. Аппаратно-программный комплекс для оценки эффективной деятельности человека

Д. О. Глухов. Метод обнаружения повреждений изоляции с большими переходными сопротивлениями в высоковольтных сетях с изолированной нейтралью 6–20 кВ

В. Н. Изумнов, А. Р. Бувев, А. П. Большаков, И. Л. Сабанцев. Разработка и исследование сверхпроводниковых ограничителей тока индуктивного типа

В. А. Иванов, Н. В. Рябова, В. В. Павлов. Определение оптимальной конструкции дельта-антенны по диаграммам направленности для вертикального зондирования ионосферы

В. А. Иванов, Е. В. Катков, А. А. Чернов. Устройство и алгоритмы синхронизации радиотехнических систем связи и зондирования ионосферных высокочастотных радиоканалов

И. А. Калашников, Л. Ю. Грунин, А. Н. Леухин. Генератор многофазных фазоманипулированных сигналов

И. Л. Мальцев, А. Б. Савиных. Структура измерительного преобразователя направления вектора скорости в трехмерном пространстве для потоков газа и жидкости

A. N. Leukhin, E. A. Kurbanov, N. V. Parsaev, O. N. Vorobiev, A. V. Gubaev, A. S. Shuvalov, H. E. Rakhmanov, S. A. Lezhnin, A. V. Haritonov, E. N. Potekhin, S. A. Nezamaev, Y. A. Polevshchikova. Estimation of overground cover types for identification of landscape objects on satellite photographs

I. V. Petukhov, L. A. Steshina, M. G. Glushkova. Information and mathematical support of research of activity of operator of man-machine systems

A. A. Rozhentsov, A. A. Bayev, A. S. Naumov. Formation of wire models of images of spatial objects on the basis of traveling salesman problem solving

A. A. Rozhentsov, A. A. Baev, R. V. Eruslanov. Problem solving of calculation parallelization during processing of quaternion signals

Y. A. Furman, E. A. Popov, R. V. Eruslanov. 3D-object image restoration on a flathorizontal surface according to its perspective projections

Y. A. Furman, R. V. Eruslanov, A. O. Lazarev. Formation of the boundaries of flat perspective 3D-object projections prescribed by fields with nonuniform density of points

ELECTRONICS

M. T. Aliev, S. L. Tikhonov. Hardware-software complex for estimation of effective activity of person

D. O. Glukhov. The method of detection of insulation defects with large transitional resistance in high-voltage current networks with the isolated midpoint wire (6–20 kV)

V. N. Igumnov, A. R. Buyev, A. P. Bolshakov, I. L. Sabantsev. Development and investigation of superconducting current limiters of the inductive type

V. A. Ivanov, N. V. Ryabova, V. V. Pavlov. Determination of the optimal construction of the delta-aerial according to aerial patterns for the vertical ionospheric sounding

V. A. Ivanov, E. V. Katkov, A. A. Chernov. Device and algorithms of synchronization of radio engineering communication systems and the sounding of ionospheric high frequency radio channels

I. A. Kalashnikov, L. Y. Grunin, A. N. Leukhin. Generator of multiphase phase-manipulated signals

I. L. Maltsev, A. B. Savinyh. The structure of the measuring converter of the velocity vector direction in three-dimensional space for gas and fluid flows

И. В. Петухов, Н. В. Дегтярев, Л. А. Стешина. Инструментальное обеспечение методов исследования инерционности сенсорных систем человека-оператора

В. В. Роженцов, Т. А. Лежнина. Способ сокращения времени измерения разрешающей способности зрения по частоте световых мельканий

НОВИНКИ ТЕХНИКИ И ТЕХНОЛОГИЙ. ОБЗОРЫ. КОНФЕРЕНЦИИ. ВАЖНЫЕ ДАТЫ

Н. В. Белова. На Всероссийском молодежном форуме «Селигер-2010»

В. В. Булкин. Памяти Н. А. Арманда: Всероссийские радиофизические чтения

В. Г. Наводнов, И. В. Журавлева, Л. Н. Шарфутдинова. Всероссийская междисциплинарная интернет-олимпиада с международным участием «Информационные технологии в сложных системах»

П. А. Нехорошков. Фестиваль науки впервые в Республике Марий Эл

Н. В. Рябова. Современный метод радиомониторинга нижней ионосферы Земли

И. Г. Сидоркина. Факультету информатики и вычислительной техники Марийского государственного технического университета десять лет

I. V. Petuhov, N. V. Degtyarev, L. A. Steshina. Tool support of research methods of persistence of man-operator sensory systems

V. V. Rozhentsov, T. A. Lezhnina. The method of reduction in time of measurement of eyesight resolution by light flicker frequency

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

N. V. Belova. At All-russian youth forum «Seliger-2010»

V. V. Bulkin. In memory of N. A. Armand: All-russian radiophysical conferences

V. G. Navodnov, I. V. Zhuravleva, L. N. Sharafutdinova. All-Russian interdisciplinary international Internet-contest «Information technologies in complex systems»

P. A. Nekhoroshkov. For the first time Science Festival in the Republic of Mari El

N. V. Ryabova. Contemporary method of radio monitoring of the lower ionosphere of the Earth

I. G. Sidorkina. Tenth anniversary of information science and computer engineering department of mari state technical university

ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

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

Статья должна содержать только оригинальный материал, отражающий результаты завершенных исследований автора, ранее не публиковавшихся.

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

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

Требования к оригиналам предоставляемых 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 предоставлена в электронном виде и компьютерной распечатке (2 экз.) на бумаге формата А4. Шрифт Times New Roman, размер шрифта 12 пт, межстрочный интервал одинарный. Поля: внутри – 2 см, верхнее, нижнее, снаружи – 3 см (зеркальные поля), абзацный отступ первой строки на 0,75 см.

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

Далее размещается аннотация (выравнивание по ширине, размер шрифта 12 пт, курсив, отступ слева и справа 1 см). Аналогично оформляются ключевые слова. Аннотация и ключевые слова статьи предоставляются на **русском и английском языках**.

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

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

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

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

Ссылки на неопубликованные работы не допускаются.

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

К статье прилагаются следующие **документы**:

- рекомендация кафедры;
- экспертное заключение о возможности опубликования.

Материалы, не соответствующие вышеуказанным требованиям, не рассматриваются.

Адрес для переписки: 424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина 3, МарГТУ, редакция журнала «Вестник МарГТУ», **e-mail:** vestnik@marstu.net

Плата с аспирантов за публикацию рукописей не взимается.

Подробнее – на сайте МарГТУ: <http://www.marstu.net>

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