
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор **М.П. Батура**

Редакционная коллегия:

А.П. Кузнецов (зам. главного редактора),
Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),

Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович, В.К. Конопелько,
А.А. Кураев, В.А. Лабунев, В.В. Муравьев, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднар, С.В. Бордусов,
С.В. Гапоненко, В.В. Голенков, В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов,
В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев,
Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков, Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, А.А. Петровский,
В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, В.А. Сокол, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль, В.В. Цегельник,
В.А. Чердынцев, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

220013, Минск, ул. П. Бровки, 6, к. 326
293-88-41

doklady@bsuir.by

www.doklady.bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Митюхин А.И., Якубенко П.Н. Корреляционные спектры и кодовые расстояния мажоритарных последовательностей	5
Боднар И.В., Викторов И.А., Волкова Л.В., Бунцевич Р.Л. Исследование системы $Cu_2ZnSnS_4-Cu_2ZnSnSe_4$	10
Чебаков С.В., Серебряная Л.В. Алгоритм решения заданных комбинаторных задач на основе модели многокритериальной оптимизации	16
Богородь В.О., Шапошников В.Л., Филонов А.Б., Колосницын Б.С., Мигас Д.Б. Зонная структура 3D и 2D размерного Ca_2Si	23
Давыдов Г.В., Попов В.А., Потапович А.В., Сейткулов Е.Н., Савченко И.В. Синтез речеподобных сигналов на белорусском языке	27
Кузьмицкий Н.Н. Построение универсальных классификаторов текстовых образов русского языка на базе сверточных нейросетей	33
Пушкарева Н.В., Гуцо В.А. Математическое моделирование для оценки психофизиологического состояния операторов систем управления сложными техническими объектами	40

Корнага В.И., Олейник А.С., Сорокин В.М., Рыбалочка А.В. Алгоритмы и методы автоматического регулирования оптических характеристик осветительных систем	46
Мордачев В.И., Свистунов А.С. Оценка необходимого уровня мощности излучения базовых станций стандарта GSM в городе с учетом требований внутрисистемной электромагнитной совместимости	53
Гимпилевич Ю.Б., Савочкин Д.А. Эвристическая оптимизация размещения антенн RFID-системы при реализации комбинированного метода пространственной двумерной локализации ..	61
Пилиневич Л.П. Формование пористых материалов с помощью электромагнитного поля	68
Солонар А.С., Горшков С.А., Хмарский П.А., Вашкевич А.М. Межобзорная компенсация дискретных мешающих отражений с формированием карты помех и накоплением решений	74
Солодуха В.А., Ланин В.Л., Соловьев Я.А. Прогнозирование максимально допустимых потенциалов разрядов статического электричества и их влияние на диоды Шоттки	80
Сычѳв А.В., Степанов А.А., Смирнов А.Г., Бланкенбах К. Сравнительный анализ методов тональной компрессии при обработке изображений на примере жидкокристаллических дисплеев	87
Татур М.М. Моделирование архитектуры графодинамической машины на базе вычислительного кластера	93
Шейх эль Нажжарин М.Х., Сеньков А.Г., Гурский Н.Н. Синтез компенсатора возмущения в комбинированной системе автоматического управления с ПИД-регулятором в цепи основного канала	98
Столер Д.В., Пулко Т.А., Насонова Н.В., Смирнов Ю.В. Поглотители электромагнитного излучения на основе порошкообразного торфа в полимерном связующем из гидрогеля	103
Молодечкин М.О., Богущ В.А. Методика формирования и характеристики композиционного поглотителя электромагнитного излучения СВЧ-диапазона на основе диоксида титана	109
Каланда Н.А., Ковалева С.А., Лобановский Л.С., Гурский Л.И., Ярмолич М.В. Последовательность фазовых превращений при кристаллизации материала состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ из прекурсоров	116

Учредитель: учреждение образования
"Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники"

Редактор Т. В. МИРОНЕНКО
Компьютерный дизайн и верстка О. В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 12.06.2015. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 14,65. Уч.-изд. л. 13,0. Тираж 110 экз. Заказ 215.
Индекс для индивидуальной подписки 00787.
Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2015

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief M.P. Batura

ADDRESS OF EDITORIAL OFFICE

220013, Minsk, P. Brovka Str., 6, Room 326

293-88-41

doklady@bsuir.by

www.doklady.bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Mitsiukhin A.I., Yakubenko P.N. Correlation spectra and code distance of the majority sequences	5
Bodnar I.V., Victorov I.A., Volkova L.V., Buntsevich R.L. Investigation of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{-Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ system	10
Chebakov S.V., Serebryanaya L.V. Algorithm of decision given combinatorial tasks on the base of many-criterial optimization model	16
Bogorodz V.O., Shaposhnikov V.L., Filonov A.B., Kolosnicin B.S., Migas D.B. Bands structure of 3D and 2D Ca_2Si	23
Davydau H.V., Papou V.A., Potapovich A.V., Seitkulov Y.N., Savchenko I.V. Synthesis of speech-like signals in the belarusian language	27
Kuzmitsky N.N. Construction of universal russian characters classifiers based on convolutional neural networks	33
Pushkareva N.U., Hushcha U.A. Mathematical modelling for the psychophysiological condition estimation of operators of control systems above difficult technical objects	40
Kornaga V.I., Oliinyk O.S., Sorokin V.M., Rybalochka A.V. Algorithms and methods of automatic control of lighting systems optical characteristics	46
Mordachev V.I., Svistunov A.S. Estimation of acceptability of reduction the radiated power of cellular base stations in urban area at high requirements to the intrasystem electromagnetic compatibility	53
Gimpilevich Yu.B., Savochnik D.A. Heuristic optimization of antenna deployment for combinational two-dimensional RFID-based localization method	61
Pilinevich L.P. Molding of porous materials by means of an electromagnetic field	68
Solonar A.S., Gorshkov S.A., Khmarski P.A., Vashkevich A.M. Multi-scan moving target indication with clutter map and storage solutions	74

Soloducha V.A., Lanin V.L., Solov'yov Y.A. Forecasting of maximally admissible potentials of the static electricity categories and their influence to the Shottki diodes.....	80
Sycev A.V., Stepanov A.A., Smirnov A.G., Blankenbach K. Comparison of tone mapping methods during images processing on liquid crystal displays	87
Tatur M.M. Modeling of the graf-dynamic machine architecture with computing cluster.....	93
Cheikh el Najjarine M.H., Senkov A.G., Hurski N.N. Synthesis of feedforward compensator in the combined system of automatic control with PID-regulation on the main channel circuit.....	98
Stoler D.V., Pulko T.A., Nasonova N.V., Smirnov Yu.V. Electromagnetic radiation absorbers based on powdered peat in polymer hydrogel binder	103
Molodechkin M.O., Bogush V.A. Forming method and characteristics of composite absorber of UHF range electromagnetic radiation on the basis of titanium dioxide	109
Kalanda N.A., Kovaleva S.A., Lobanovskiy L.S., Hurski L.L., Yarmolich M.V. The sequence of phase transformations during the crystallization material with composition $Sr_2FeMoO_{6-\delta}$ from precursors	116

УДК 621.391.14

КОРРЕЛЯЦИОННЫЕ СПЕКТРЫ И КОДОВЫЕ РАССТОЯНИЯ МАЖОРИТАРНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

А.И. МИТЮХИН, П.Н. ЯКУБЕНКО

*Институт информационных технологий
Козлова 28, Минск, 220037, Беларусь*

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 14 ноября 2014

Рассматривается задача выбора множества бинарных последовательностей корректирующего кода с заданным минимальным расстоянием. Исследуются диадные корреляционные свойства мажоритарных последовательностей. Представлены экспериментальные данные о корреляционных спектрах нелинейных последовательностей. Предложена нелинейная кодовая конструкция, позволяющая получить большее значение кодового расстояния.

Ключевые слова: кодовое расстояние, мажоритарная последовательность, базис Уолша, диадный сдвиг, корреляция, корреляционный спектр, шум.

Введение

Решения таких задач как обнаружение и различение сигналов в шумах, низкоскоростное кодирование-декодирование, распознавание, сегментация динамических объектов связаны с использованием оптимальных или близких к оптимальным алгоритмов обработки на множествах сигналов (кодовых слов) со сравнительно большим среднеквадратическим расстоянием между ними. Степень различия между двумя кодовыми словами (векторами) $\mathbf{g} = (g_0, g_1, \dots, g_{N-1})$ и $\mathbf{x} = (x_0, x_1, \dots, x_{N-1})$ оценивается коэффициентом корреляции

$$r_{g,x} = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} g_n x_n = \frac{A - D_x}{N}, \quad (1)$$

где A – число совпадений соответствующих элементов обоих векторов; D_x – расстояние Хэмминга между векторами; N – длина слова. Для любой пары конечных последовательностей кода G функция $r_{g,x}, 0 \leq n \leq N-1, g \in G, x \in G, g \neq x$ должна быть мала. В этом случае достигается хорошая корректирующая способность кода в каналах с шумами. На практике уже сравнительно давно используются линейные трансортгональные и симплексные коды, у которых максимальный коэффициент корреляции между всеми словами минимизирован [1]. В работе исследуется усеченная нелинейная кодовая конструкция (N, M, D) -кода с минимальным расстоянием D на множестве из M мажоритарных последовательностей.

Мажоритарные последовательности

Класс этих последовательностей получается мажоритарным сложением функций Уолша $\{\text{wal}_i(t)\}, i = 0, 1, \dots, N-1$ [2]. Для построения мажоритарных последовательностей необходимо выбрать из множества функций Уолша $\{\text{wal}_i(t)\}$ l функций, где l – нечетное число.

Диадная корреляция

Ниже рассмотрены диадные корреляционные свойства мажоритарных последовательностей матрицы \mathbf{A} . В качестве опорной выбрана последовательность $a_0(t)$ примера 1. Коэффициенты диадной корреляции вычисляются по формуле

$$r(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} a(t)a(t \oplus \tau), \tau = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3)$$

Пример 2. На рис. 2 и 3 показаны графики диадных корреляционных функций последовательностей $a_0(t)$ и $a_7(t)$.

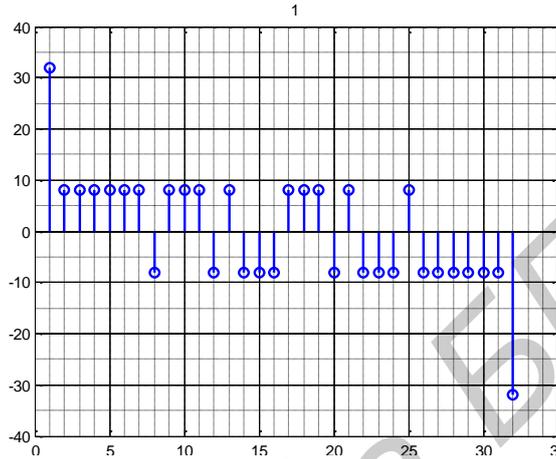


Рис. 2. Диадная корреляционная функция последовательности $a_0(t)$

Число коэффициентов корреляции с положительными и отрицательными значениями уравновешено. Как видно, последовательности обладают четырехуровневым корреляционным спектром, в котором значение 32 встречается 1 раз, значение -32 встречается 1 раз, значение 8 встречается 15 раз, значение -8 встречается 15 раз.

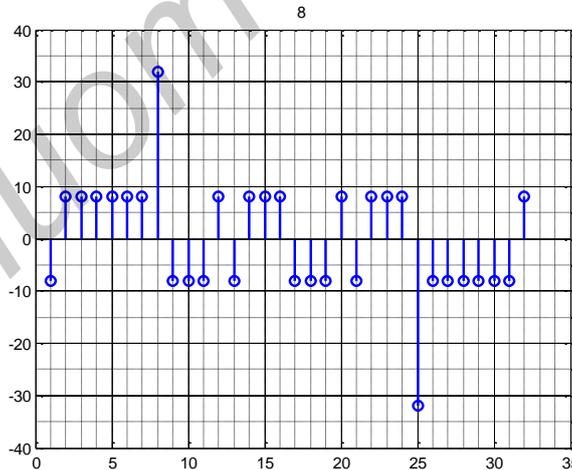


Рис. 3. Диадная корреляционная функция последовательности $a_7(t)$

Корреляционный спектр пары последовательностей $a_i(t)$ и $a_j(t)$ совпадает со спектром диадно сдвинутых последовательностей $a_i(t \oplus l)$ и $a_j(t \oplus l)$. Отличительной особенностью корреляционного спектра является его инвариантность относительно номеров мажоритарных последовательностей матрицы \mathbf{A} .

Усеченная нелинейная конструкция кода

Она представляет собой способ увеличения минимального расстояния кода. Выявление подмножеств последовательностей с большим кодовым расстоянием основывается на анализе полученного корреляционного спектра и форм всех 32-х корреляционных функций диадно сдвинутых мажоритарных последовательностей. Выражению (3) соответствует матричная запись вида $\mathbf{R} = \mathbf{A}\mathbf{a}^T$.

Вектор $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_{N-1}), a \in (-1, 1)$ совпадает с одной из строк матрицы \mathbf{A} . Координаты вектора $\mathbf{R} = (r_0, r_1, \dots, r_{N-1})^T$ – это коэффициенты диадной корреляционной функции последовательности $a_i(t)$. Из формул (1), (3) и рис. 2 и 3 следует, что отрицательные значения коэффициентов корреляции соответствуют парам $(a_i(t), a_j(t))$ мажоритарных последовательностей с большим минимальным расстоянием, чем D . Напомним, значение D – это кодовое расстояние полного множества $\{a_i\}$. Расстояние Хэмминга $D_{i,j}^x$ между двумя векторами \mathbf{a}_i и \mathbf{a}_j усеченного кода определяется как $D_{i,j}^x = D + |-r_{i,j}|$, где $(-r_{i,j})$ обозначает отрицательное значение коэффициента корреляции между векторами \mathbf{a}_i и \mathbf{a}_j . Свойство инвариантности и структурная регулярность корреляционных спектров диадно сдвинутых мажоритарных последовательностей позволяют сформировать сравнительно большое число новых множеств нелинейных последовательностей, состоящих из четырех слов с расстоянием $D = 20$. На рис. 4 показаны рассчитанные номера последовательностей, образующих такие множества. Компьютерные расчеты проведены в программной системе MATLAB (нумерация слов соответствует принятой в MATLAB).

1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	8	8	12	12	12	14	14	14	15	15	15	16	16	16
26	27	28	22	23	24	20	23	24	20	22	24	20	22	23
31	30	29	31	30	29	31	28	27	30	28	26	29	27	26
2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
7	7	7	11	11	11	13	13	13	15	15	15	16	16	16
25	27	28	21	23	24	19	23	24	19	21	24	19	21	23
32	30	29	32	30	29	32	28	27	30	28	25	29	27	25
3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
6	6	6	10	10	10	13	13	13	14	14	14	16	16	16
25	26	28	21	22	24	18	22	24	18	21	24	18	21	22
32	31	29	32	31	29	32	28	26	31	28	25	29	26	25
4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
5	5	5	9	9	9	13	13	13	14	14	14	15	15	15
25	26	27	21	22	23	17	22	23	17	21	23	17	21	22
32	31	30	32	31	30	32	27	26	31	27	25	30	26	25
5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	6	6	6
10	10	10	11	11	11	12	12	12	16	16	16	9	9	9
19	20	24	18	20	24	18	19	24	18	19	20	19	20	23
32	31	27	32	30	26	31	30	25	27	26	25	32	31	28
6	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7	7
11	11	11	12	12	12	15	15	15	9	9	9	10	10	10
17	20	23	17	19	23	17	19	20	18	20	22	17	20	22
32	29	26	31	29	25	28	26	25	32	30	28	32	29	27
7	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8
12	12	12	14	14	14	9	9	9	10	10	10	11	11	11
17	18	22	17	18	20	18	19	21	17	19	21	17	18	21
30	29	25	28	27	25	31	30	28	31	29	27	30	29	26
8	8	8	9	9	9	10	10	10	11	11	11	12	12	12
13	13	13	16	16	16	15	15	15	14	14	14	13	13	13
17	18	19	18	19	20	17	19	20	17	20	18	17	18	19
28	27	26	23	22	21	24	22	21	24	21	23	24	23	22

Рис. 4. Номера нелинейных мажоритарных последовательностей, образующих 120 блоков кодов с расстоянием $D = 20$

Пример 3. На рис. 5 приведен блок последовательностей с номерами: 5, 12, 19, 30. Легко убедиться в том, что минимальное расстояние кода равно $D = 20$. Код исправляет все конфигурации девятикратных ошибок. Такое же множество известного линейного симплексного t -кода с параметрами [31, 2, 16] корректирует только семикратные ошибки.

1	1	1-1	1	1	1	1	1-1-1-1	1	1	1-1	1-1-1-1	1	1	1-1-1-1-1-1	1-1-1-1	
-1	1	1	1-1-1-1	1	1	1	1-1	1	1	1-1-1-1	1-1-1-1-1-1	1	1	1-1-1-1	1	
1-1	1	1-1-1	1-1-1-1	1-1-1-1	1-1-1-1-1-1	1	1	1	1	1-1	1	1	1-1	1	1-1-1	1-1
-1-1-1-1-1	1-1-1-1	1-1-1	1	1-1	1-1	1-1-1	1	1-1	1	1-1	1	1	1-1	1	1	1

Рис. 5. Последовательности нелинейного (32, 4, 20)-кода

Заключение

Исследованы корреляционные спектры и минимальные расстояния нелинейного мажоритарного кода длиной $N = 32$ и его подмножеств. Вычеркивание координат (32, 32, 12)-кода, отражающее структурные особенности корреляционных спектров, позволило получить 120 блоков последовательностей, корректирующих ошибки кратностью $t = 9$.

CORRELATION SPECTRA AND CODE DISTANCE OF THE MAJORITY SEQUENCES

A.I. MITSUKHIN, P.N. YAKUBENKO

Abstract

The correlation properties of the majority of sequences are investigated. Experimental data on the correlation spectra of non-linear sequences is presented. A nonlinear code design that allows to get more distance with the code is given.

Список литературы

1. *Ипатов В.* Широкополосные системы и кодовое разделение сигналов. Принципы и приложения. М., 2007.
2. *Tanner R., Woodward J.* WCDMA – Requirements and Practical Design. Chichester, 2003.
3. *Лосев В.В., Бродская Е.Б., Коржик В.И.* Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов. М., 1988.

УДК 537.9;538.91

ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{--Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$

И.В. БОДНАРЬ, И.А. ВИКТОРОВ, Л.В. ВОЛКОВА, Р.Л. БУНЦЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
220013, ул. П. Бровки, 6, Минск, Беларусь**Поступила в редакцию 15 декабря 2014*

Направленной кристаллизацией расплава (вертикальный метод Бриджмена) выращены кристаллы соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4-x}\text{Se}_{4(1-x)}$. Методом микрорентгеноспектрального анализа определен состав полученных кристаллов, рентгеновским методом – их структура. Установлено, что как исходные соединения $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, так и твердые растворы на их основе кристаллизуются в тетрагональной структуре. Параметры элементарной ячейки a и c изменяются линейно в соответствии с законом Вегарда. Методом ДТА построена диаграмма состояния системы $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{--Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, которая характеризуется небольшим интервалом кристаллизации, и ее можно отнести к первому типу по классификации Розебома. Измерена микротвердость и плотность указанных кристаллов. Установлено, что микротвердость с составом x изменяется с максимумом, плотность – линейно.

Ключевые слова: кристаллы, структура, параметры элементарной ячейки, плотность, микротвердость, диаграмма состояния.

Введение

Исследование соединений $\text{Cu}_2\text{B}^{\text{II}}\text{C}^{\text{IV}}\text{X}_4$ (где B^{II} – Zn, Cd; C^{IV} – Si, Ge, Sn; X – S, Se, Te) является новым перспективным направлением в полупроводниковом материаловедении. К таким материалам относятся и соединения $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ обладающие физическими свойствами, которые дают возможность использовать их в качестве поглощающего слоя в тонкопленочных преобразователях солнечной энергии [1–4]. Кроме того, указанные соединения не содержат таких дорогостоящих элементов как индий и галлий. Указанные соединения также могут найти практическое применение при создании широкополосных фотопреобразователей, приемников для ближней ИК-области спектра и других устройств опто- и микроэлектроники. Однако реализация потенциальных возможностей этих соединений встречает определенные трудности. Отсутствие надежной информации о методах получения, физико-химических свойствах и связи технологии получения с физическими свойствами указанных кристаллов является на сегодняшний день одним из основных факторов, сдерживающих прикладные разработки на основе этих материалов. В литературе имеются лишь отрывочные сведения о выращивании кристаллов твердых растворов на основе соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4\text{--Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ [5–7].

Методика эксперимента

Кристаллы соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4-x}\text{Se}_{4(1-x)}$ выращивали направленной кристаллизацией расплава в однозонной вертикальной печи (метод Бриджмена). Исходными веществами служили медь, цинк, олово, сера и селен чистотой $> 99,999\%$. Элементарные компоненты, взятые в количестве ~ 25 г, загружали в двойные кварцевые ампулы. После вакуумирования внутренней ампулы до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па ее помещали во вторую кварцевую ампулу. Перед загрузкой компонентов ампулы подвергали химико-термической обработке (травление в концентрированной HF в течение 15–

20 мин, затем в смеси $\text{HCl}:\text{HNO}_3 = 1:3$ – 30 мин, после чего их многократно промывали в дистиллированной воде, а затем отжигали в вакууме при 1270 К. Такая обработка ампул способствует устранению примесей, содержащихся на поверхности кварцевого стекла. После вакуумирования внутренней ампулы ее помещали во вторую кварцевую ампулу большего диаметра, которую также вакуумировали. Это предохраняет синтезируемое вещество от окисления на воздухе, в случае нарушения целостности внутренней ампулы. К наружной ампуле снизу приваривали кварцевый стержень, служивший держателем, который присоединяли к вибратору. В процессе нагревания ампулы в печи применяли вибрационное перемешивание, которое в значительной мере ускоряет образование соединения и препятствует взрыву ампул.

В начальный период температуру в печи повышали со скоростью ~ 50 К/ч до ~ 870 –1000 К (в зависимости от соединения или от состава твердого раствора). При указанных температурах проводилась изотермическая выдержка в течение ~ 2 ч с включением вибрации. Это необходимо для того, чтобы такие летучие вещества как сера и селен при этой температуре, когда давление их паров не превышает 1 атм, успели прореагировать частично или полностью с медью, цинком и оловом. Дальнейшее нагревание после такой выдержки становится практически безопасным. Затем с той же скоростью температуру повышали до ~ 1280 К (без выключения вибрационного перемешивания) и снова выдерживали 2 ч. При больших скоростях нагрева происходило неконтролируемое повышение давления паров серы и селена в ампуле, что приводило к ее взрыву и потере шихты. После этого вибрацию отключали и проводили направленную кристаллизацию расплава, понижая температуру печи со скоростью ~ 2 К/ч до ~ 1020 К, и при этой температуре проводили гомогенизирующий отжиг полученных слитков в течение 600 ч.

Состав выращенных кристаллов определяли с помощью микронзондового рентгеноспектрального анализа. В качестве возбудителя тормозного рентгеновского излучения образца использовали электронный луч растрового электронного микроскопа «Stereoscan–360». В качестве анализатора рентгеновского спектра использовали рентгеновский спектрометр «AVALON – 8000». Относительная погрешность определения компонентов составляла $\pm 5\%$.

Структуру и параметры элементарной ячейки полученных кристаллов устанавливали рентгеновским методом. Дифрактограммы записывали на автоматически управляемом с помощью ЭВМ рентгеновском дифрактометре ДРОН–3 М в $\text{CuK}\alpha$ -излучении с графитовым монохроматором. Образцы для рентгеновских измерений готовили путем растирания кристаллов с последующим прессованием их в специальном держателе. Для снятия механических напряжений, возникающих при растирании кристаллов, проводили их отжиг в вакууме при 650 К в течение ~ 3 ч.

Температуры фазовых превращений определяли с помощью дифференциального термического анализа (ДТА), который проводили на установке, позволяющей вести запись зависимости $\Delta T = f(T)$, где ΔT – разность температур между исследуемым образцом и эталоном. Для записи термограмм выращенные кристаллы растирали в порошок и загружали в кварцевые сосудики Степанова. Свободный объем в указанных сосудиках заполняли балластом из кварцевого порошка для предотвращения диссоциации соединений или твердых растворов, после чего их вакуумировали до остаточного давления $\sim 10^{-3}$ Па. В качестве эталона использовали прокаленный оксид алюминия, который, как и исследуемое соединение, загружали в аналогичные сосудики Степанова. Идентичность температурных условий образца и эталона достигали помещением их в гнезда держателя, сделанного из жаропрочной стали. Равномерный нагрев держателя в печи со скоростью ~ 5 К/мин обеспечивали с помощью прецизионного регулятора температуры РИФ – 101. Установку ДТА периодически подвергали градуировке.

Измерения микротвердости проводили на микротвердомере «LEICA VMHT MOT» с моторизованным револьвером и ручным управлением столиком, и фокусировкой по методу Кнуппа. Индентором в этом методе является четырехсторонняя пирамида с ромбическим основанием и осевыми углами. Величина нагрузки на образец составляла 10 г, время – 10 с, длина большей диагонали индентора ~ 40 мкм.

Микротвердость определяли посредством ввода индентора в материал вместе со специфической нагрузкой и задержкой времени. После удаления индентора, получившийся отпечаток измеряется и рассчитывается коэффициент твердости. Изменения, получаемые в результате введения индентора, определяются как упруго-гибкими характеристиками материала, так и внутренними напряжениями, силами сцепления.

Результаты и их обсуждение

Данные микрорентгеноспектральных исследований представлены в таблице.

Результаты микрорентгеноспектрального анализа кристаллов соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$.

Состав, x	Cu, ат. %		Zn, ат. %		Sn, ат. %		S, ат. %		Se, ат. %	
	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.	расч.	эксп.
1,0	25,00	26,32	12,50	11,66	12,50	12,88	50,00	49,19	–	–
0,8	25,00	25,43	12,50	12,22	12,50	12,67	40,00	39,35	10,00	10,33
0,6	25,00	24,95	12,50	12,31	12,50	12,62	30,00	29,23	20,00	20,89
0,4	25,00	25,12	12,50	11,88	12,50	13,03	20,00	18,79	30,00	31,18
0,2	25,00	26,10	12,50	12,15	12,50	12,40	10,00	9,45	40,00	39,90
0,0	25,00	25,66	12,50	12,14	12,50	12,95	–	–	50,00	49,25

Видно, что экспериментальные данные удовлетворительно согласуются с расчетными величинами.

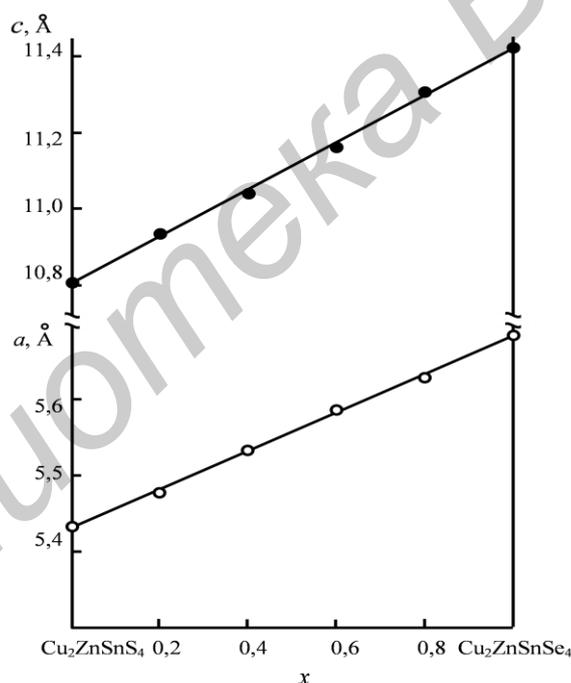


Рис. 1. Зависимость параметров элементарной ячейки a и c от состава x для твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$

Проведенные рентгеновские исследования показали, что как исходные соединения $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, так и твердые растворы на их основе кристаллизуются в тетрагональной структуре. Параметры элементарной ячейки, рассчитанные методом наименьших квадратов, для соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$ представлены на рис. 1. Видно, что изменение параметров элементарной ячейки с составом x осуществляется линейно, т.е. в исследованной системе выполняется закон Вегарда и описывается следующим соотношениями:

$$a = 5,432 + 0,25x,$$

$$c = 10,81 + 0,61x.$$

Результаты ДТА представлены на рис. 2.

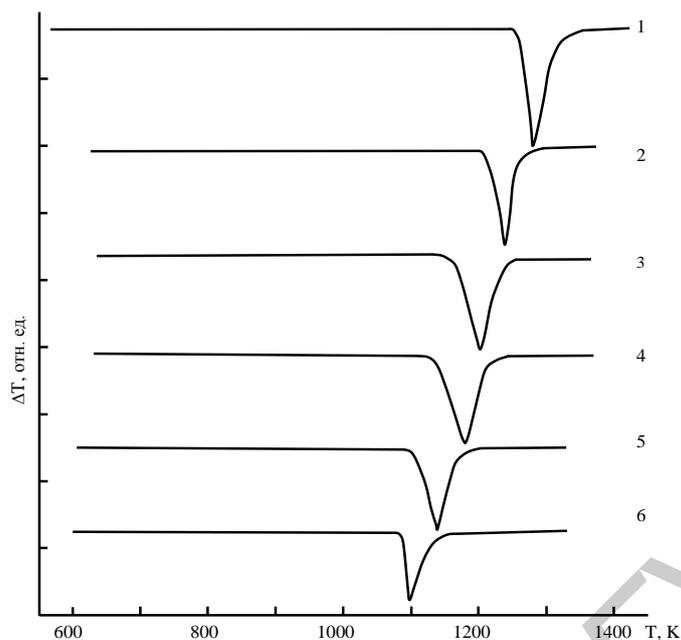


Рис. 2. Термограммы соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (1), $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ (6) и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4-x}\text{Se}_{4(1-x)}$: 2 – 0,8; 3 – 0,6; 4 – 0,4; 5 – 0,2

Видно, что на термограммах как соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, так и на термограммах твердых растворов присутствует один тепловой эффект. Для соединений он соответствует температуре плавления соединений, для твердых растворов – точкам солидуса и ликвидуса. Полученные в настоящей работе температуры плавления согласуются с данными авторов [8].

По результатам РФА и ДТА построена диаграмма состояния системы $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4 - \text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ (рис. 3). Видно, что она характеризуется небольшим интервалом кристаллизации и ее можно отнести к первому типу по классификации Розебома.

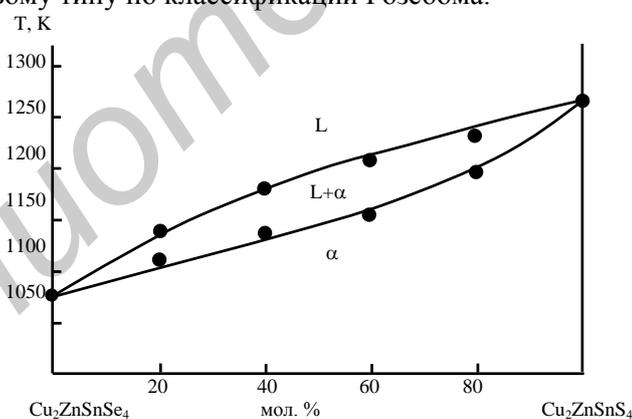


Рис. 3. Диаграмма состояния системы $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4 - \text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$

Для измерения микротвердости из кристаллов вырезали пластинки перпендикулярно оси роста толщиной ~ 3 мм. Их механически шлифовали и полировали с одной стороны, а затем травили в составе $\text{Br}_2 : \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} = 1 : 3$ для снятия механических напряжений.

Число твердости каждого образца определяли как среднее арифметическое значение из 20 отпечатков и рассчитывали по формуле:

$$H = 14229 \frac{F}{d^2}, \quad (1)$$

где d – диагональ отпечатка на поверхности образца после снятия нагрузки, F – нагрузка на пирамиду.

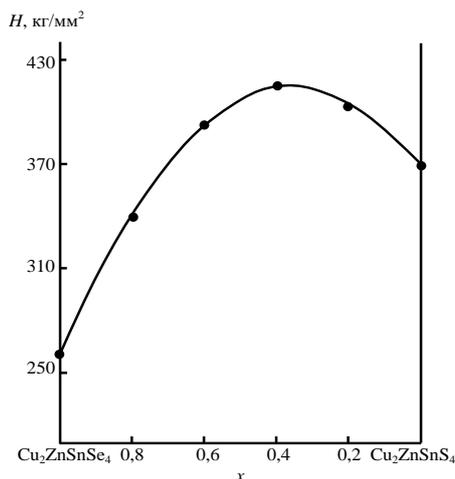


Рис. 4. Концентрационная зависимость микротвердости для твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$

Полученные экспериментальные результаты представлены на рис. 4. Из представленной зависимости следует, что для твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$ выполняется закон Курнакова, в соответствии с которым в случае образования в системе непрерывного ряда твердых растворов, зависимость $H(x)$ описывается плавной кривой с максимумом, который для исследованных твердых растворов соответствует составу $x = 0,6$.

Для описания указанной зависимости было использовано следующее выражение [9]:

$$H = H_1 + (H_2 - H_1)x + (H_2 - H_1) \frac{1}{1 - 4 \frac{M_1 - M_2}{M_1 + M_2}} x(1-x), \quad (2)$$

где H , H_1 и H_2 – микротвердость твердого раствора, первого и второго (с большей микротвердостью) исходных компонентов, соответственно; x – мольная доля второго компонента.

Расчетные величины на рис. 4 показаны сплошными линиями. Видно, что экспериментальные и расчетные величины согласуются между собой.

Плотность кристаллов определяли пикнометрическим методом, по методике, описанной в [10]. Плотность $d_{\text{пикн}}$ рассчитывали по соотношению:

$$d_{\text{пикн}} = \frac{mD_{\text{ж}}}{P_{\text{ж}} + m - P_{\text{м.ж}}}, \quad (3)$$

где m – вес образца, $P_{\text{м.ж}}$ – вес пикнометра с образцом и CCl_4 .

По результатам измерений плотности была построена ее концентрационная зависимость (рис. 5). Видно, что изменение плотности с составом x осуществляется линейно.

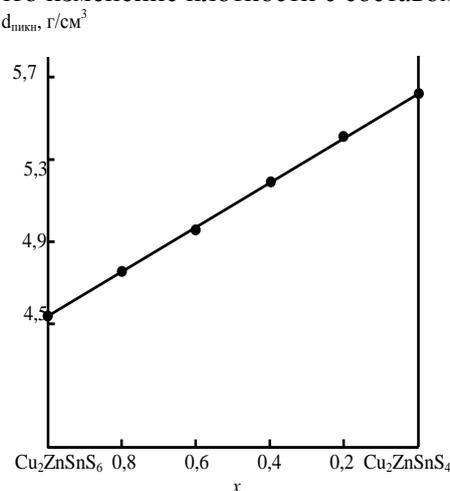


Рис. 5. Концентрационная зависимость плотности для твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$

Заключение

Методом Бриджмена выращены кристаллы соединений $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ и твердых растворов $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$. Методом микрорентгеноспектрального анализа определен состав полученных кристаллов, рентгеновским методом их структура. Показано, что как исходные соединения, так и твердые растворы на их основе кристаллизуются в тетрагональной структуре. Установлено, что параметры элементарной ячейки и плотность с составом x изменяются линейно, микротвердость с максимумом для $x = 0,6$. Методом ДТА построена диаграмма состояния системы $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4 - \text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$.

Работа выполнена при поддержке Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований проект (X13МЛД-002).

INVESTIGATION OF $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$ – $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ SYSTEM

I.V. BODNAR, I.A. VICTOROV, L.V. VOLKOVA, R.L. BUNTSEVICH

Abstract

Crystals of $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ compounds and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$ solid solutions have been grown by directional crystallization of the melt. The composition of the grown crystals was determined by X-ray microprobe analyses, XRD was used for determination of their structure. It was established, that both starting compounds $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_4$, $\text{Cu}_2\text{ZnSnSe}_4$ and $\text{Cu}_2\text{ZnSnS}_{4x}\text{Se}_{4(1-x)}$ solid solutions on their base are crystallized in tetragonal structure. Unit cell parameters a and c change linearly in accordance with Vegard's law. State diagram was built using DTA method, which are characterized with small temperature interval of crystallization and it can be attributed to the first type on Rozeboom's classification. Microhardness and density of the indicated crystals have been measured. It has been established, that microhardness changes with maxima on composition x , density – linearly.

Список литературы

1. Todorov T.K., Tang J., Bag S. et al. // Adv. Energ. Mater. 2012. Vol. 4, № 1. P. 1–5.
2. Brammertz G., Buffiere M., Oueslati S. // Appl. Phys. Lett. 2013. Vol. 103, № 16. P. 163904. P. 1–8.
3. Repins I., Beall C., Vora N. et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2012. Vol. 101. P. 154–159.
4. Ozaki S., Namba T. // Phys. Status Solidi C. 2012. Vol. 9, № 12. P. 2403–2406.
5. He J., Sun L., Chen Sh. et al. // J. Alloys Compounds. 2012. Vol. 511, № 1. P. 29–134.
6. Gao F., Yamazoe S., Maeda T. et al. // Jap. J. Appl. Phys. 2012. Vol. 51, № 10S. P. 28–32.
7. Salome P.M.P., Malaquias J., Fernandes P.A. et al. // Sol. Energy Mater. Sol. Cells. 2012. Vol. 101. P. 147–153.
8. Matsushita H., Ichikawa T., Katsui A. // J. Mater. Scien. 2005. Vol. 40, № 8. P. 2003–2005.
9. Bodnar I.V., Korzun B.V., Chernyakova A.P. // Phys. Stat. Sol. (a). 1987. Vol. 101, № 2. P. 409–419.

УДК 519.85

АЛГОРИТМ РЕШЕНИЯ ЗАДАНЫХ КОМБИНАТОРНЫХ ЗАДАЧ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

С.В. ЧЕБАКОВ, Л.В. СЕРЕБРЯНАЯ

Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси
Сурганова, 6, 220006, Минск, Беларусь

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, 220013, Минск, Беларусь

Поступила в редакцию 12 ноября 2014

Предложен метод решения двух комбинаторных задач о нахождении оптимальных подмножеств на заданном множестве начальных данных. Задачи о ранце и о покрытии отрезка основаны на использовании аппарата многокритериальной оптимизации. В разработанных алгоритмах выполняется поиск паретовских элементов во введенном двухкритериальном пространстве.

Ключевые слова: задачи о ранце и о покрытии, множество Парето, паретовские слои, доминируемая и доминирующая альтернативы.

Введение

Имеется конечное множество начальных данных. На основе его отдельных элементов по некоторому правилу формируются допустимые подмножества начальных данных, из которых по заданному критерию определяется оптимальное подмножество. К задачам подобного типа можно отнести, в частности, задачу о ранце [1] и задачу о покрытии [2]. Они относятся к числу *NP*-полных задач [1], в общем случае не имеющих алгоритмов решения с полиномиальной оценкой сложности. Методы их решения основаны на конструировании допустимых подмножеств с использованием различных способов отсечения неконкурентных вариантов, сочетающих в себе эвристические методы и метод ветвей и границ [3]. В работе предлагается способ решения комбинаторных задач данного типа, основанный на многокритериальной оптимизационной модели.

Алгоритм решения задачи о ранце

Рассмотрим следующую постановку задачи о ранце. Каждому варианту из множества начальных данных R соответствует время достижения цели и вероятность ее достижения. Общее время достижения цели при последовательном выполнении альтернативных вариантов из R ограничено величиной T . Допустимым будет такое подмножество, чье суммарное время выполнения альтернатив не превосходит величину T . Среди допустимых подмножеств требуется найти подмножество Q с максимальной суммарной вероятностью. Предполагается, что множество R содержит достаточно большое число вариантов. В этом случае точное нахождение оптимального подмножества Q является серьезной проблемой и требуется разработка нетрадиционных подходов к ее решению.

Будем говорить, что задача о ранце сформулирована в «отрицательной» постановке, если требуется найти все элементы на множестве начальных данных, которые не попадут в оптимальное подмножество Q . Будучи, по сути, эквивалентной традиционной постановке задачи о ранце, она позволяет по-иному представить процесс ее решения и локализовать группу элементов из R , которая содержит элементы Q . В работе [4] на множестве R введено

двухкритериальное транзитивное отношение предпочтения. Доминирующим является элемент, имеющий меньшее время и большую вероятность достижения цели. Под частичным решением будем понимать решение комбинаторной задачи на некотором подмножестве ее начальных данных. В [5] проведено разбиение элементов множества R на отдельные подмножества p_i . Каждое отдельное p_i в режиме параллельных вычислений разбито на паретовские слои во введенном критериальном пространстве. Доказана теорема о том, что доминируемые элементы на каждом подмножестве p_i не могут попасть в частичное решение на данном подмножестве ранее, чем элемент его доминирующий. На ее основе сформулированы условия, при выполнении которых элементы всех последних, начиная с некоторого номера, паретовских слоев не принадлежат частичным решениям на подмножествах p_i . Далее формируется ориентированный граф, вершины которого представляют собой группы различных подмножеств начальных данных, а ребра указывают, какие подмножества будут рассматриваться на следующем уровне. В каждой вершине графа выполняется операция объединения паретовских слоев на данной группе подмножеств, и вновь определяются элементы начального множества R , которые не войдут в соответствующие частичные решения. Из транзитивности отношения предпочтения следует, что эти элементы не могут попасть в частичные решения и на следующих уровнях графа, в частности, и в оптимальное подмножество Q , формируемое в конечной вершине графа. Следовательно, они являются частью решения задачи о ранце, сформулированной в «отрицательной» терминологии и исключаются из рассмотрения при построении Q .

Рассмотрим ситуацию в конечной вершине графа. Задано множество начальных данных P , содержащее все элементы из R , которые на предыдущих уровнях не были исключены из рассмотрения и представленное в виде объединения паретовских слоев. Определяем паретовские слои, элементы которых не попадут в оптимальное подмножество Q и считаем завершенным алгоритм решения задачи о ранце в «отрицательной» формулировке. В [4] показано, что при выполнении определенных условий паретовские слои разбиваются на группы таким образом, что Q может быть полностью сформировано из всех элементов оставшихся паретовских слоев. Проведем оценку сложности алгоритма нахождения оптимального решения. Очевидно, она совпадает с оценкой сложности алгоритма решения задачи о ранце в «отрицательной» формулировке, который представляет собой многократное построение паретовских слоев на подмножествах начального множества данных R .

Пусть множество Парето формируется последовательным рассмотрением элементов заданного множества начальных данных и U_m , $m = \overline{1, j}$, представляют собой паретовские множества, полученные после рассмотрения первых j элементов. Множество Парето в двухкритериальном пространстве предпочтений обладает следующим свойством [6]: если все его элементы упорядочить по убыванию (возрастанию) предпочтения одного из критериев, то по второму критерию это же расположение элементов соответствует обратному порядку, т.е. возрастанию (убыванию) его предпочтения. Это позволяет использовать при построении множеств U_m алгоритмы двоичного поиска в упорядоченных структурах данных. Тогда сложность алгоритма нахождения множества Парето на множестве начальных данных из k элементов представляет собой величину $O(k \log_2 k)$. Паретовский слой с номером l представляет собой совокупность паретовских элементов на той части множества начальных данных, которая остается после удаления элементов, принадлежащих всем предыдущим слоям. Очевидно, что число элементов начальных данных, используемое для построения очередного паретовского слоя, уменьшается с увеличением его номера. Тогда данная оценка справедлива для алгоритма формирования любого паретовского слоя. Пусть k – число элементов в множестве R . Максимальное число паретовских слоев, формируемое в любой вершине графа, не превосходит величины k . Справедливость этого факта следует из того, что любой паретовский слой может состоять из единственного элемента, который доминирует все остальные элементы соответствующего набора начальных данных и, кроме того, в вершинах графа рассматриваются различные подмножества R , общее число элементов которых не превышает величины k . Следовательно, общая оценка алгоритма построения оптимального подмножества Q имеет вид $O(k^2 \log_2 k)$.

Пусть условия формирования решения задачи о ранце из элементов первых паретовских слоев множества P не выполняется. Предположим далее, что не все подмножество Q , а только некоторая его часть может быть сформирована из элементов первых паретовских слоев. Тогда для окончательного построения Q требуется решить подзадачу о ранце с измененным значением величины T , и все элементы, представляющие собой решение этой подзадачи принадлежат одному или нескольким последующим паретовским слоям. Такая же структура оптимального подмножества будет верна и в общем случае, когда на множестве P не выполняется условия формирования, частичного или полного, подмножества Q из элементов первых паретовских слоев. Все элементы Q , в частности, могут принадлежать множеству Парето на множестве P .

Таким образом, предложена следующая двухэтапная схема локализации элементов оптимального подмножества Q на множестве начальных данных R :

- поиск решения задачи о ранце в «отрицательной» формулировке на основе построения паретовских слоев в заданном двухкритериальном пространстве;
- рассмотрение на множестве P для построения оптимального подмножества Q только элементов множества Парето либо одного или нескольких соседних паретовских слоев.

Это позволяет в значительной степени уменьшить количество элементов начального множества R , требуемых для формирования оптимального подмножества Q . Для решения задачи о ранце на этом локализованном наборе начальных данных можно применить любой из известных алгоритмов. Далее предложен способ формирования оптимального подмножества Q из элементов множества Парето, основанный на свойстве упорядочивания его элементов в двухкритериальном пространстве.

Построение оптимального подмножества из элементов множества Парето

Пусть известно, что все элементы оптимального подмножества принадлежат множеству Парето на множестве P . Расположим элементы множества Парето по убыванию предпочтения значения критерия вероятности. Первый элемент A_1 будет иметь наибольшую вероятность и по свойству упорядочивания элементов паретовских множеств его второй критерий имеет наихудшее, максимальное, время выполнения. Ценность второго критерия возрастает с уменьшением времени выполнения. Следовательно, время выполнения каждого следующего элемента в данной упорядоченной последовательности будет меньше предыдущего. Поскольку требуется найти подмножество с максимальной суммарной вероятностью, то первые n элементов A_1, A_2, \dots, A_n , имеющие наибольшее значение вероятности, последовательно включаем в формируемое допустимое подмножество G до тех пор, пока сумма их времени выполнения не станет больше заданной величины T . Подмножество всех оставшихся элементов последовательности $h_j, j = n+1, \dots, r$, где r – число элементов в множестве Парето, обозначим через D .

Проводим далее корректировку подмножества G элементами из D в направлении увеличения его суммарной вероятности. Рассмотрение элементов подмножества G для возможной их замены начинаем с последнего элемента A_n . Пусть O – его время выполнения, а H – вероятность достижения цели. Сформулируем подзадачу построения оптимального замещающего подмножества для элемента из G . Подмножество Z , включающее в себя элементы из D , назовем замещающим, если сумма времени выполнения всех его элементов не больше граничной величины O , а их сумма по вероятности больше величины H . Среди всех замещающих подмножеств требуется найти подмножество Z_{\max} с максимальной суммарной вероятностью. После замены элемента A_n подмножеством Z_{\max} новое подмножество будет иметь суммарное значение вероятности больше, чем G , оставаясь при этом допустимым для основной задачи.

Пусть x_j и q_j – вероятность и время выполнения элементов h_j из D . Для каждого $h_j, j = r, r-1, \dots, n+1$ вычислим величины S_j и V_j , представляющие собой, соответственно, суммы всех x_i и $q_i, i = r, r-1, \dots, j$.

Утверждение 1. Пусть $h_m, r \geq m \geq n+1$, первый по упорядоченности элемент из D , чье время выполнения меньше либо равно граничной величине O некоторой подзадачи, и величина

S_m этого элемента меньше либо равна H . Тогда замещающее подмножество на множестве D с такими граничными величинами не может быть построено.

Доказательство. Из упорядоченности элементов подмножества D по уменьшению времени их выполнения следует, что все элементы с номерами, меньшими, чем номер m , имеют время выполнения, больше величины O , и не могут войти в замещающее подмножество. Справедливо соотношение $S_m > S_{m+1} > S_{m+2} > \dots > S_r$. По условию $H \geq S_m$. Поскольку замещающее подмножество может содержать только элементы из D с номерами, большими либо равными m , то его построение для заданных значений граничных величин невозможно.

Для построения оптимального подмножества Q требуется рассмотреть в качестве порождающих соответствующие подзадачи построения замещающих подмножеств как отдельные элементы G , так и их подмножества. Покажем, что существует порядок их рассмотрения, позволяющий в определенной степени сократить количество рассматриваемых подзадач, необходимых для формирования Q . Возьмем любое подмножество элементов из G . Порожденная им подзадача имеет граничные величины по времени и вероятности равные сумме значений соответствующих координат элементов, составляющих данное подмножество.

Утверждение 2. Пусть величина S_{n+1} меньше вероятности последнего элемента A_n из G . Тогда допустимое подмножество G представляет собой оптимальное подмножество Q .

Доказательство. Величина S_{n+1} представляет собой сумму по вероятности всех элементов D и по условию ее значение меньше вероятности элемента A_n . Исходя из упорядоченности по убыванию критерия вероятности элементов подмножества G , величина S_{n+1} будет меньше значения вероятности любого элемента из G , а, следовательно, меньше суммарной вероятности любого подмножества G . Тогда никакое замещающее подмножество из элементов D не может быть построено, и G представляет собой требуемое оптимальное подмножество.

Следствие 1. Пусть существует число u , меньше n , такое, что S_{n+1} меньше значения вероятности элемента A_u . Тогда подзадачи для всех подмножеств, составленных из элементов $A_i, i = 1, \dots, u$, из G не имеют решения.

Следствие 2. Пусть существует такое минимально возможное число $1 < k < n$, такое, что величина S_{n+1} меньше суммарной вероятности всех подмножеств G , содержащих k элементов. Тогда подмножества с мощностью больше, чем k , нет смысла рассматривать с целью формулирования новых подзадач построения замещающих подмножеств.

Определим порядок рассмотрения элементов подмножества G для их возможной корректировки. Сначала формулируются подзадачи нахождения замещающих подмножеств для каждого отдельного элемента из G . Далее, при необходимости, формулируем подзадачи для всех групп, содержащих два элемента из G , затем для групп из трех элементов и т.д. Такой порядок позволяет при выполнении определенных условий существенно сократить число возможных операций для построения оптимального подмножества Q .

Далее предлагается общая схема алгоритма подзадачи построения замещающих подмножеств для заданных значений граничных величин. Полагаем $i = 1, O_i = O, W_i = H, F_i = 0$.

1. Осуществляем поиск элемента K_i из D , время выполнения которого меньше либо равно O_i . Если такого элемента не существует, то переходим к пункту 3. Пусть требуемый K_i , равный некоторому h_{t_i} , определен, и $W_i \geq S_{t_i}$. Применяя утверждение 1, получаем, что формирование замещающего подмножества невозможно и переходим к пункту 3. Если $S_{t_i} > W_i$ и значение величины $O_i \geq V_{t_i}$, то включаем в Z все элементы $h_j, j = t_i, \dots, r$, замещающее подмножество построено и переходим к пункту 3. Если $S_{t_i} > W_i$ и $V_{t_i} > O_i$, то переходим к пункту 2.

2. Включаем K_i в замещающее подмножество Z . Вычисляем $F_i = F_i + x_{t_i}$. Если $F_i > H$, то замещающее подмножество построено и переходим к пункту 3. Если $H \geq F_i$ и $q_{t_i} = O_i$, то ресурс времени исчерпан, замещающего подмножества не существует, и переходим к пункту 3.

Если $q_{t_i} < O_i$, то имеется возможность дальнейшего построения замещающего подмножества. Полагаем $i = i+1$. Находим величину оставшегося ресурса времени $O_i = (O_i - q_{t_i})$, вычисляем значение вероятности $W_i = H - F_{i-1}$ и переходим к пункту 1.

Отметим, что по построению $O_i < O_{i-1}$, и все элементы D упорядочены по уменьшению времени их выполнения. Следовательно, поиск в пункте 1 следующего элемента замещающего подмножества осуществляется только среди элементов с номерами большими, чем номер t_i .

3. Продолжаем формирование замещающих подмножеств рассматриваемой подзадачи следующим образом. Полагаем $i = i-1$. Возвращаемся к предыдущему элементу K_i замещающего подмножества Z и рассмотрим следующий за ним элемент E с номером r_i . Если величина $S_{r_i} > W_i$, то полагаем элемент $K_i = E$ и для дальнейшего формирования замещающего подмножества переходим к пункту 2. Если $S_{r_i} \leq W_i$ то, применяя утверждение 1, получаем, что дальнейшее построение замещающего подмножества не имеет смысла, и переходим к элементу K_{i-1} из Z и т.д. Таким образом, формируется многоуровневая древовидная схема построения всех возможных замещающих подмножеств подзадачи с заданными граничными величинами.

Если хотя бы одно замещающее подмножество рассматриваемой подзадачи построено и, следовательно, можно определить подмножество Z_{\max} , то заменяем элемент или группу элементов из G , породивших эту подзадачу, на элементы подмножества Z_{\max} . Получаем новое допустимое подмножество G_t , $t = 0, s$, $G_0 = G$, где s – общее число подзадач, для которых существует хотя бы одно замещающее подмножество и соответствующее ему новое подмножество D_t . Сохраняем упорядоченность элементов подмножеств G_t и D_t по убыванию значения вероятности и времени их выполнения. Корректируем при необходимости величины S_j и V_j у некоторых элементов из D_t и формулируем новую подзадачу для последнего элемента подмножества G_t . Если не существует ни одного замещающего подмножества для заданных значений граничных величин, то формулируем новую подзадачу в соответствии с указанным ранее порядком рассмотрения элементов G_t . Полагаем $i = 1$, $O_i = O$, $W_i = H$, $F_i = 0$ и переходим к пункту 1.

При выполнении условий утверждения 2 полученное после последней корректировки допустимое подмножество G_t является искомым оптимальным подмножеством Q .

Общая схема решения задачи о нахождении оптимального подмножества с максимальной суммарной стоимостью на основе двухкритериальной математической модели может быть представлена следующим образом. Находим решение задачи о ранце в ее отрицательной формулировке как подмножество элементов начального множества, которые не могут быть включены в оптимальное подмножество. Если в результате нет возможности сформировать оптимальное подмножество, применяем алгоритм его построения из элементов паретовских множеств, основанный на упорядоченности их элементов по значениям критериев качества.

Применимость предложенного метода решения задач о ранце зависит также и от конкретного типа задачи. Например, для рассматриваемой в [1] задаче о ранце нет смысла его использования, т.к. координата «стоимости» принимает два значения: 0 и 1, и разбиение множества начальных данных на большое число паретовских слоев не представляется возможным.

Двухкритериальная модель решения задачи о покрытии отрезка

Комбинаторная оптимизационная задача о покрытии отрезка $[AB]$ формулируется следующим образом. Задано конечное множество L отрезков, входящих в отрезок $[AB]$, где A и B действительные числа. Требуется определить оптимальное подмножество V из L , которое покрывает отрезок $[AB]$ и содержит минимальное число элементов среди всех подмножеств, обладающих этим свойством. Пусть число начальных данных в множестве L достаточно велико. Задача о покрытии, также как и задача о ранце, принадлежит к типу NP -полных задач и получение точного решения при большом числе начальных данных представляет собой значительную проблему. Рассмотрим задачу о покрытии отрезка в отрицательной формулировке, т.е. как задачу поиска элементов множества L , которые по своей структуре не могут быть включены в оптимальное подмножество. Используем аппарат многокритериальной оптимизации для нахождения таких элементов начальных данных.

Для каждого элемента S'_i из L определим два критерия x_i и y_i . Первый критерий – расстояние от левой границы отрезка $[AB]$ до левой границы данного элемента. Второй – расстояние от правой границы $[AB]$ до правой границы элемента. Отношение предпочтения между отдельными элементами множества L в заданном двухкритериальном пространстве введем следующим образом. Будем считать, что ценность каждого критерия возрастает с уменьшением его значения. Тогда если величина одного из критериев элемента S'_i меньше, а

второго – хотя бы не больше значений соответствующих критериев элемента S'_2 , то элемент S'_1 доминирует элемент S'_2 . Если величина одного из критериев S'_1 больше соответствующего критерия элемента S'_2 , а величина второго критерия меньше, то элементы S'_1 и S'_2 находятся в отношении Парето. Предположим, что на множестве L не существует совпадающих элементов.

Утверждение 3. Для того чтобы отрезок S'_2 полностью включался в некоторый другой отрезок S'_1 из L , необходимо и достаточно, чтобы S'_2 был доминируемым отрезком S'_1 на введенном двухкритериальном отношении предпочтения.

Доказательство. Пусть отрезок S'_2 полностью включается в отрезок S'_1 . По условию рассматриваемой задачи все отрезки из L полностью входят в отрезок $[AB]$ и на множестве L нет совпадающих элементов. Тогда расстояние хотя бы от одной границы отрезка S'_1 до соответствующей границы отрезка $[AB]$ должно быть меньше, а по второй границе – не больше, чем у отрезка S'_2 . Это соответствует условию доминирования S'_2 элементом S'_1 . Пусть отрезок S'_2 доминируется отрезком S'_1 . Тогда значения их критериев в виде расстояния до соответствующих границ отрезка $[AB]$ связаны вышеуказанными соотношениями. Все отрезки из L входят в отрезок $[AB]$, и, доминируемый отрезок полностью включается в доминирующий.

По определению множества Парето на конечном множестве начальных данных для его построения требуется найти все доминируемые альтернативы. Из утверждения 3 получаем, что решение двухкритериальной задачи нахождения множества Парето на множестве начальных данных L с введенным отношением предпочтения представляет собой алгоритм нахождения отрезков, для которых существует хотя бы один отрезок из L полностью его содержащий.

Критериальные оценки отдельных элементов выражаются действительными числами. Отношение «больше» и «меньше» на множестве действительных чисел транзитивно. Тогда транзитивно и введенное двухкритериальное отношение предпочтения, т.е. выполняется соотношение: если элемент S'_1 доминирует S'_2 , а элемент S'_2 доминирует элемент S'_3 , то S'_1 доминирует S'_3 . В [5] было показано, что задача нахождения множества Парето на конечном множестве начальных данных при транзитивности отношения предпочтения может быть решена на основе организации параллельных вычислений путем нахождения частичных решений на динамической многоуровневой графовой модели, где вершины представляют собой подмножества начальных данных. Определенные при формировании каждого отдельного частичного решения доминируемые элементы исключаем из дальнейшего рассмотрения.

Утверждение 4. Любые два отрезка, входящие в множество начальных данных L и находящиеся между собой в отношении Парето на введенном отношении предпочтения, не могут быть включены друг в друга.

Доказательство. По введенному отношению предпочтения между элементами из множества L у каждого отрезка, входящего в паретовское множество, расстояние от одной своей границы до соответствующей границы отрезка $[AB]$ меньше, а от второй границы – больше, чем у любого другого отрезка из этого же множества. По условию задачи все отрезки из L включаются в отрезок $[AB]$, из чего и следует справедливость данного утверждения.

Частичные решения представляют собой паретовские множества на подмножествах L . По утверждению 4 никакие два элемента из частичного решения не могут полностью включаться друг в друга. Однако элемент частичного решения может полностью покрываться некоторой группой отрезков из этого же множества и в этом случае также должен быть исключен из дальнейшего рассмотрения. Пусть построено некоторое частичное решение F . Упорядочим его элементы по убыванию предпочтения первого критерия – расстоянию от левого края отрезка. По свойству элементов паретовского множества в двухкритериальном пространстве по второму критерию – расстоянию от правого края отрезка эти же элементы будут упорядочены по возрастанию его предпочтения. Тогда первый элемент S_1 последовательности имеет наименьшее расстояние от левой границы отрезка $[AB]$ и наибольшее расстояние от правой границы.

Утверждение 5. Первый по порядку упорядочивания S'_1 и последний S'_m элементы множества F не могут покрываться никакой группой элементов из этого же множества.

Доказательство. Предположим противное, что, например, у S'_1 имеется покрывающая группа. Элемент S'_1 имеет наилучшее значение по первому критерию среди всех элементов паретовского множества. Тогда, по крайней мере, у одного отрезка S'_p из покрывающей группы с элементом S'_1 должно совпадать значение первого критерия. По утверждению 4 элементы паретовского множества не могут быть включены друг в друга. Тогда S'_1 и S'_p могут только

совпадать между собой, но по сделанному ранее предположению на множестве L таких элементов не существует. Следовательно, второго элемента с таким значением первого критерия как у S'_1 во множестве Парето быть не может, тогда не может быть и покрывающей группы. Для элемента S'_m доказательство отсутствия покрывающей группы, аналогично, только рассматривается второй критерий, по которому S'_m имеет наилучшее значение.

Сформулируем утверждение, указывающее для любого элемента S'_k , $k = 2, \dots, m - 1$, где m – число элементов в частичном решении, достаточные условия существования покрывающей группы. Пусть Y_j – величина расстояния от левой границы отрезка $[AB]$ до правой границы некоторого отрезка S'_j из множества L . Поскольку все отрезки из L полностью включаются в отрезок $[AB]$, то это расстояние представляет собой сумму значения первой координаты отрезка S'_j и его длины. Элементы множества F упорядочены по значению первого критерия. Предположим, в нем существует элемент S'_z с номером меньшим, чем номер элемента S'_k , который частично покрывает S'_k . Тогда справедливо следующее утверждение.

Утверждение 6. Если в F существует элемент S'_b с номером большим, чем номер S'_k , такой, что выполняется следующее условие: значение первой координаты элемента $S'_b < Y_z$, то S'_b покрывает оставшуюся часть S'_k и покрывающая группа для элемента S'_k состоит из двух элементов: S'_z и S'_b .

Доказательство. Выполнение условия $x_b < Y_z$ означает, что элементы S'_b и S'_z пересекаются между собой. По условию S'_b имеет больший номер, чем S'_z и эти два отрезка, как элементы паретовского множества, не могут включаться друг в друга. Тогда S'_b обязательно хотя бы частично покрывает отрезок S'_k . Элементы F упорядочены по возрастанию предпочтения второго критерия. Следовательно, вторая координата S'_b превосходит в смысле предпочтения, вторую координату S'_k . Это означает, что расстояние от правой границы отрезка S'_b до правой границы отрезка $[AB]$ меньше этого же расстояния для отрезка S'_k . Тогда отрезок S'_b покрывает всю оставшуюся часть S'_k , и покрывающая группа для S'_k состоит из элементов S'_z и S'_b .

Используя утверждение 6, можно проверить возможность покрытия отдельных элементов частичного решения. Покрывающие группы должны содержать хотя бы один элемент с меньшим номером, чем покрываемый элемент. Все покрываемые отрезки, входящие в частичные решения на любом уровне параллельных вычислений, исключаем из рассмотрения.

Оптимальное подмножество V формируется только из элементов множества Парето. Число элементов множества Парето в случае двух критериев качества приблизительно равно величине $\sqrt{\pi k}$ [7]. Из этой оценки следует и возможная степень сокращения количества элементов, которые будут использованы для построения оптимального подмножества V .

ALGORITHM OF DECISION GIVEN COMBINATORIAL TASKS ON THE BASE OF MANY-CRITERIAL OPTIMIZATION MODEL

S.V. CHEBAKOV, L.V. SEREBRYANAYA

Abstract

The decision method of two combinatorial tasks about finding of optimum subset on the given set of initial data is offered. The task about knapsack and the task about length covering are founded on use the mathematical formulas of many-criterial optimization. In developed algorithms is executed searching of pareto elements in the defined two-criterial space.

Список литературы

1. Пападимитриу Х.Х. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. М., 1985.
2. Еремеев А.В., Заозерская Л.А., Колоколов А.А. // Дискретный анализ и исследование операций. 2007. Сер. 2, Т. 7, № 2. С. 22–46.
3. Закревский А.Д. Логический анализ каскадных схем. М., 1981.
4. Чебаков С.В. // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2005. № 2. С. 112–118.
5. Чебаков С.В. // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-мат. навук. 2009. № 3. С. 105–113.
6. Kung H.F., Preparata F.P. // J. of the Association for Computing Machinery. 1975. Vol. 22. P. 469–476.
7. Дубов Ю.А., Травкин С.И., Якимец В.Н. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем. М., 1986.

УДК 539.216:546.824-31

ЗОННАЯ СТРУКТУРА 3D И 2D РАЗМЕРНОГО Ca₂Si

В.О. БОГОРОДЬ, В.Л. ШАПОШНИКОВ, А.Б. ФИЛОНОВ, Б.С. КОЛОСНИЦЫН, Д.Б. МИГАС

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь**Поступила в редакцию 18 декабря 2014*

Представлены результаты теоретического исследования зонных структур объемного Ca₂Si и тонких пленок на его основе с поверхностями (001), (010), (100). Установлено, что объемный Ca₂Si и тонкие пленки Ca₂Si(010) и (100) являются прямозонными полупроводниками, а поверхностные состояния приводят к металлическим свойствам тонких пленок Ca₂Si(001).

Ключевые слова: тонкие пленки, силицид кальция, зонная структура.

Введение

Силициды хорошо совместимы с традиционной кремниевой технологией и широко используются в современно микро- и нанoeлектронике [1]. Большинство из них являются металлами, но существуют и полупроводниковые силициды [2], которые имеют привлекательные свойства для применения в термоэлектронных [3] и оптоэлектронных [4] приборах. Недавно значительное внимание привлекли полупроводниковые силициды щелочноземельных металлов, а именно Mg₂Si, Ca₂Si и BaSi₂. Компоненты этих соединений достаточно широко распространены в земной коре. Более того, эти силициды оказались безвредными для окружающей среды.

Известно, что Ca₂Si кристаллизуется в простой орторомбической структуре (с пространственной группой *Pnma*) [5], имеющей параметры решетки, которые приведены в таблице. Элементарная ячейка Ca₂Si, изображенная на рис. 1, включает в себя четыре формульные единицы, где все атомы сгруппированы в три равных набора химически неэквивалентных позиций. Установлено, что каждый атом кремния окружен трехгранными призмами, сформированными атомами кальция [6].

Экспериментальные параметры решетки Ca₂Si

Параметр	<i>a</i> (Å)	<i>b</i> (Å)	<i>c</i> (Å)
Эксперимент	7,667	4,799	9,002
Теория	7,615	4,820	9,051

По результатам теоретических исследований зонной структуры, проведенных с учетом многочастичного взаимодействия в рамках GW-приближения, выявлено, что Ca₂Si является прямозонным полупроводником с шириной запрещенной зоны 1,02 эВ [7]. Первый прямой переход расположен в точке Г простой орторомбической зоны Бриллюэна. Это же значение ширины запрещенной зоны (1,02 эВ) получено в результате исследования температурной зависимости Холовской подвижности носителей заряда в случае тонких пленок Ca₂Si [8]. Следует отметить, что практически аналогичная дисперсия энергетических зон вблизи запрещенной зоны была обнаружена в другой теоретической работе [9], где использовался первопринципный метод псевдопотенциалов в приближении локальной плотности, хотя значение ширины запрещенной зоны оказалось равным 0,31 эВ. Подобное занижение ширины запрещенной зоны типично для методов, использующих приближение локальной плотности. В

данной работе будет исследовано влияние различных потенциалов (модифицированного обменного потенциала Беке-Джонсона и гибридного функционала YS-PBE0) на дисперсию и ширину запрещенной зоны объемного Ca_2Si , а также будут рассмотрены возможные понижения изменения электронных свойств этого силицида в случае понижения размерности с 3D до 2D, т.е. от объемного материала до тонких пленок.

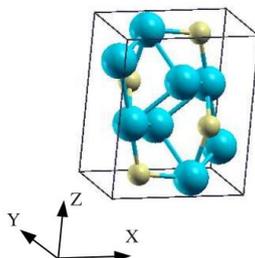


Рис. 1. Элементарная ячейка Ca_2Si : сферы большего размера отображают атомы кальция, а меньшего размера – атомы кремния

Детали расчета и структурные модели

Моделирование структурных и электронных свойств объемного Ca_2Si и тонких пленок на его основе проводилось с помощью метода псевдопотенциалов (код VASP) [10]. В качестве обменного и корреляционного потенциалов использовалось обобщенное градиентное приближение Пердю-Берке-Эрнценхоф [11]. Минимизация полной энергии осуществлялась через оптимизацию параметров решетки и релаксацию атомных позиций. Структурная оптимизация была остановлена, когда силы, действующие на атомы, были меньшими, чем $0,01 \text{ эВ/\text{Å}}$. Сходимость по полной энергии была лучше, чем 1 мэВ на формульную единицу, при использовании $9 \times 13 \times 7$ набора k -точек в неприводимой части зоны Бриллюэна. Оптимизированные параметры решетки оказались очень близки к экспериментальным значениям, которые представлены в табл. 1. Для расчета зонной структуры объемного Ca_2Si также был применен метод линейаризованных присоединенных плоских волн с полным потенциалом (код WIEN2k) [12], где использовалась кристаллическая структура Ca_2Si , полностью оптимизированная с помощью метода псевдопотенциалов. Наряду с обобщенным градиентным приближением Пердю-Берке-Эрнценхоф использовались модифицированный обменный потенциал Беке-Джонсона [13] и гибридный функционал YS-PBE0 [14]. Параметр, который контролировал сходимость $R_{\text{MT}}K_{\text{max}}$, был равен 8, а разложение волновых функций по решеточным гармоникам для парциальных волн, используемых внутри атомных сфер, проводилось до $l=10$. Процедура самосогласования выполнялась на 45 k -точках, равномерно расположенных в неприводимой части зоны Бриллюэна.

Пленки Ca_2Si рассматривали как периодически расположенные 2D структуры (тонкие пленки), отделенные между собой слоем вакуума толщиной 9 \AA , и имеющие две одинаковые поверхности. Установлено, что этой толщины вакуума было достаточно для исключения взаимодействия между соседними пленками. Были рассмотрены пленки с поверхностями (100), (010), (001) и толщиной около $3,5 \text{ нм}$, которые получены при увеличении соответственно в четыре, в восемь и в пять раз параметров решетки a , b или c (рис. 2).

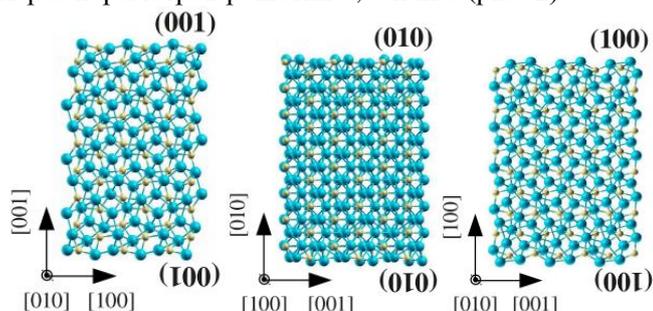


Рис. 2. Вид сбоку тонких пленок Ca_2Si с поверхностями (001), (010) и (100), имеющих толщину соответственно $3,5 \text{ нм}$, $3,7 \text{ нм}$ и $3,7 \text{ нм}$, после оптимизации. Сферы большего размера изображают атомы кальция, меньшего – кремния. Поверхности и кристаллографические направления обозначены

Электронные свойства объемного Ca_2Si и тонких пленок Ca_2Si

Полученная зонная структура в рамках обобщенного градиентного приближения показана на рис. 3, *а*. Очевидно, что Ca_2Si является прямозонным полупроводником, поскольку максимум валентной зоны и минимум зоны проводимости расположены в точке Γ . Установлено, что $\text{Ca}-d$ состояния и $\text{Si}-p$ состояния вносят свой вклад в максимум валентной зоны, в то время как $\text{Ca}-s$, $\text{Ca}-d$ и $\text{Si}-d$ состояния доминируют в минимуме зоны проводимости. Ширина запрещенной зоны 0,31 эВ оказалась очень близка к ранее полученным результатам [15], где использовалось обобщенное градиентное приближение, и значительно недооценена по сравнению с экспериментальным значением (1,02 эВ [6]), и теоретически полученному (1,02 эВ) с учетом многочастичного взаимодействия в рамках GW-приближения [10]. Применение обменного потенциала Беке-Джонсона позволило увеличить оценку ширины запрещенной зоны до 0,60 эВ (см. рис. 3, *б*), тогда как использование гибридного функционала привело к значениям ширины запрещенной зоны 0,79 эВ (см. рис. 3, *в*). Следует отметить, что дисперсия зон вблизи запрещенной зоны для различных потенциалов одинакова.

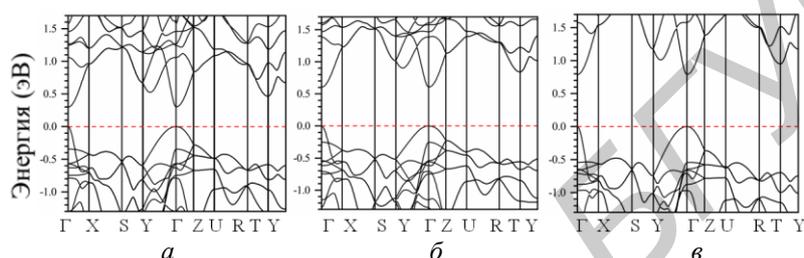


Рис. 3. Зонная структура объемного Ca_2Si в рамках обобщенного приближения градиента Пердю-Берке-Ернценхоф (*а*), учетом потенциала обмена Беке-Джонсона (*б*), с учетом гибридного функционала (*в*)

На рис. 4 представлены энергетические зонные диаграммы пленок с различными поверхностями, полученные в результате вычислений методом псевдопотенциалов с использованием обобщенного градиентного приближения. Отметим, что пленку Ca_2Si с поверхностью (001) можно рассматривать как металл, так как уровень Ферми пересекает несколько зон, которые сформированы $\text{Ca}-p$, $\text{Ca}-d$ и $\text{Si}-p$ состояниями атомов, расположенных на и у поверхности пленки. В то же время пленки $\text{Ca}_2\text{Si}(100)$ и (010) являются полупроводниками, с шириной запрещенной зоны около 0,48 эВ. Полученное значение ширины запрещенной зоны (0,31 эВ) оказалось больше чем для объема из-за влияния эффектов квантового ограничения. Для $\text{Ca}_2\text{Si}(010)$ максимум валентной зоны определен $\text{Ca}-d$ и $\text{Si}-p$ состояниями атомов, расположенных во внутренней области пленки, в то время как $\text{Ca}-s$ и $\text{Ca}-d$ состояния атомов, равномерно распределенных по всей толщине пленки, характеризуют минимум зоны проводимости. В случае с $\text{Ca}_2\text{Si}(100)$ в максимум валентной зоны вносят свой вклад $\text{Ca}-p$, $\text{Ca}-d$ и $\text{Si}-p$ состояния атомов, которые находятся у поверхности пленки, и только $\text{Ca}-s$ и $\text{Ca}-d$ состояния атомов, расположенных во внутренней области пленки определяют минимум зоны проводимости. Легко заметить, что дисперсия верхних по энергии валентных зон и нижних по энергии зон проводимости у тонких пленок $\text{Ca}_2\text{Si}(010)$ и (100) подобна дисперсии соответствующих зон для объемного материала.

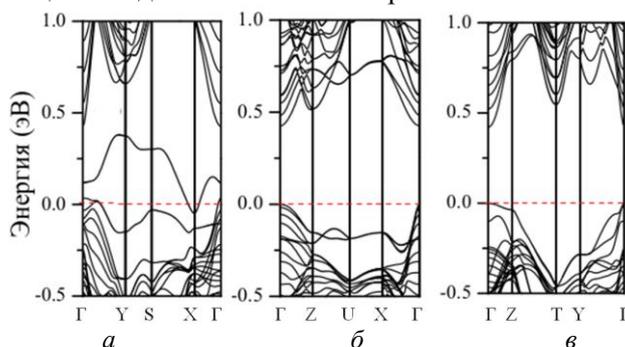


Рис. 4. Зонная структура пленок Ca_2Si с поверхностями *а* – (001), *б* – (010), *в* – (100): ноль на шкале энергии соответствует максимуму валентной зоны для пленок $\text{Ca}_2\text{Si}(010)$ и (100), в то время как для $\text{Ca}_2\text{Si}(001)$ отображает положение уровня Ферми

Заклучение

По результатам вычислений показано хорошее согласие с предыдущими теоретическими расчетами дисперсии энергетических зон объемного Ca_2Si , и подтверждено, что этот силицид является прямозонным полупроводником. Мы также установили, что применение обменного потенциала Беке-Джонсона и гибридного функционала улучшает оценку значения ширины запрещенной зоны (0,60 эВ и 0,79 эВ соответственно), однако очевидна ее недооценка по сравнению с экспериментальными данными (1,02 эВ) и с результатами расчетов (1,02 эВ), где проводился учет многочастичного взаимодействия в рамках GW-приближения. Поверхностные состояния могут приводить к появлению металлических свойств у тонких пленок $\text{Ca}_2\text{Si}(001)$, в то время как тонкие пленки $\text{Ca}_2\text{Si}(010)$ и (100) обладают полупроводниковыми свойствами и прямозонным характером запрещенной зоны.

BANDS STRUCTURE OF 3D AND 2D Ca_2Si

V.O. BOGORODZ, V.L. SHAPOSHNIKOV, A.B. FILONOV, B.S. KOLOSNICIN, D.B. MIGAS

Abstract

The results of theoretical research of band structures of Ca_2Si bulk and Ca_2Si thin films with surfaces (001), (010), (100) are presented. It's found that Ca_2Si bulk and thin film $\text{Ca}_2\text{Si}(010)$ and (100) are direct bandgap semiconductors while $\text{Ca}_2\text{Si}(001)$ thin films show the metallic properties because of surface's states.

Список литературы

1. *Maex K., Van Rossum M.* // Properties of metal silicides. 1995. P. 335.
2. *Borisenko V.E.* // Semiconducting silicides. 2000. P. 348.
3. *Heinrich A.* // Semiconducting silicides – thermoelectric properties and applications. 2000. P. 126–137.
4. *Leong D.N.* // Nature. 1997. Vol. 387, № 6634. P. 686–688.
5. *Eckerlin P., Wolfel E.* // Anorg. Chem. 1955. Vol. 280, № 5–6. P. 321–331.
6. *Ganguli A.K., Guloy A. M., Corbett J. D.* // Solid State Chem. 2000. Vol. 152. P. 474.
7. *Lebegue S., Arnaud B., Alouani M.* // Phys. Rev. B. 2005. Vol. 72. P. 085103.
8. *Dotsenko S.A.* // Physics Procedia. 2011. Vol. 11. P. 95.
9. *Migas D.B.* // Phys. Rev. B. 2003. Vol. 67, № 20. P. 205203 (7).
10. *Kresse G., Furthmüller J.* // Phys. Rev. B. 1996. Vol. 54, № 16. P. 11169–11186.
11. *Perdew J.P., Burke S., Ernzerhof M.* // Phys. Rev. Lett. 1996. Vol. 77. P. 3865.
12. *Blaha P., Schwarz K., Madsen G.K.H. et. al.* WIEN2k, An Augmented Plane WaVe + Local Orbitals Program for Calculating Crystal Properties. Austria, 2001.
13. *Tran F., Blaha P.* // Phys. Rev. Lett. 2009. Vol. 102. P. 226401.
14. *Tran F., Blaha P.* // Phys. Rev. B. 2011. Vol. 83. P. 235118.
15. *Wen C., Nonomura T., Kato A. et. al.* // Physics Procedia. 2011. Vol. 11. P. 106.

УДК 004.056.5

СИНТЕЗ РЕЧЕПОДОБНЫХ СИГНАЛОВ НА БЕЛОРУССКОМ ЯЗЫКЕ

Г.В. ДАВЫДОВ, В.А. ПОПОВ, А.В. ПОТАПОВИЧ, Е.Н. СЕЙТКУЛОВ*, И.В. САВЧЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

**Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева
Мирзояна, 2, Астана, Казахстан*

Поступила в редакцию 24 марта 2015

Проанализированы методы синтеза речеподобных сигналов по базе аллофонов. Обоснована актуальность разработки синтеза речеподобных сигналов на белорусском языке. Изложена методология формирования базы аллофонов на белорусском языке с учетом фонетических особенностей белорусского языка.

Ключевые слова: защита информации, маскирующие сигналы, речевая информация, речеподобные сигналы, база аллофонов, белорусский язык.

Введение

Речеподобные сигналы широко используются в телефонетрии для тестирования качества передачи речевой информации по линиям связи и в системах защиты речевой информации, в качестве одной из компонент комбинированных маскирующих речевых сигналов для защиты ее от утечки по акустическим каналам [1–5]. В соответствии с [1–3] для тестирования линий связи основные требования к речеподобным сигналам заключаются в наличии трех компонент: звонких вокализованных сигналов с имитацией свойств голоса; сигналов с постоянной спектральной плотностью мощности в частотной области; наличие паузы для обеспечения свойств, присущих сигналам с амплитудной модуляцией.

Речеподобные сигналы в последнее время широко применяются в качестве маскирующих сигналов для активных методов защиты речевой информации от утечки по акустическим каналам. При этом чаще всего используются комбинированные маскирующие сигналы, включающие «белый» шум и речеподобные сигналы. Соотношение между «белым» шумом и речеподобными сигналами устанавливается по уровням среднеквадратичного значения напряжения и лежит обычно в пределах 3–12 дБ [4].

Важным требованием к маскирующим сигналам является требование, чтобы они имели случайный характер, чтобы «белый» шум формировался за счет тепловых шумов полупроводниковых приборов или других видов физических шумов, а речеподобные сигналы формировались с использованием генератора случайных чисел, построенного на тепловых шумах. Эти требования обусловлены необходимостью исключения какой-либо возможности шумоочистки перехваченных акустических сигналов от маскирующих сигналов.

К речеподобным сигналам для систем защиты речевой информации дополнительно предъявляются требования, обусловленные характерными лингвистическими и фонетическими свойствами определенного языка и акустическими свойствами голоса определенного диктора. Лингвистические требования включают статистические данные о длине предложений, длине синтагм, длине слов, а также вероятности появления определенных фонем для определенного языка. Фонетические требования обусловлены необходимостью формирования речеподобных сигналов со спектральными характеристиками, не отличающимися от спектральных характеристик голоса диктора, речь которого необходимо защитить.

Методы синтеза речеподобных сигналов

Синтез речеподобных сигналов так же, как и синтез речи, может быть выполнен двумя основными методами. Первый метод – это синтез речи с использованием фонемного синтезатора, суть которого заключается в генерации фонем и дальнейшей компиляции из них слов и фраз.

Фонемный синтез содержит три основных этапа формирования речевого сигнала. На первом этапе выполняется перекодировка последовательности орфографических символов в последовательность кодов фонем; на втором рассчитывается набор акустических параметров формантных частот и полос частот, частоты основного тона и амплитуда вокализации. На третьем этапе формируется выходной речевой сигнал. Фонемный синтезатор не позволяет сформировать речевой сигнал с окраской и тембром, свойственным определенному диктору. Поэтому применение фонемного синтезатора для формирования речеподобных сигналов свойственных определенному диктору, не является эффективным с точки зрения защиты речевой информации маскирующими сигналами. Это обусловлено тем, что остаются различия в окраске и тембре речеподобных сигналов, сформированных фонемным синтезатором и информационным речевым сигналом определенного диктора.

Второй метод синтеза речеподобных сигналов – это компиляционный синтез, который основан на формировании речевого сигнала путем последовательного акустического воспроизведения единиц речевого сигнала, которые подготовлены заранее и сохраняются в памяти. Расстановка в определенной последовательности единиц речевого сигнала и их акустического воспроизведения являются основными этапами компиляционного синтеза речи. Метод является наиболее простым решением для достижения натуральности и естественности звучания речи [7]. К структурным единицам речи относятся аллофоны, дифоны, трифоны, полифоны, слоги, отдельные слова и словосочетания. Выбор структурной единицы речи для синтеза речи, с одной стороны, более просто вести по коротким сегментам с общим незначительным объемом памяти. Однако при этом имеет место большое количество переходов от одного фрагмента речи к другому, что может сказаться на качестве синтезируемой речи, если не применять сплайны. С другой стороны, при выборе в качестве структурных единиц речи более длинных по звучанию фрагментов, речь становится более естественной, однако необходимы при этом большие объемы памяти и большие базы структурных единиц речи, создание которых является трудоемким процессом. Поэтому для синтеза речеподобных сигналов предлагается использовать аллофоны в качестве структурной единицы речи, а по речевой базе аллофонов можно будет формировать речеподобные сигналы голосом определенного диктора.

Статистические характеристики белорусского языка

Синтез речеподобных сигналов на белорусском языке необходимо выполнять с учетом вероятностей длины предложений и длины слов в белорусском языке, а также вероятностей появления определенных аллофонов.

Распределение вероятностей длины предложений (числа слов в предложении) для белорусского языка является не определяющим параметром при синтезе речеподобных сигналов. Следует использовать при синтезе речеподобных сигналов длину синтагмы, на которые делится предложение (фраза) и количество фраз в фоноабзаце. Среднее число слов в предложении для белорусского языка составляет 10. Однако эти характеристики для каждого диктора могут быть свои. Поэтому следует использовать усредненные показатели. В табл. 1 представлены статистические характеристики белорусского языка.

Таблица 1. Статистические характеристики количества слов в синтагме для белорусского языка

Число слов в синтагме	1	2	3	4	5	6	7
Вероятность	0,05	0,10	0,30	0,25	0,15	0,10	0,05

Распределение вероятностей количества букв в слове для белорусского языка представлено в табл. 2.

Таблица 2. Распределение вероятностей количества букв в слове

Число букв в слове	1	2	3	4	5	6	7	8
Вероятность	0,103	0,126	0,103	0,108	0,130	0,128	0,115	0,077
Число букв в слове	9	10	11	12	13	14	15	
Вероятность	0,051	0,031	0,016	0,007	0,003	0,001	0,001	

Распределение вероятностей появления печатных знаков в тексте на белорусском языке представлено в табл. 3.

Таблица 3. Распределение вероятностей появления печатных знаков в тексте на белорусском языке

Аллофон	Вероятность	Аллофон	Вероятность	Аллофон	Вероятность
а	0,1642	м	0,0274	ч	0,0158
б	0,0211	н	0,0571	ш	0,0143
в	0,0287	о	0,0413	ы	0,0405
г	0,0198	п	0,0289	ь	0,0149
д	0,0339	р	0,0393	э	0,0076
е	0,0395	с	0,0404	ю	0,0055
ж	0,0085	т	0,0336	я	0,0376
з	0,0303	у	0,0338	ё	0,0065
й	0,0092	ф	0,0005	і	0,0508
к	0,0412	х	0,0125	ў	0,0257
л	0,0436	ц	0,0260		

Для формирования речеподобных последовательностей используется генератор псевдослучайных чисел, выполненный программно. По значениям, полученным от генератора псевдослучайных чисел, и с учетом распределения вероятностей длины предложений определяется длина первого предложения, т.е. число слов, входящих в состав предложения (или синтагмы). Далее с учетом значения следующего псевдослучайного числа определяется длина первого слова в предложении, т.е. число аллофонов в первом слове предложения. Это процесс повторяется, пока не будут получены значения длин слов для первого предложения. Далее по значениям последующего псевдослучайного числа и с учетом таблиц вероятностей появления аллофонов в русской речи находится соответствующий первый аллофон первого слова для первого предложения. После этого выполняется процесс нахождения всех аллофонов для первого предложения. Таким образом, формируется текст, который воспроизводится системой преобразования текста в речь по базе аллофонов и передается на звуковую карту компьютера.

При формировании текста для речеподобных последовательностей вводится ряд ограничений, таких как: не может быть в слове последовательно расположенных трех гласных и четырех согласных, не может быть слова, состоящего из двух и более только гласных и двух и более только согласных.

Кроме вероятностей появления аллофонов необходимо учитывать вероятности встречаемости звуков в начале слова. Вероятности встречаемости фонем и их сочетаний в начале слова не исследовались.

Расстановка ударений в словах выполняется с учетом номера слога и числа слогов в слове по правилу, представленному в табл. 4.

Таблица 4. Правило расстановки ударного слога в слове

Число слогов в слове	1	2	3	4	5	6	7
№ ударного слога	1	2	2	3	3	4	5

Распределение вероятностей встречаемости гласных ударных фонем в середине слова представлены в табл. 5.

Таблица 5. Распределение вероятностей встречаемости гласных ударных фонем в середине слова

Фонема	А	Е	Ё	И	О	У	Ы	Э	Ю	Я
Вероятность	0,325	0,196	0,013	0,143	0,146	0,070	0,061	0,012	0,006	0,028

Фонетические особенности белорусского языка

Основной особенностью белорусского языка, в отличие от русского, является его напевность, более продолжительное звучание гласных и согласных фонем, отсутствие напряженности при звукообразовании, сильное смягчение. В белорусском языке отсутствует мягкая и твердая фонема **Г**, вместо нее используется мягкая и твердая фонема **Гх**. В белорусском языке отсутствуют мягкие согласные фонемы **Д, Р, Т, Ш, Щ, Ч**. В отличие от русского языка, в белорусском языке имеются фонемы **Ў** (у короткое), мягкая **Ц**, твердая **Ч**. Отличительной особенностью белорусского языка является свободный, без напряжения, проход воздуха через артикуляционный аппарат при произношении гласных звуков. В фонетическом аспекте ударный слог характеризуется более продолжительным звучанием и более высоким уровнем создаваемого звукового давления по сравнению с таким же безударным слогом. Поэтому при формировании базы аллофонов необходимо использовать связный текст, из которого путем сегментации речи на аллофоны создается акустическая база.

Формирование базы аллофонов белорусского языка

Аллофоны необходимо классифицировать по фонетическим особенностям таким образом, чтобы учитывались фонетические особенности предыдущего и последующего аллофонов, т.е. его окружение. Это связано с тем, что звучание аллофонов определяется переходом формы речевого аппарата из одного положения в другое. Состояние речевого аппарата при произношении изменяется и это является динамическим процессом. Поэтому весьма важно при формировании базы аллофонов классифицировать их с учетом изменения формы речевого аппарата, что принято называть артикуляцией.

Аллофоны белорусского языка можно разделить на вокализованные (тоновые), шумовые и тоново-шумовые. Тоновые аллофоны это гласные **А, Е, О, У, Ы, І**. Они характеризуются открытым положением речевого аппарата при их произношении, а спектр имеет ярко выраженные частоты основного тона и форманты. Согласные звуки **Б, П, Т, Д, К, Г** образуются при коротком движении воздуха и их нельзя протяжно произнести, не прибавив к ним гласный. Кроме того, при произношении гласных фонем необходимо в первую очередь учитывать артикуляцию губ и языка и степень открытия рта.

Аллофоны согласных фонем делятся на твердые и мягкие, а по акустическим характеристикам и спектру делятся на шумные **Б, Г, Д, З, Ж, К, П, С, Ц, Х, Т, Ш, Ч, А** и сонорные **В, Ў, Л, М, Н, Ё**, в которых вокализованность фонемы превышает шумность.

Создание баз аллофонов для славянских языков рассматривается в работе [8], в которой указывается, что теоретически минимальная база аллофонов для русского и белорусского языков составляет 420, а для польского 535. На практике эти данные являются завышенными из-за того, что очень многие позиционные и комбинаторные ситуации вообще не встречаются в речи, и для ряда аллофонов акустические различия настолько невелики, что этими различиями можно пренебречь.

Для синтеза речеподобных сигналов на белорусском языке предложена база из 476 аллофонов, обозначение которых по принципу согласуется с обозначениями, предложенными Б.М. Лобановым [8]. Обозначение аллофонов состоит из названия аллофона и цифрового кода из трех позиций, например **a101**. Это означает, что в wav-файле записан аллофон **a**, безударный, окружение слева отсутствует, а справа перед фонемами **г, г', д, з, з', ж, ж', к, к', л, л', н, н', р, с, с', ц, ц', х, х', т, ш, й, ч, дз, дз', дж, дж'**. Верхний индекс [**'**] означает, что согласный мягкий. Если первый цифровой индекс после названия гласного аллофона **0**, то это означает, что гласный аллофон является безударным. Если же первый цифровой индекс после названия гласного аллофона **1**, то это означает, что гласный аллофон ударный. Для согласных аллофонов первый цифровой индекс **1** означает, что согласный аллофон твердый. Если первый цифровой индекс для согласного аллофона **2**, то это означает, что согласный аллофон мягкий.

Второй индекс аллофона характеризует его окружение слева. Если второй индекс **0**, то это означает, что окружение слева отсутствует, т.е. с этого аллофона начинается новое слово. Если второй индекс **1**, то слева ему предшествует гласная фонема. Если второй индекс **2**, то слева ему предшествует согласная фонема.

Третий индекс аллофона характеризует его окружение справа. Если третий индекс в обозначении аллофона **0**, то это означает, что окружение аллофона справа отсутствует, т.е. этим аллофоном заканчивается слово. Если третий индекс **1**, то справа за ним следует гласная фонема. Если третий индекс **2**, то справа за ним следует согласная фонема.

При синтезе белорусской речи по базе аллофонов некоторые трудности возникают при появлении в тексте мягкого знака. Для исключения этой трудности было предложено ввести в базу аллофонов согласные смягченные мягким знаком, такие как **Ць, Ль, Нь, Зь, Сь, Дзь**.

В соответствии с принятым обозначением перечень аллофонов для формирования речеподобных сигналов на белорусском языке приведен в табл. 6.

Таблица 6. Перечень аллофонов белорусского языка

a000	в212	з220	я020	ю010	л221	о111	у000	ц101	ш120	дж110
a001	в220	з221	я021	ю011	л222	о112	у001	ц102	ш121	дж111
a002	в221	з222	я022	ю012	м101	о120	у002	ц110	ш122	дж112
a010	в222	ж101	я101	ю020	м102	о121	у010	ц111	ч101	дж120
a011	ѣ100	ж102	я102	ю021	м110	о122	у011	ц112	ч102	дж121
a012	ѣ110	ж110	я110	ю022	м111	п101	у012	ц120	ч110	дж122
a020	ѣ112	ж111	я111	ю101	м112	п102	у020	ц121	ч111	дж201
a021	г101	ж112	я112	ю102	м120	п110	у021	ц122	ч112	дж202
a022	г102	ж120	я120	ю110	м121	п111	у022	ц201	ч120	дж210
a101	г110	ж121	я121	ю111	м122	п112	у101	ц202	ч121	дж211
a102	г111	ж122	я122	ю112	м201	п120	у102	ц210	ч122	дж212
a110	г112	ж201	е001	ю120	м202	п121	у110	ц211	ф101	дж220
a111	г120	ж202	е002	ю121	м210	п122	у111	ц212	ф102	дж221
a112	г121	ж210	е010	ю122	м211	п201	у112	ц220	ф110	дж222
a120	г122	ж211	е011	к100	м212	п202	у120	ц221	ф111	ць210
a121	г201	ж212	е012	к101	м220	п210	у121	ц222	ф112	ць212
a122	г202	ж220	е020	к102	м221	п211	у122	х101	ф120	ль210
б101	г210	ж221	е021	к110	м222	п212	э001	х102	ф121	ль212
б102	г211	ж222	е022	к111	н101	п220	э002	х110	ф122	нь210
б110	г212	і000	е101	к112	н102	п221	э010	х111	ф201	нь212
б111	г220	і001	е102	к120	н110	п222	э011	х112	ф202	зь210
б112	г221	і002	е110	к121	н111	р101	э012	х120	ф210	зь212
б120	г222	і010	е111	к122	н112	р102	э020	х121	ф211	сь210
б121	д101	і011	е112	к201	н120	р110	э021	х122	ф212	сь212
б122	д102	і012	е120	к202	н121	р111	э022	х201	ф220	дзь210
б201	д110	і020	е121	к210	н122	р112	э101	х202	ф221	дзь212
б202	д111	і021	е122	к211	н201	р120	э102	х210	ф222	
б210	д112	і022	ё001	к212	н202	р121	э110	х211	дз101	
б211	д120	і101	ё002	к220	н210	р122	э111	х212	дз102	
б212	д121	і102	ё010	к221	н211	с101	э112	х220	дз110	
б220	д122	і110	ё011	к222	н212	с102	э120	х221	дз111	
б221	з100	і111	ё012	л101	н220	с110	э121	х222	дз112	
б222	з101	і112	ё020	л102	н221	с111	э122	т101	дз120	
в101	з102	і120	ё021	л110	н222	с112	ы010	т102	дз121	
в102	з110	і121	ё022	л111	о001	с120	ы011	т110	дз122	
в110	з111	і122	ё101	л112	о002	с121	ы012	т111	дз201	
в111	з112	й120	ё102	л120	о010	с122	ы020	т112	дз202	
в112	з120	й121	ё110	л121	о011	с201	ы021	т120	дз210	
в120	з121	й122	ё111	л122	о012	с202	ы022	т121	дз211	
в121	з122	я000	ё112	л201	о020	с210	ы110	т122	дз212	
в122	з201	я001	ё120	л202	о021	с211	ы111	ш101	дз220	
в201	з202	я002	ё121	л210	о022	с212	ы112	ш102	дз221	
в202	з210	я010	ё122	л211	о101	с220	ы120	ш110	дз222	
в210	з211	я011	ю001	л212	о102	с221	ы121	ш111	дж101	
в211	з212	я012	ю002	л220	о110	с222	ы122	ш112	дж102	

Синтез текста для речеподобных сигналов на белорусском языке и его лингвистический анализ

Для синтеза текста для речеподобных сигналов на белорусском языке необходимо учитывать статистические характеристики белорусского языка, приведенные в таблицах выше. При этом сформированный текст речеподобных сигналов должен быть подвергнут лингвистическому анализу.

Лингвистический анализ текста речеподобных сигналов проводится с целью исключения из текста элементов речи, не характерных для белорусского языка. Слова с одной буквой могут состоять только из букв **А, З, І, К, У, Ў, Я**. Слова из трех букв должны содержать хотя бы одну гласную. В белорусском языке отсутствуют сочетания букв **СЧ, ЧІ, ЧЕ, ЧЯ, ТІ, ТЕ, ТЯ ДІ, ДЯ, ДЕ, РІ, РЕ, РЯ, ШІ, ШЕ, ШЯ**. Слова не могут начинаться с буквы **Ы**. Гласный **Ы** пишется после твердых согласных. **Ў** может появляться в тексте только после гласной, как в слове, так и после окончания предыдущего слова, оканчивающегося на гласную. Если в сформированном тексте речеподобных сигналов после гласной следует **У**, то ее следует заменить на **Ў**. Гласный **І** пишется после мягких согласных и в начале слова.

Заклучение

Синтез речеподобных сигналов на белорусском языке основан на статистических характеристиках текстов (длительности слов, вероятностей появления букв в тексте) на белорусском языке и преобразовании его в речеподобные сигналы с использованием базы аллофонов.

Работа выполнена при финансовой поддержке КН МОН РК грант 0027/ПЦФ-14-ОТ и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований проект Ф14КАЗ-020.

SYNTHESIS OF SPEECH-LIKE SIGNALS IN THE BELARUSIAN LANGUAGE

H.V. DAVYDAU, V.A. PAPOU, A.V. POTAPOVICH, Y.N. SEITKULOV, I.V. SAVCHENKO

Abstract

The methods of synthesis of speech-like signal on the basis of allophones are analyzed. The development urgency of speech-like signals synthesis in the Belarusian language is grounded. The methodology of forming the base of allophones in the Belarusian language with the phonetic features of the Belarusian language is described.

Список литературы

1. ITU-T P.501 Test signals for use in telephony/ Series P: Telephone Transmission Quality. Objective measuring apparatus. P.27.
2. ETSI 3rd Speech Quality Test Event. Anonymized Test Report «IP Phones». P. 81.
3. ITU-T P.50 Artificial voice/ Series P: Telephone Transmission Quality, Telephone installations, Local line networks. Objective measuring apparatus. P.14.
4. Воробьев В.И., Давыдов А.Г., Давыдов Г.В., Ивонин А.И., Лещенко Д.В., Лобанов Б.М., Лыньков Л.М., Попов В.А., Потапович А.В. Устройство защиты речевой информации от утечки по вибрационным и акустическим каналам / Патент РБ № 3053.
5. Воробьев В.И., Давыдов А.Г., Давыдов Г.В. // Докл. БГУИР. 2009. № 3 (41). С. 9–16.
6. Сейткулов Е.Н., Давыдов Г.В., Потапович А.В. // Вест. КазНТУ. 2014. № 2 (102).
7. Киселев В.В., Лобанов Б.М. // Докл. БГУИР. 2004. №4. С. 138–142.
8. Фонетико-акустическая база данных для многоязычного синтеза речи по тексту на славянских языках. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dialog-21.ru/digests/dialog2006/materials/html/Lobanov.htm>. – Дата доступа: 24.03.2015.

УДК 004.932.75'1

ПОСТРОЕНИЕ УНИВЕРСАЛЬНЫХ КЛАССИФИКАТОРОВ ТЕКСТОВЫХ ОБРАЗОВ РУССКОГО ЯЗЫКА НА БАЗЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОСЕТЕЙ

Н.Н. КУЗЬМИЦКИЙ

Брестский государственный технический университет
ул. Московская, 267, Брест, 224017, Беларусь

Поступила в редакцию 30 марта 2015

Представлена методика построения универсальных классификаторов текстовых образов, основанная на трехуровневом комитете сверточных нейросетей, генерации и учете специфических особенностей начертания образов, зависящих от способов их синтеза. Эффективность методики подтверждена созданием классификаторов символов русского языка, точность которых превышает уровень ведущего коммерческого аналога при распознавании образов представительной базы, созданной в ходе проведения исследования.

Ключевые слова: распознавание образов, сверточная нейронная сеть, обучение, комитет, универсальность, способ синтеза, генерация, база.

Введение

Многие практические системы автоматической обработки текстовых данных сталкиваются с необходимостью распознавания образов, отличающихся как по стилю начертания, так и по способу синтеза: системы обработки банковских документов (договоров, квитанций), почтовой корреспонденции, заявлений, опросных бланков и др. (примеры представлены на рис. 1). Особенности стиля (наклон, размер и др.) могут быть в значительной мере нивелированы удачным выбором признаков, инвариантных к простым пространственным искажениям. Однако адаптивный подбор пороговых коэффициентов при существенном искажении образа может быть серьезно затруднен. Преимуществом классификаторов на основе сверточных нейросетей (СНС) [1], является автоматическая настройка фильтров, извлекающих высокоуровневые признаки входного сигнала путем чередования этапов свертки и подвыборки по аналогии с функционированием зрительной системы млекопитающих. Гораздо более сложной задачей является преодоление «проблемы хрупкости» классификаторов, основанных на методах машинного обучения, заключающейся в падении точности при распознавании образов с отличным от их тренировочных способом синтеза (шрифтовых, рукописных и др.), что в равной мере справедливо и по отношению к СНС [2].

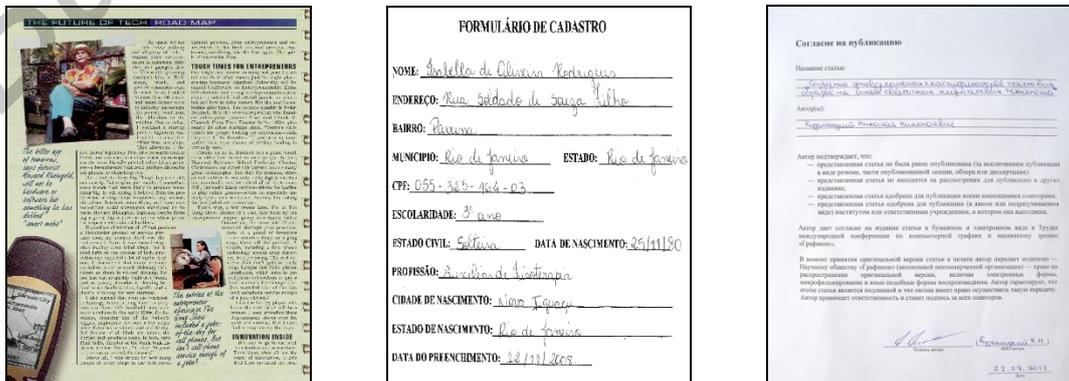


Рис. 1. Примеры изображений, содержащих текстовые образы различного способа синтеза

Обзор литературы по теме исследования

Обзор литературы выявил недостаток комплексных исследований в данной области, связанный с распространенной как в научной, так и коммерческой сферах убежденностью в неактуальности тематики, ввиду ее давнего и успешного разрешения. Вместе с тем немаловажным фактором также является объективная сложность задач обработки применительно к текстовым образам русского алфавита (в частности, исследуемого распознавания). Данный вывод не относится к области OCR (optical character recognition, оптическое распознавание образов), основанной на обработке печатного текста, и представленной успешно зарекомендовавшими себя в реальных приложениях программными продуктами [3]. Но, в перечисленных выше приложениях приходится иметь дело с гораздо менее эталонными и стилистически разобщенными рукопечатными и рукописными образами, распознавание которых традиционными в OCR шаблонными методами неэффективно.

В частности, в [4] авторы, используя линейный дискриминантный анализ, метод главных компонент и признаки в виде дескрипторов функций длины хорды, получили среднюю ошибку распознавания рукописных и печатных символов русского языка на уровне 15 %. При этом в работе не был указан объем выборок и используемое число классов. Авторы [5] предложили структурно-признаковый метод, основанный на скелетизации символа и его разбиение на блоки. Точность распознавания 1600 примеров (50 образов для каждого класса) составила 96 %, однако исследовались только рукопечатные заглавные символы, объединенные в 30 классов. В [6] был представлен подход на основе нейросетей типа неокогнитрон. Тестовая выборка также была составлена из набора рукопечатных заглавных символов русского алфавита (исключая символы 'Й', 'Ё', 'Щ', 'Ъ') и арабских цифр. Использовалось по 100 примеров каждого класса, общий объем базы – 3900 примеров, точность распознавания достигла уровня 91,5 %.

Анализ существующей литературы позволил определить следующие проблемы:

- 1) исследования проводились либо на не декларируемом множестве образов, либо на выборках, объем которых недостаточен для объективной характеристики методов;
- 2) в рассмотренных подходах анализу подвергались только выборки заглавных символов русского языка, число классов в которых отличалось от исходных 33-х, рукописные и прописные символы в неустановленном количестве применялись лишь в [4];
- 3) эффективность представленных в работах классификаторов не достаточна для их применения в распознавании текстовых образов, произвольного способа синтеза.

Таким образом, задача создания универсальных классификаторов текстовых образов русского языка является весьма актуальной. Сверточные нейронные сети, успешно зарекомендовавшие себя в классификации цифр и заглавных символов английского языка [2], представляются перспективной альтернативой походам с эвристическим подбором признаков и шаблонным сравнением с эталонами. Однако для исследования их эффективности в рассматриваемой задаче необходима представительная база образов различного типа.

Формирование базы образов символов русского языка

В связи с отсутствием общедоступных баз русскоязычных образов возникла необходимость создания подобной базы. При этом для исследования универсальности представители классов должны быть однозначно классифицируемы и являться различными по способу синтеза. Так в качестве источника печатных образов выступили шрифты операционных систем Windows, а также нескольких графических редакторов. Всего было собрано около 3000 файлов шрифтов ttf-формата, из которых удалены схожие по начертанию, а также чрезмерно художественные, не применяемые в реальных приложениях, итоговое число использованных шрифтов составило 205.

Для сбора рукопечатных и рукописных образов была разработана модель формы, представленная на рис. 2, предназначенная для индивидуального заполнения респондентами. Форма включает блоки для ввода регистрационных данных, обособленных образов цифр, заглавных и прописных символов русского языка, а также их последовательностей (слов). Использование последних обусловлено стремлением к получению максимально разнообразной выборки, учитывая, что обособленные и слитные символы могут значительно отличаться.

Фамилия	Факультет (абр.)	Пол (м/ж)	Введите арифметические выражения печатным шрифтом														
А			10 + 256 34 / 935 780 - 21 405 * 69														
Введите цифры печатным шрифтом			Введите арифметические выражения прописью														
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 + 256 34 / 935 780 - 21 405 * 69							
Введите цифры прописью ("от руки")			Введите слова заглавными буквами печатным шрифтом														
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	ШЕФ ВЗЪЯРЕН ТЧК ШИПЦЫ С ЭХОМ ГУДЕБАЙ ЖУЛЬ							
ПИСАТЬ ТОЛЬКО ВНУТРИ ЯЧЕЕК. ВНУТРЕННИЕ И ВНЕШНИЕ ГРАНИЦЫ НЕ ЗАДЕВАТЬ!!!			ЭКС-ГРАФ ПЛЮШ ИЗЪЯТ БЬЕМ ЧУЖДЫЙ ЦЕН ХВОЩ														
Введите заглавные буквы печатным шрифтом			ЭХ ЧУЖАК ОБЩИЙ СЪЕМ ЦЕН ШЛЯП ЮФТЬ ВДРЫЗГ														
А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	Й	К	Л	М	Н	О	П	Р	Введите слова заглавными буквами прописью
С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Ъ	Ы	Ь	Э	Ю	Я	ШЕФ ВЗЪЯРЕН ТЧК ШИПЦЫ С ЭХОМ ГУДЕБАЙ ЖУЛЬ		
Введите заглавные буквы прописью			ЭКС-ГРАФ ПЛЮШ ИЗЪЯТ БЬЕМ ЧУЖДЫЙ ЦЕН ХВОЩ														
А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И	Й	К	Л	М	Н	О	П	Р	ЭХ ЧУЖАК ОБЩИЙ СЪЕМ ЦЕН ШЛЯП ЮФТЬ ВДРЫЗГ
С	Т	У	Ф	Х	Ц	Ч	Ш	Щ	Ъ	Ы	Ь	Э	Ю	Я	Введите слова строчными буквами прописью		
Введите строчные буквы прописью			шеф взъярен тчк шипцы с эхом гудебай жюль														
а	б	в	г	д	е	ж	з	и	й	к	л	м	н	о	п	р	экс-граф плюш изъят бьем чуждый цен хвощ
с	т	у	ф	х	ц	ч	ш	щ	ъ	ы	ь	э	ю	я	эх чужак общий съем цен шляп юфть взрызг		
Введите строчные буквы прописью			шеф взъярен тчк шипцы с эхом гудебай жюль														
а	б	в	г	д	е	ж	з	и	й	к	л	м	н	о	п	р	экс-граф плюш изъят бьем чуждый цен хвощ
с	т	у	ф	х	ц	ч	ш	щ	ъ	ы	ь	э	ю	я	эх чужак общий съем цен шляп юфть взрызг		

Рис. 2. Фрагменты изображения формы, используемой для создания базы: блоки для ввода регистрационных данных (а), обособленных текстовых образов (б) и их последовательностей (в)

Процесс обработки одной формы включал следующие этапы:

- 1) синтез изображения формы, например, с помощью сканера;
- 2) выделение блоков с веденными респондентами данными;
- 3) сегментация слов на отдельные образы, с «ручной» проверкой качества.

Для реализации второго этапа был использован следующий алгоритм:

1) форма приводится к строго вертикальной ориентации: изображение формы бинаризуется (например, с помощью метода Оtsu); выделяется самый крупный связный сегмент (каркас); выполняется его поворот на оптимальный угол;

2) фоновые регионы, ограниченные каркасом формы, группируются в строки, для этого: регионы сортируются в порядке сверху вниз; рассчитывается величина пересечения каждого с текущими строками; регион добавляется к той строке, с которой имеет максимальное пересечение по вертикали (минимальное – 50 %) либо инициирует новую строку;

3) в цикле выполняется анализ каждой строки: если число ее регионов (ячеек) больше, чем предусмотрено моделью, происходит объединение наиболее подходящих (размер которых минимален), при этом удаляются внутренние «отростки» границы ячеек (фрагменты символов, восьмисвязные с нею) с целью приведения их формы близкой к выпуклому четырехугольнику.

В рамках описываемого исследования было собрано 250 образцов форм, заполненных студентами Брестского государственного технического университета (БрГТУ). Номинальное число образов полученной базы составило: цифры – по 750 для каждого класса (всего 7500), заглавных букв – по 2000 (всего 66000), прописных – по 1000 (всего 33000), итого 106500. Отметим, что реальное число образов по классам несколько отличалось от номинального ввиду ошибок, допущенных респондентами: пропуск символов, нарушение регистра, вписывание вместо требуемого иного символа, невозможность однозначного распознавания образа.

Методика построения универсальных классификаторов текстовых образов

В исследовании рассматривалась задача распознавания символов произвольного типа (печатные, рукопечатные и рукописные) полного алфавита (заглавные и прописные) русского языка, для которого более весомым фактором, по сравнению, например, с английским, является значительное отличие образов в рамках одного класса (рис. 3, а). Это привело к необходимости расширения количества классов до числа их принципиально разных представлений. Существует также и противоположная проблема – малое отличие образов некоторых классов (рис. 3, б), которая решалась путем их объединения в одном. Проведенная перегруппировка позволила сформировать 32 класса для заглавных букв и 28 – прописных. Отметим ее важность для сверточной нейросети, используемой в качестве основной модели классификаторов. Похожие образы разных классов, как и чрезмерно отличные одного, могут негативно повлиять на обучение: увеличить его продолжительность, потребовать расширения архитектуры сети.



Рис. 3. Примеры образов русского языка с разным начертанием в пределах класса (а), низким уровнем межклассового отличия (б), отличным начертанием в пределах класса (в)

Для проведения экспериментальной работы в базе необходимо выделить обучающее и контрольное множество, сохранив уникальность образов в каждой. Очевидным являлось ее разделение на две половины по 125 форм каждая, в результате размер обучающего для заглавных букв составил 33000, прописных – 16500 (для контрольного аналогично). Однако полученного объема множеств недостаточно для создания СНС-архитектуры LeNet-5 [1]. Вариант их расширения за счет контрольных не рассматривался, т.к. последние нужны для объективного анализа свойств классификаторов. При этом во множествах необходимо обеспечить одинаковое представительство классов, включая их отличные представления (подклассов) (рис. 3, в), т.к. нарушение баланса представительства может снизить обобщающие способности сети (например, объединенный класс символов 'Е''Ё' имеет четыре варианта начертания). Для достижения баланса была применена генерация, позволяющая на основе волновых искажений и поворотов в диапазоне $\pm 10^\circ$ из примеров обучающей части базы и печатных шрифтов синтезировать новые прообразы. Каждый подкласс в равной мере участвовал в синтезе прообразов, центрированных в изображении размером 32×32 пикселя, а минимальный уровень их попарного различия составил 25 %. Число генерируемых прообразов определялось с учетом возможности обучения нейросетей на стандартном оборудовании, в результате их число для каждого класса заглавных букв составило 2520, прописных – 2880.

Расширенное с помощью генерации обучающее множество необходимо разделить на тренировочную и тестовую выборки: образы сортировались в порядке уменьшения их среднего отличия от других в классе, каждый шестой попадал в тестовую. В результате для заглавных и прописных размер тренировочной части составил 67200, тестовой – 13440. Создание классификаторов на их основе проводилось по схеме «регулярное масштабирование + селекция», описанной в [2]. В результате для заглавных был построен комитет с усредняющим голосованием, СНС в котором обучались на образах размеров: $(h = 20, 24, w/h)$, $(h = 20, w = 10)$, $(w = 20, w/h)$ (для прописных аналогично). Для каждой сети выполнялась регенерация тренировочной и тестовой выборки с профильным для нее размером образов. Средняя точность СНС на их тренировочных частях была на уровне 97,91 %, тестовых – 97,59 %.

В связи с тем, что в созданных сетях использовались классы, объединяющие несколько исходных (например, 'З''Э'), комитеты необходимо было дополнить соответствующими «составными» СНС. Создание выборок для их обучения выполнялось аналогично многоклассовым: для одного класса генерировалось 12000 образов с минимальным отличием в 20 %, которые также разделялись на тренировочную и тестовую части в соотношении 1:6. В результате были построены 11 СНС для следующих пар символов: 'З''Э', 'Г''Т', 'Е''Ё', 'И''Й', 'Ш''Щ', 'Б''Ь', 'Л''П', 'б''д', 'е''ё', 'г''ч', 'и''й'. Их средняя точность на тренировочных множествах была на уровне 99,25 %, тестовых – 99,11 %. Полученные классификаторы являлись комитетами из многоклассовых СНС, объединенных в подкомитете, и составных, применяемых при выборе в качестве ответа метки объединенного класса (схема использования приведена на рис. 4).

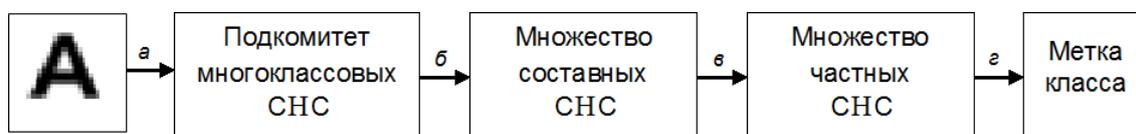


Рис. 4. Схема применения классификатора текстовых образов: предобработка (а), расчет начальной метки (б), ее корректировка для объединенного класса (в), выбор итоговой из меток похожих классов (z)

В табл. 1 представлена точность созданных классификаторов (COM1_RUS_big, COM1_RUS_lit) и ведущего коммерческого аналога [7], полученная при оптимальных значениях его параметров. В экспериментах использовались множества, содержащие в равной мере образы 33 символов алфавита (за исключением Rus_font): Rus_gen – сгенерировано из обучающей части базы, содержит 82500 примеров; Rus_cell/Rus_word – подмножества образов, обособленных ячейками/сегментированных из слов форм контрольной части, содержащие по 11000/22000 заглавных (5500/11000 прописных).

Таблица 1. Точность (в %) классификаторов заглавных (big) и прописных (lit) образов русского языка

Классификатор	Rus_big_font	Rus_big_cell	Rus_big_gen	Rus_big_word
COM1_RUS_big	99,07	97,56	96,51	95,85
COM2_RUS_big	99,26	98,11	97,64	96,37
ABBYY FlexiCapture 10	94,81	89,08	88,75	75,21
	Rus_lit_font	Rus_lit_cell	Rus_lit_gen	Rus_lit_word
COM1_RUS_lit	99,10	92,29	93,72	91,03
COM2_RUS_lit	99,30	95,25	94,95	92,75
ABBYY FlexiCapture 10	87,62	82,05	79,38	77,34

Данные таблицы позволили сделать следующие выводы:

- 1) имеется зависимость увеличения сложности распознавания от типа образов в порядке: машинописные, рукопечатные, синтезированные, рукописные;
- 2) прописные символы обладают большей вариативностью начертания, в результате качество их распознавания было ниже чем заглавных в среднем на 4,1 %;
- 3) средняя точность созданных классификаторов была выше уровня коммерческого на 10,30 % и 12,44 %, что продемонстрировало их большую универсальность.

Детальное изучение ошибок на множествах Rus_big_gen, Rus_lit_gen показало, что их значительная часть была допущена при перекрестном распознавании пар классов, похожих по начертанию: 'А'/Д', 'У'/Ч', 'И'/Н', 'п'/р', 'в'/ь', 'т'/м'. Для таких пар целесообразным являлось создание "частных" СНС, обучение которых проводилось по аналогии с составными. В результате были сформированы классификаторы COM2_RUS_big, COM2_RUS_lit, состоящие из многоклассового подкомитета, составных и частных сетей, применяемых по схеме, приведенной на рис. 4. Их тестирование (табл. 1) показало увеличение точности распознавания, что подтверждает эффективность частных сетей, как экспертов на узком подмножестве классов. При этом предложенная структура классификаторов является весьма гибкой и может быть в случае необходимости дополнена членами на любом из трех уровней.

В последней части исследования рассматривалась задача создания классификатора полного алфавита русского языка. Отметим, что подобные классификаторы в ряде приложений являются более актуальными, чем зависящие от регистра. В частности, основная масса печатных шрифтов содержит как прописные, так и заглавные образы в их традиционном представлении. Кроме того, респонденты при заполнении форм, подобных используемой в исследовании для создания базы, даже при наличии требования к соблюдению регистра поля зачастую ненамеренно нарушают его из-за естественных особенностей почерка.

Имея классификаторы заглавных и прописных символов, очевидной являлась попытка создания классификатора полного алфавита путем интеграции их знаний. В частности, был построен комитет COM1_RUS_all, объединяющий COM2_RUS_big и COM2_RUS_lit, ввиду отличия используемых ими классов образов, по схеме MAX (итоговым является решение наиболее уверенного). Результаты тестирования полученного комитета, представленные в табл. 2, продемонстрировали снижение точности по сравнению с классификаторами, зависящими от регистра. Детальный анализ ошибок позволил выявить следующую проблему: комитет заглавных зачастую обладает большей уверенностью при распознавании прописных образов, не используемых в ходе его обучения (и наоборот). Причиной является как близость начертания некоторых классов, например, 'в'\B', так и стремление нейросети отнести любой входной образ к одному из известных ей.

Возможными вариантами решения проблемы являлись:

- 1) создание для сетей дополнительного класса, в который относились все отрицательные примеры (например, для заглавной класс с прописными);

- 2) разделение классов на группы по какому-либо признаку образов, например, ширине, наличию углов, «дыр» и др., исключающему перекрестные ошибки;
- 3) формирование общего алфавита из заглавных и прописных классов.

Таблица 2. Точность (в %) классификаторов полного алфавита русского языка

Классификатор	Rus_big_font	Rus_big_cell	Rus_big_gen	Rus_big_word
COM1_RUS_all	98,67	97,74	97,03	95,01
COM2_RUS_all	99,04	97,77	97,29	95,17
ABBYY FlexiCapture 10	94,032	88,36	88,48	84,19
	Rus_lit_font	Rus_lit_cell	Rus_lit_gen	Rus_lit_word
COM1_RUS_all	95,90	93,54	92,36	90,87
COM2_RUS_all	98,84	94,62	94,22	92,10
ABBYY FlexiCapture 10	86,05	81,65	76,69	74,98

Первый подход не принес ожидаемого результата, т.к. при обучении сеть не могла настроить признаки, позволяющие относить к одному классу образы с существенно отличным начертанием. Второй столкнулся с большим числом перекрестных ошибок групповых сетей, объединяемых по схеме MAX, из-за несовершенства ручного подбора разделяющих признаков. В рамках третьего была исследована возможность создания алфавита с укрупненным до 24, 30 классами, например, 'УЧУЦ', однако это также не принесло положительного эффекта.

В результате были собраны вместе все 43 заглавных и прописных класса, использованных ранее (рис. 5). При этом были объединены классы с одинаковым начертанием образов в обоих регистрах (например, 'ж'/'Ж'), а также сформирован новый из похожих символов 'П'/'п'/'Л'. Создание итогового классификатора также проводилось по схеме «регулярное масштабирование + селекция», для обучения сетей генерировались тренировочные и тестовые выборки объемом 75250 и 15050 примеров соответственно. Сформированный классификатор (COM2_RUS_all) имел структуру, аналогичную предыдущим, включающую: многоклассовый подкомитет, обученный на образах размеров: ($h = 18, 20, 22, w/h$), ($h = 20, w = 14$), ($w = 18, w/h$), а также составные и частные СНС, созданные ранее. Результаты его тестирования, отраженные в табл. 2, позволили сделать следующие выводы:

- 1) точность распознавания COM2_RUS_all превышала COM1_RUS_all в среднем на 1 %, что доказало преимущество применения общего алфавита образов;
- 2) небольшое снижение качества классификатора, по сравнению с COM2_RUS_big / COM2_RUS_lit, на 0,52 % для заглавных и 0,62 % – для прописных, продемонстрировало актуальность подробного анализа различных графических представлений образов;
- 3) средняя точность COM2_RUS_all для заглавных и прописных выборок (97,31 % и 94,95 %) превышала уровень коммерческого на 8,55 % и 15,10 %, что подтвердило большую универсальность его характеристик.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14		
А А	а а	Б Б	б б	В В	в в	Г Г	г г	Д Д	д д	Е Е	е е	Ж Ж	ж ж		
15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
з з	э э	й й	и и	й й	к к	л л	м м	н н	о о	п п	л л	р р	р р	р р	
30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43		
с с	л л	т т	у у	у у	ф ф	х х	ц ц	ч ч	ш ш	щ щ	ъ ъ	ь ь	ы ы	ю ю	я я

Рис. 5. Множество классов, используемых классификатором полного алфавита русского языка

Таким образом, трехуровневая архитектура классификаторов доказала свою работоспособность в решении задач распознавания. При этом эффективность применения созданных на ее основе классификаторов может быть увеличена за счет использования контекстной информации (интеллектуальных словарей). Обобщив описанные исследования можно сформулировать методику построения универсальных классификаторов текстовых образов, включающую следующие этапы.

1. Систематизация множества образов:
 - классификация образов по способам синтеза существенных для текущей задачи;
 - расширение количества классов до числа принципиально различных представлений;
 - объединение классов с низким уровнем межгруппового отличия.
2. Формирование тренировочных и тестирующих выборок:

- обеспечение равного представительства вариантов начертания и способов синтеза;
 - контроль минимального уровня отличия образов в классах;
 - расширение объемов выборок до требуемых с помощью процедуры генерации.
3. Создание классификатора в виде комитета сверточных нейросетей:
- формирование по схеме «регулярное масштабирование + селекция» подкомитета многоклассовых СНС, применяемого для расчета начальной метки класса входного образа;
 - построение «составных» СНС, используемых при выборе подкомитетом метки класса, объединяющего несколько исходных текущего алфавита;
 - определение на валидационной выборке классов с наибольшим числом перекрестных ошибок и создание «частных» СНС, применяемых в качестве корректоров итоговых решений.

Заключение

Исследована проблема универсальности распознавания на примере русскоязычных текстовых образов, для которых выполнен анализ множества графических представлений, выполнена перегруппировка классов. Создана модель формы и алгоритм ее автоматической обработки, с помощью которых собрана представительная база рукопечатных и рукописных графических образов русского языка, в объеме более 100000 примеров. Разработана методика построения универсальных классификаторов текстовых образов, эффективность которой подтверждена формированием классификаторов полного алфавита и зависимых от регистра, средняя точность которых превышает уровень коммерческих OCR/ICR систем на примерах базы. Созданные с помощью методики классификаторы могут быть использованы в интеллектуальных прикладных системах оцифровки документов и потокового ввода данных.

CONSTRUCTION OF UNIVERSAL RUSSIAN CHARACTERS CLASSIFIERS BASED ON CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS

N.N. KUZMITSKY

Abstract

Presents the method of constructing universal classifiers of text images based on three-level committee of convolutional neural networks, generation and accounting of specific text patterns features, depending on methods of their synthesis. Efficiency of this method was confirmed by creation classifiers of Russian language characters, accuracy of which exceeds level of leading commercial counterpart in recognition of representative database patterns created in course of research.

Список литературы

1. *LeCun Y., Bottou L.* // Proceedings of the IEEE. 1998. Vol. 86 (11). P. 2278–2324.
2. *Кузьмицкий Н.Н.* // Матер. Междунар. конф. по компьютерной графике и зрению «ГрафиКон'2013». Владивосток, 16–20 сентября 2013 г. С. 234–237.
3. АБВУУ: FineReader. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.abbyy.ru/finereader/>. – Дата доступа: 01.02.2015.
4. *Запругаев С.А., Сорокин А.И.* // Вест. Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2009. № 2. С. 49–58.
5. *Вихров А.Г., Богуш Р.П., Глухов Д.О.* // Вест. Полоцкого государственного университета. Сер. С, Фундаментальные науки. 2010. № 9. С. 35–43.
6. NeuroFace: Садыхов Р.Х., Ваткин М.Е. Алгоритм обучения нейронной сети неокогнитрон для распознавания рукописных символов распознавания рукописных символов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://neuroface.narod.ru/files/neocog_hand_writ.pdf. – Дата доступа: 25.01.2015.
7. АБВУУ: FlexiCapture [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.abbyy.ru/flexicapture/>. – Дата доступа: 03.02.2015.

УДК 331.103.244

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРОВ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Н.В. ПУШКАРЕВА, В.А. ГУЦО

*Белорусский государственный университет информации и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

*Военная академия Республики Беларусь
Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь*

Поступила в редакцию 5 мая 2015

Предложена математическая модель деятельности операторов систем управления техническими объектами. Модель позволяет оценивать психофизиологическое состояние операторов при воздействии различных техногенных факторов.

Ключевые слова: ситуативное моделирование, регрессионная модель.

Введение

Для проведения математического моделирования необходимо изучить связь между эффективностью совместной деятельности малой группы операторов (расчеты штабов силовых структур) и некоторой совокупностью психофизиологических (биологических) характеристик участников группы. Поскольку какой-либо априорной (начальной, реальной) информации по сути поставленной задачи у исследователя нет, то объект исследования – малую группу – представим моделью «черного ящика». Это предполагает практически полное отсутствие знаний о возникающих внутригрупповых процессах и характере основных механизмов взаимодействия.

Математическая модель групповой операторской деятельности

Математическое моделирование начинаем с наблюдения за поведением показателей эффективности групповой деятельности при различных значениях биологических (психофизиологических) характеристик операторов. Для этого необходимо, во-первых, определить ограниченный набор совокупности значимых индивидуально-личностных характеристик операторов $X = \{x_i\}$; во-вторых, заставить условия, в которых осуществляются наблюдения $Z = \{z_i\}$; в-третьих, показатель эффективности групповой операторской деятельности Y (предотвратимый ущерб) должен быть количественно измеримым; в-четвертых, необходимо учитывать воздействие случайных техногенных факторов ε . Схематическое изображение модели принимает вид, представленный на рис. 1.

Изменение входных воздействий можно производить по-разному. Во-первых, поочередно изменять каждое из входных воздействий x_i , «заморозив» остальные на каких-то уровнях (значениях); во-вторых, все входные воздействия задавать по случайному закону; в-третьих, изменять одновременно все входные воздействия по какой-то программе.

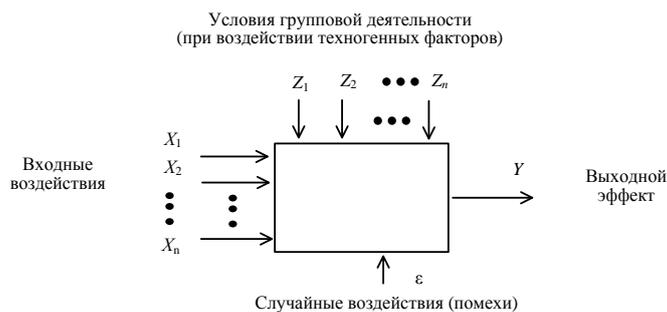


Рис. 1. Модель исследования – «черный ящик»

Первый вариант организации наблюдений неизбежно связан с потребностью большого количества наблюдений и с потерей больших объемов полезной информации, которая заключена в эффектах совместного влияния входных воздействий на выход. Эта информация теряется, так как реакция объекта изучается по изменению каждого в отдельности входного воздействия.

Второй вариант подразумевает фиксацию в какой-то момент времени значений отдельных параметров одновременно для всех входных воздействий x_i и сопоставлений их со значениями выходного эффекта Y . По этим данным строится так называемая регрессионная модель вида

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i \cdot x_i + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_{ij} \cdot x_i \cdot x_j + \dots, \quad (1)$$

где b_i – коэффициенты регрессии ($i = 1, 2, \dots, n$), определяемые с помощью аппарата классического регрессионного анализа [1].

Необходимо отметить, что данный вариант схемы организации наблюдений и соответствующий ей способ обработки результатов не обеспечивают коэффициентам регрессии весовых свойств. Величина коэффициента не свидетельствует о степени влияния на выходной эффект Y того входного воздействия x_i , перед которым он стоит в модели, а знак – о направлении влияния (в сторону увеличения или уменьшения выходного эффекта Y), что резко ограничивает круг задач, решаемых с помощью модели. Ее можно использовать только для решения задач параметрического прогноза, и то лишь в пределах области изменений параметров входных воздействий x_i , т.е. задачи интерполяции.

Третий вариант предполагает активное участие исследователя на всех стадиях моделирования, его целенаправленное проведение с хорошо развитой функцией управления всеми наблюдаемыми процессами. Этим требованиям отвечает математическая теория эксперимента или теория планирования эксперимента. Математическая теория эксперимента предлагает большое число вариантов опытов и выбора интервалов варьирования λ_i параметров входных воздействий X_i . Все они не универсальны и не взаимозаменяемы. Для них (например, для трех входных воздействий) вначале составляется таблица условий проведения эксперимента (табл. 1). В нее включаются уровни изменений факторов и интервалы их варьирования. Перевод входных воздействий из натуральной в кодовую форму производится следующим образом:

$$X_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta X_i}, \quad (2)$$

где X_i – некоторое (текущее) значение входного воздействия в натуральной шкале измерений; X_{i0} – базовое или среднее значение входного воздействия в натуральной шкале измерений; ΔX_i – шаг варьирования i -го воздействия.

Таблица 1. Условия проведения эксперимента

Обозначения	X_1 физич. значение	x_1 кодвое значение	X_2 физич. значение	x_2 кодвое значение	X_3 физич. значение	x_3 кодвое значение
Основной уровень X_{0i}	X_{01}	0	X_{02}	0	X_{03}	0
Интервал варьирования λ_i	λ_1	–	λ_2	–	λ_3	–
Верхний уровень $X_{вi}$	$X_{в1}$	+1	$X_{в2}$	+1	$X_{в3}$	+1
Нижний уровень $X_{нi}$	$X_{н1}$	-1	$X_{н2}$	-1	$X_{н3}$	-1

Кодовые значения $-1, 0, +1$ соответствуют минимальному, базовому и максимальному значениям i -го входного воздействия в натуральной шкале измерений. Это и определяет их названия: нижний, нулевой и верхний уровни воздействия. Входные воздействия могут быть выражены также только в качественной форме (типы темпераментов, психологический климат, направленность сферы мотивации...). Этим воздействиям соответствуют в кодовой форме только 2 уровня: верхний $X_{vi} = +1$ и нижний $X_{ni} = -1$, что эквивалентно в натуральной шкале измерений двум градациям качества («плохой-хороший», «холерик-флегматик»...) [2].

Затем составляется матрица планирования эксперимента или план наблюдений – план полного факторного эксперимента (ПФЭ) [2] и результаты измерений. Программа наблюдений по плану ПФЭ (например, для трех входных воздействий) задается ядром матрицы планирования (табл. 2), т.е. комбинацией уровней факторов в каждом опыте. Элементами ядра матрицы являются числа $+1$ и -1 , отображающие значения входных воздействий X_i в кодовой форме x_i . Кодовая форма входных воздействий вводится для удобства исследовательских операций моделирования.

Таблица 2. План проведения наблюдений по полному факторному эксперименту

№ входной ситуации (опыта) u	Кодовое обозначение строк	Входные воздействия (факторы) x_i			Отклик (реакция) y_u
		x_1	x_2	x_3	
1	b_0	-1	-1	-1	y_1
2	b_1	+1	-1	-1	y_2
3	b_2	-1	+1	-1	y_3
4	b_1b_2	+1	+1	-1	y_4
5	b_3	-1	-1	+1	y_5
6	b_1b_3	+1	-1	+1	y_6
7	b_2b_3	-1	+1	+1	y_7
8	$b_1b_2b_3$	+1	+1	+1	y_8

Таким образом, элемент каждой клетки ядра матрицы ПФЭ (табл. 2) указывает на каком уровне должно находиться значение входного воздействия. Построчное сочетание этих уровней для всех видов входных воздействий образует входную ситуацию или ситуацию управления, поэтому данное моделирование называется ситуативным. В каждом наблюдении фиксируется реакция (отклик) «черного ящика» на каждую из последовательно формируемых ситуаций. Если сформировать всевозможные сочетания этих уровней, т. е. сделать полный их перебор, то получим максимальное количество N наблюдений. Оно зависит от числа n входных воздействий x_i , где $i = 1, 2, \dots, n$, и может быть подсчитано по формуле $N = 2^n$.

Имея программу изменения входных ситуаций в виде ядра матрицы ПФЭ (табл. 2), приступаем к решению вопроса о реакции (отклике) «черного ящика» на каждую из этих ситуаций. Однако реакция объекта на каждую входную ситуацию не строго определена из-за влияния помех ε . Они не контролируются исследователем и не управляются им. Их происхождение случайное и может быть обусловлено, например, внезапной трансформацией вектора мотивов в группе, колебанием состояний работоспособности операторов. Случайна и точка приложения помех. Действие помех искажает результаты наблюдений. Для нейтрализации этих воздействий выполняются параллельные наблюдения. Они предусматривают многократные (не менее $\gamma = 3$) наблюдения реакции объекта на каждую входную ситуацию и усреднение эффектов групповой деятельности Y . План ПФЭ (табл. 2) дополняется столбцами с этими результатами [3].

После этого проводится проверка однородности разброса дисперсий выходного эффекта по всем входным ситуациям или равноточности измерений с помощью экспериментального критерия Кохрена по формуле

$$G^3 = \frac{\max_u [S^2(y_u)]}{\sum_{u=1}^N S^2(y_u)}$$

Заключение делается по правилу, если $G^3 \leq G_{\nu,R}^T$, то измерения во всех опытах равноточны. Если $G^3 > G_{\nu,R}^T$, то измерения во всех опытах неравноточны. Величина табличного

критерия Кохрена $G_{v,R}^T$ определяется [3] при уровне значимости $\alpha = 0,05$ ($p = 0,95$) или $\alpha = 0,01$ ($p = 0,99$) и при числах степеней свободы: $v = \gamma - 1 = 3 - 1 = 2$, $R = N = 2^n = 2^3 = 8$.

Вычисляется дисперсия $S^2(\bar{y})$ или ошибка (среднеквадратичная) $S(\bar{y})$ эксперимента по формуле

$$S(\bar{y}) = \sqrt{\frac{\sum_{u=1}^N S^2(y_u)}{N_\gamma}}$$

Результаты измерений (наблюдений) представляются в виде регрессионной модели (1). Коэффициенты регрессии $B = (b_0, b_1, b_2, b_3, b_{12}, b_{13}, b_{23}, b_{123})$ определяются по матричной формуле

$$B = \frac{1}{N} X' \cdot Y, \quad (3)$$

где матрица X и вектор-столбец Y для ПФЭ типа $2^N = 2^3$.

Для вычисления коэффициентов $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ij\gamma}$ и т.д. необходимо ядро матрицы ПФЭ (см. табл. 2) дополнить вспомогательными столбцами: столбцом фиктивного входного воздействия x_0 и столбцом эффектов взаимодействия типа $x_i x_j, x_i x_j x_\gamma$ и т.д. Фиктивное входное воздействие x_0 устанавливается на один единственный уровень, равный +1. Расчет коэффициента b_0 производится по той же формуле (3), что и для b_i . Элементы для столбца эффектов взаимодействия $x_i x_j$ получаются перемножением соответствующих элементов столбцов x_i и x_j , что представлено в табл. 3.

Таблица 3. Полный план проведения наблюдений по полному факторному эксперименту

№ вх. ситуации u	Кодовое обозначение строк	Входные воздействия (факторы)								Отклик (среднее значение y_u)
		x_0	x_1	x_2	x_3	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	
1	b_0	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	y_1
2	b_1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	y_2
3	b_2	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	y_3
4	$b_1 b_2$	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	y_4
5	b_3	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	y_5
6	$b_1 b_3$	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	y_6
7	$b_2 b_3$	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	y_7
8	$b_1 b_2 b_3$	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	y_8

Формула (3) получена в результате применения метода наименьших квадратов, т.е. чтобы сумма квадратов разностей $[(y_{\text{ист}})_u - y_u]^2$ между истинным значением отклика в u -м опыте $(y_{\text{ист}})_u$ и его вычисленным значением y_u по уравнению регрессии в u -м опыте была наименьшей

$$\sum_{u=1}^N [(y_{\text{ист}})_u - y_u]^2 = \min.$$

Таким образом, полученные оценки « B » коэффициентов регрессии по формуле (3) являются наилучшими с точки зрения принципа наименьших квадратов. Особые свойства ядра матрицы ПФЭ позволяют, во-первых, обеспечить коэффициентам регрессии свойства весовых и, во-вторых, рассчитать их по формуле

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N x_{ij} \cdot y_u; \quad (4)$$

где y_u – среднее значение выходного эффекта в некотором u -м опыте; x_{iu} – значение i -го входного воздействия в u -м наблюдении; N – общее число наблюдений.

Например, для получения коэффициента b_{12} столбец x_1x_2 умножается на столбец откликов y : $b_{12} = \frac{1}{8} y_1 - y_2 - y_3 + y_4 + y_5 - y_6 - y_7 + y_8$.

Воспользовавшись удобной схемой Иетса [4], вычисляются коэффициенты «В» регрессии для ПФЭ типа 2^n и определяется их ошибка (среднеквадратичная):

$$S(b_i) = \frac{S(\bar{y})}{\sqrt{N}} = S(b_{ij}) = S(b_{ijk}). \quad (5)$$

Надо отметить, что для всех коэффициентов регрессии «В» ошибка одна и та же (что верно только для ортогонального планирования – каковым является полный или дробный факторный эксперимент). Проверка значимости регрессионных коэффициентов позволяет упростить конечную математическую модель, исключив из нее незначимые входные воздействия, используя критерий Стьюдента.

Для проведения проверки адекватности полученного уравнения регрессии со значимыми членами или его части (например, линейной его части) вычисляется «дисперсия неадекватности». Для определения пригодности полученного уравнения к дальнейшим исследованиям вычисляется экспериментальный критерий Фишера [4].

Полученное уравнение регрессии с кодированными значениями преобразуется в уравнение с натуральными величинами X_i при помощи формулы (1). Границы доверительных интервалов для истинных коэффициентов «β» регрессии определяются из условия:

$$b_i - t_{\alpha;f} S(b_i) \leq \beta_i \leq b_i + t_{\alpha;f} S(b_i),$$

где $t_{\alpha;f}$ – t -критерий Стьюдента; $(1-\alpha)$ – число-доверительная вероятность (надежность).

Точность вычисления отклика y при использовании регрессии, как интерполяционной формулы, определяется дисперсией предсказанного значения:

$$S^2(\hat{y}) = \frac{S^2(\bar{y})}{N} \left[\sum_0^n x_i^2 + \sum_{1 \leq i < j \leq n} \hat{x}_i^2 \hat{x}_j^2 + \sum_{1 \leq i < j < k \leq n} \hat{x}_i^2 \hat{x}_j^2 \hat{x}_k^2 + \dots \hat{x}_n^2 \right]. \quad (6)$$

Доверительный интервал для истинного значения отклика имеет вид:

$$\hat{y} - t_{\alpha;f} S(\hat{y}) \leq \eta \leq \hat{y} + t_{\alpha;f} S(\hat{y}).$$

Для ПФЭ 2^n областью эксперимента является гиперкуб с вершинами $x_i = \pm 1$, где $i = 1, 2, \dots, n$ – в n -мерном факторном пространстве (количество вершин 2^n). Например, для ПФЭ 2^3 область эксперимента представляет собой трехмерный куб в трехмерном пространстве. При использовании уравнения регрессии, как интерполяционной формулы, вычисляют отклик y для внутренних (не вершинных) точек куба.

В ходе обсуждения результатов эксперимента производится интерпретация уравнения регрессии, принятие решения для дальнейших действий и оптимизация. Интерпретация уравнения регрессии, т.е. количественная оценка влияния факторов или их взаимодействий по величине коэффициента на отклик, понимается как разность значений отклика y при переходе фактора с нижнего уровня на верхний.

Эти разности называются основными эффектами и обозначаются обычно буквами A, B, C . Например, при ПФЭ типа 2^n для линейной части уравнения регрессии они определяются по формулам:

$$A = \beta_1 x_1 (+1) - \beta_1 x_1 (-1) = 2\beta_1 - \text{эффект фактора } x_1;$$

$$B = \beta_2 x_2 (+1) - \beta_2 x_2 (-1) = 2\beta_2 - \text{эффект фактора } x_2;$$

$$C = \beta_3 x_3 (+1) - \beta_3 x_3 (-1) = 2\beta_3 - \text{эффект фактора } x_3.$$

Эффекты взаимодействий факторов оцениваются по формулам

$$BC = \beta_{23} x_{23} (+1)(+1) - \beta_{23} x_{23} (+1)(-1) = 2\beta_{23}$$

или (в зависимости от знака уровня 1)

$$BC = \beta_{23} x_{23} (+1)(+1) - \beta_{23} x_{23} (-1)(+1) = 2\beta_{23}.$$

Аналогично определяются и остальные эффекты взаимодействия:

$$AB = 2\beta_{12}; \quad AC = 2\beta_{13}; \quad ABC = 2\beta_{123}.$$

Можно оценить условный эффект любого фактора (например, фактора x_2) при условии, что другой фактор (x_3) находится на своем уровне (например, +1 или -1):

$$B(x_3 = -1) = \beta_2(+1) - \beta_2(-1) + \beta_{23}(+1)(-1) - \beta_{23}(-1)(-1) = 2\beta_2 - 2\beta_{23} = B - BC \text{ или}$$

$$B(x_3 = +1) = \beta_2(+1) - \beta_2(-1) + \beta_{23}(+1)(+1) - \beta_{23}(-1)(+1) = 2\beta_2 + 2\beta_{23} = B + BC.$$

Заключение

Разработана математическая модель с весовыми коэффициентами для оценки психофизиологического состояния операторов при воздействии различных техногенных факторов. Непосредственное обращение к аналитической форме модели позволяет решить следующие задачи:

- интерполяцию и экстраполяцию выходного эффекта;
- оценку роли (вклада) входного воздействия в выходной эффект;
- определение оптимальных значений входных воздействий, при которых наблюдаются экстремальные значения выходного эффекта;
- ранжирование входных воздействий, т.е. иерархическое расположение их по степени влияния на выходной эффект;
- идентификацию входных воздействий по направлению влияния на выходной эффект (по виду знака коэффициента).

Математическая модель деятельности операторов систем управления техническими объектами позволяет оценить психофизиологические (биологические) параметры операторов при воздействии различных техногенных факторов. Разработанная модель может быть использована как в качестве диагностирующего устройства по подбору в малую группу (экипажи, боевые расчеты) психологически совместимых операторов, так и в качестве тренажера по обучению операторов систем управления техническими объектами.

MATHEMATICAL MODELLING FOR THE PSYCHOPHYSIOLOGICAL CONDITION ESTIMATION OF OPERATORS OF CONTROL SYSTEMS ABOVE DIFFICULT TECHNICAL OBJECTS

N.U. PUSHKAREVA, U.A. HUSHCHA

Abstract

The mathematical model for the psychophysiological condition estimation of operators of control systems above difficult technical objects is offered. The model allows to estimate a psychophysiological condition of operators at influence of various technogenic factors.

Список литературы

1. Пустыльник Е.И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., 1968.
2. Козубовский В.М. К вопросу о применении математической теории экстремального эксперимента к синтезу оптимальных эргатических систем. Минск, 1968.
3. Козубовский В.М. Групповая готовность операторов к сложным видам совместной деятельности: Автореф. дисс. ... доктора психологических наук. Киев, 1990.
4. Гринберг А.С., Горбачев Н.И., Тепляков А.А. Технологии защиты информационных ресурсов государственного управления. Минск, 2002.

УДК 621.328

АЛГОРИТМЫ И МЕТОДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В.И. КОРНАГА, А.С. ОЛЕЙНИК, В.М. СОРОКИН, А.В. РЫБАЛОЧКА

*Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева НАН Украины
пр. Науки, 41, 03028, Киев, Украина*

Поступила в редакцию 3 февраля 2015

Разработан макет осветительной системы и алгоритмы автоматического регулирования ее оптических параметров. Представлены результаты исследования алгоритмов авторегулирования цветовой температуры и яркости излучения.

Ключевые слова: светодиод, осветительная система, авторегулирование, цветовая температура.

Введение

С появлением твердотельных источников света (светодиодов) возникла возможность создавать новые системы освещения, обеспечивающие высокое качество световой среды. Главными преимуществами светодиодов перед другими источниками света являются энергетическая эффективность и прикладная гибкость при разработке осветительных устройств с заданными характеристиками. Это позволяет создавать так называемые интеллектуальные осветительные системы, которые могут менять яркость, спектральный состав излучения (цветовую температуру), автоматически включаться и выключаться, изменять параметры освещения в автоматическом или ручном режимах, выполнять функции декоративного освещения и сигнализации.

При проектировании таких систем необходимо учитывать не только электрооптические и конструктивные особенности светотехнического устройства, но и влияние излучения, создаваемого этим устройством, на физиологические функции основных систем организма – зрительные, нервные, сердечнососудистые. При этом информация о природе процессов, протекающих в зрительной системе человека под действием светового излучения, приобретает особое значение. Результаты исследований в области физиологии глаза человека показывают наличие незрительного влияния видимого излучения на циркадную систему организма [1, 2]. Наличие в сетчатке глаза особого типа рецепторов, максимально чувствительных в спектральном диапазоне излучения 430–470 нм, вызывает сложную химическую реакцию при взаимодействии с этим излучением и приводит к уменьшению секреции гормона мелатонина или, к так называемому, циркадному эффекту [3–6]. Подавление гормона мелатонина (гормона сна или усталости) вызывает повышенную активность человека. В этом аспекте при проектировании интеллектуальных осветительных систем огромное значение имеет управление спектральным составом излучения в зависимости от внешних факторов – времени суток, условий производства, уровня освещенности естественного света и др. Такое многофункциональное использование оптического излучения видимого диапазона, наряду с обеспечением необходимой освещенности, позволяет также с учетом психофизиологического и биологического действия света влиять на формирование природного циркадного ритма [8–10].

Способы реализации белого излучения

Для интеллектуальных систем освещения, построенных на основе светодиодов, существует ряд способов управления коррелированной цветовой температурой «белого» источника света [11]. Первый из них заключается в использовании двух люминофорных светодиодов (W/W) с белым свечением и разной коррелированной цветовой температурой. Такие системы обеспечивают относительную простоту построения и дешевизну, но могут излучать только «белый» свет определенной цветовой температуры в ограниченном спектральном диапазоне. На хроматической диаграмме цветности CIE 1931 (рис. 1, а), для примера, изображены точки значений цветových температур двух светодиодов (крайние точки) и возможные значения цветовой температуры, которые могут быть получены при смешении излучения от этих двух светодиодов. Из рисунка видно, что возможные значения цветовой температуры «белого» света лежат на прямой, которая не совпадает с кривой Планка.

Второй способ заключается в использовании RGB светодиодов [12], которые позволяют получить более широкий диапазон цветových температур белого света по сравнению с первым способом (рис. 1, б). Как видно из рисунка, в треугольник Максвелла попадает практически вся кривая Планка. Кроме этого, интеллектуальные осветительные системы, построенные на базе RGB светодиодов, благодаря возможности изменять цвет, позволяют реализовывать дополнительные функции сигнализации, декоративного освещения и др.

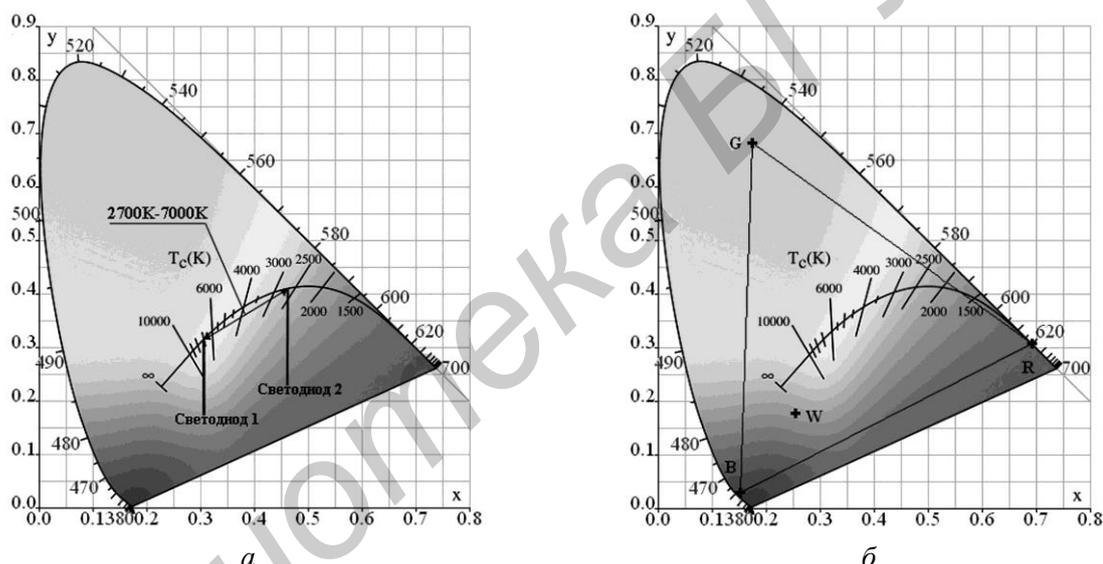


Рис. 1. Значения коррелированной цветовой температуры, которые возможно получить при использовании двух «белых» светодиодов (а) и RGB светодиодов (б)

Недостатком второго способа является низкий индекс цветопередачи белого света. Третий способ, рассмотренный в данной работе, устраняет этот недостаток добавлением белого люминофорного светодиода (система RGBW) или оранжевого (система RGBA). Такие системы, являясь более сложными в реализации и более дорогими, обладают широкими возможностями получения белого света различной цветовой температуры с высоким индексом цветопередачи, а также различных цветов излучения.

Независимо от типов светодиодов, на основе которых построена интеллектуальная осветительная система, необходимо выполнять стабилизацию и регулирование оптических параметров. Это вызвано тем, что светодиод в процессе работы изменяет свою яркость и коррелированную цветовую температуру. Изменение этих параметров зависит от температуры кристалла светодиода, деградации кристалла, изменения свойств люминофора, изменения прозрачности линз в процессе работы [13]. Стабилизация этих параметров, а также необходимость реализации дополнительных функций требует разработки алгоритмов и методов автоматического регулирования оптических характеристик таких интеллектуальных осветительных систем.

Макет интеллектуальной осветительной системы

При разработке интеллектуальной осветительной системы были использованы RGBW светодиоды, которые позволяют существенно расширить функциональные возможности системы. При этом основными требованиями при разработке таких систем были: полное автономное функционирование осветительной системы по заданному алгоритму, автоматическое включение/выключение при появлении/удалении человека из зоны освещения или при достижении определенных уровней внешней освещенности, возможность ручного управления системой с помощью пульта дистанционного управления (ПДУ). Исходя из перечисленных выше требований, была разработана блок-схема интеллектуальной осветительной системы (рис. 2).

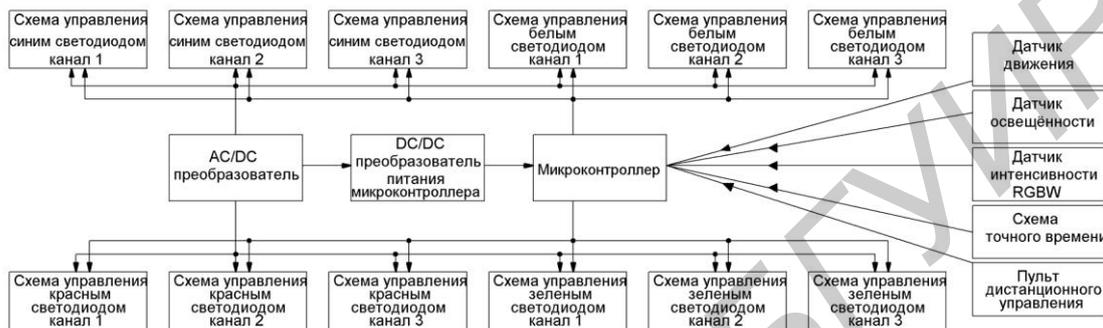


Рис. 2. Блок-схема интеллектуальной осветительной системы

Питание системы обеспечивается AC/DC и DC/DC преобразователями. Микроконтроллер является главным узлом системы, в котором реализуются алгоритмы по мониторингу сигналов с датчиков и пульта дистанционного управления, при этом синхронизация работы может осуществляться от встроенной системы отсчета реального времени. В микроконтроллере также реализуются алгоритмы авторегулирования яркости и коррелированной цветовой температуры. Микроконтроллер позволяет управлять каждым каналом формирования цветовых параметров. На рис. 3 изображен макет интеллектуальной осветительной системы. В качестве оптической системы используется комбинация двух пластиков – прозрачного с нанесенной на его тыльной стороне системой микролинз (используется как световод) и матового как рассеивателя. По периметру прозрачного пластика размещены светодиодные линейки с чередующимися RGB и W светодиодами, излучающими в торец. AC/DC, DC/DC преобразователи и управляющий блок вынесены на тыльную сторону светильника.



Рис. 3 Макет интеллектуальной осветительной системы

Алгоритмы работы интеллектуальной осветительной системы

Согласно разработанному алгоритму (рис. 4), при включении интеллектуальной осветительной системы происходит определение даты и времени. В зависимости от месяца, дня

и времени суток микроконтроллер задает определенный уровень яркости и цветовую температуру. Это отвечает условиям создания освещенности с учетом природного циркадного ритма. Переход с автономного в ручной режим работы позволяет пользователю с помощью ПДУ устанавливать любые значения яркости и цветовой температуры. В ряде известных интеллектуальных осветительных систем реализованы похожие алгоритмы [14], однако в них отсутствует звено автоматического регулирования и стабилизации яркости и цветовой температуры. Стабилизацию этих параметров необходимо осуществлять на основе использования дополнительных датчиков интенсивности (яркости) RGBW излучающих элементов. В созданной осветительной системе регулирование цветовой температуры происходит по координатам хроматической диаграммы цветов CIE 1931. Каждая цветовая температура «белого» света отвечает своим координатам на кривой Планка. На основе полученной информации с датчика яркости RGBW можно перейти в цветовое пространство XYZ с помощью приведенных в стандарте CIE1931 формул [15]:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = [M] \cdot \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = [M]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix},$$

где X, Y, Z – координаты цветового пространства CIE1931, R, G, B – координаты цветового пространства RGB, $[M]$ – матрица преобразования

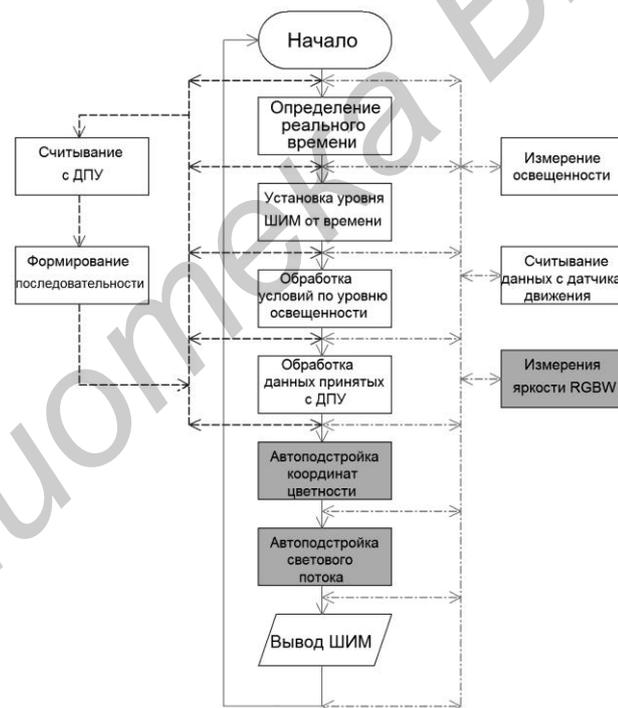


Рис. 4. Алгоритм работы интеллектуальной осветительной системы

Для учета вклада белого люминофорного светодиода (W) переходная матрица $[M]$ находится при калибровке датчиков интенсивности RGBW. Из полученных значений X, Y, Z вычисляются координаты x и y излучаемого светового потока:

$$x = \frac{X}{X + Y + Z}, \quad y = \frac{Y}{X + Y + Z}.$$

По рассчитанным координатам, с учетом занесенной в память микроконтроллера таблицы значений цветовых температур и их координат, определяется коррелированная цветовая температура. Перед выполнением авторегулирования цветовой температуры производится сравнение полученных значений координат « x » и « y » с координатами, которые необходимо получить x_{const}, y_{const} (рис. 5, а). Для уменьшения количества регулирований

вводятся допустимые значения отклонения Δx и Δy . Если полученные значения находятся в диапазоне $x \pm \Delta x$ и $y \pm \Delta y$, регулирование не выполняется. В противном случае процесс авторегулирования продолжается до выполнения предыдущего условия.

Одной из наиболее важных функций интеллектуального осветительного устройства является управление яркостью. Для получения максимально комфортного освещения ее целесообразно изменять на протяжении суток [16]. Регулировка яркости в процессе работы осуществляется в соответствии с концепцией пропорционального регулятора [17], алгоритм которого представлен на рис. 5, б. В начале процедуры авторегулирования выполняется сравнение излучаемой яркости (с датчика яркости) со значением яркости установленной пользователем. Чтобы оптимизировать число регулировок, вводится допустимое отклонение Δw . При выходе значения яркости за пределы диапазона $w \pm \Delta w$, происходит смена интенсивности излучения каждого светодиода (для электронной схемы этот процесс адекватен увеличению или уменьшению тока, протекающего через светодиоды, при использовании метода широтно-импульсной модуляции тока).

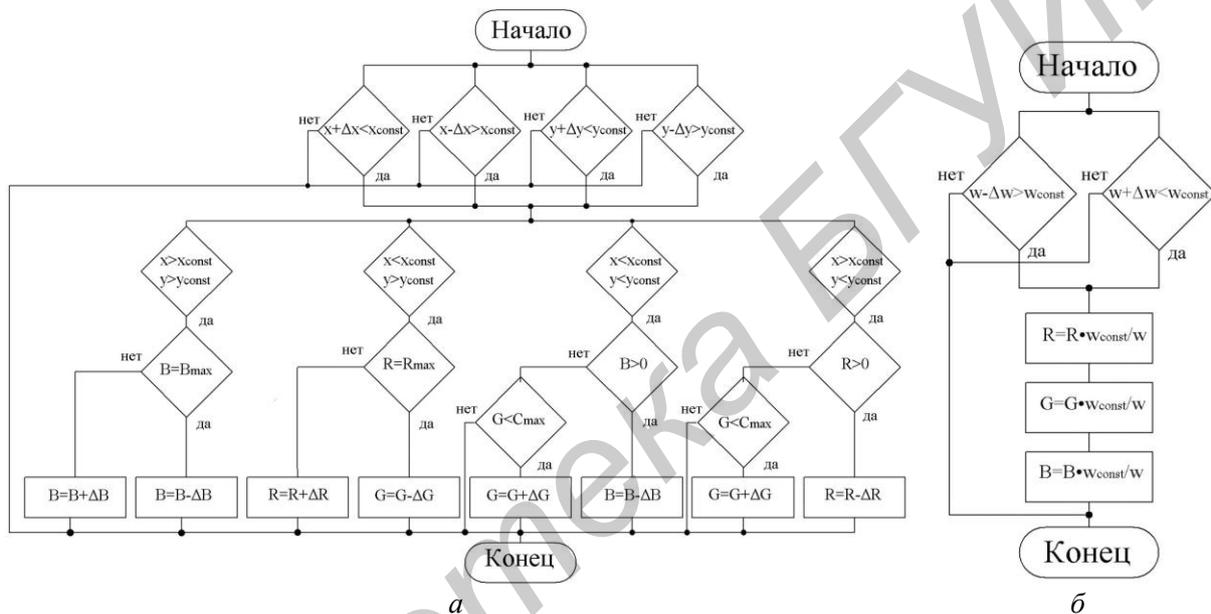


Рис. 5. Алгоритмы авторегулирования цветовой температуры (а), яркости излучения интеллектуальной осветительной системы (б)

Чтобы все регулировки, которые осуществляет система, производились незаметно для глаза пользователя, необходимо обеспечить плавное изменение яркости светодиодов, а также оптимальное согласование работы различных алгоритмов, исключающее возникновение ощутимых колебаний яркости.

Результаты исследования разработанных алгоритмов

Для проверки работы алгоритмов и контроля оптических параметров интеллектуальной осветительной системы была использована интегрирующая сфера диаметром 2 м и спектрофотометр Instrument Systems CAS 140СТ.

В интегрирующую сферу монтировался макет интеллектуальной осветительной системы, управляемый с помощью ДПУ. На первой стадии устанавливался режим излучения «белого» света с цветовой температурой 7000 К. На протяжении 30 мин исследовалась динамика изменения координат цветности «x», «y» и цветовой температуры без включения алгоритмов автоподстройки. Время эксперимента выбиралось из условия стабилизации всех исследуемых параметров. По окончании эксперимента образец интеллектуальной осветительной системы отключался и охлаждался до комнатной температуры. Для анализа и сравнения работы осветительной системы с включенной системой автоподстройки цветовой температуры была включена автоподстройка и повторно проведено исследование на протяжении 30 мин. Полученная динамика смены координат цветности «x», «y» и цветовой

температуры (рис. 6) показывает, что без автоподстройки цветовой температуры идет плавный ее рост до 7200 K и стабилизация, а координаты «x» и «y» плавно уменьшаются. При включении автоподстройки цветная температура стабилизируется на уровне 7000 K и ее амплитудные значения практически не изменяются. Также изменения «y» координаты практически отсутствуют. Аналогично были проведены исследования алгоритма автоподстройки яркости (светового потока) излучения интеллектуальной осветительной системы.

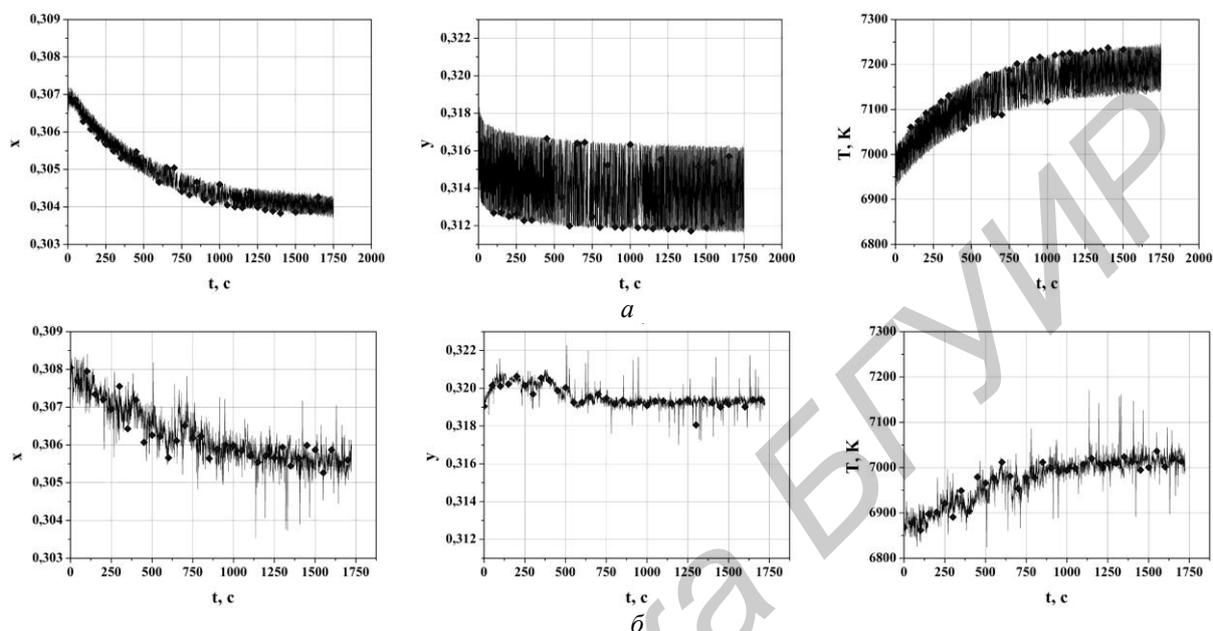


Рис. 6. Динамика изменения координат цветности и цветовой температуры интеллектуальной осветительной системы без автоподстройки (а) и с автоподстройкой (б)

Как видно из рис. 7 световой поток без автоподстройки с момента включения уменьшается на 9 %, а с автоподстройкой на 3 %. Стабилизация светового потока происходит в течение 4 мин при автоподстройке и 30 мин без автоподстройки яркости. На основании этого можно утверждать, что система с функцией автоподстройки яркости более стабильна в работе. Наличие коротких пиков отклонения большой амплитуды на 750 с указывает на незначительное перерегулирование. Это отклонения амплитуды можно уменьшить путем введением дополнительных условий при увеличении или уменьшении яркости светодиодов.

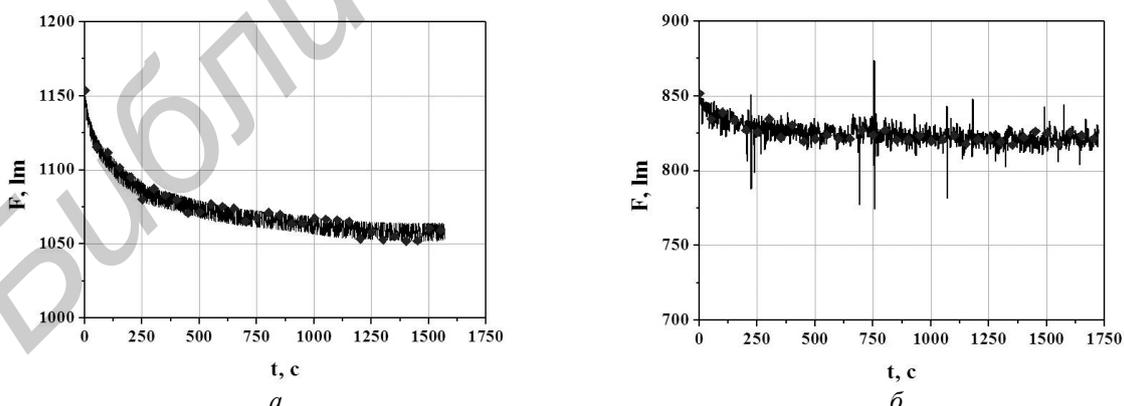


Рис. 7. Динамика изменения светового потока без автоподстройки (а) и с автоподстройкой (б)

Заключение

Разработанная интеллектуальная осветительная система позволяет изменять цветовую температуру излучения в широком диапазоне и, как следствие, обеспечивает возможность оптимального влияния на циркадные ритмы организма человека.

Использование в интеллектуальной системе освещения RGBW-светодиодов с датчиками интенсивности излучения для каждого спектрального канала и разработанных алгоритмов автоматического регулирования цветовой температуры и яркости обеспечивает увеличение стабильности оптических параметров системы и возможность их автоматического или ручного регулирования.

Реализация автоподстройки яркости разработанной осветительной системы позволяет уменьшить время стабилизации светового потока и, как следствие, увеличить стабильность работы системы в целом.

ALGORITHMS AND METHODS OF AUTOMATIC CONTROL OF LIGHTING SYSTEMS OPTICAL CHARACTERISTICS

V.I. KORNAGA, O.S. OLIINYK, V.M. SOROKIN, A.V. RYBALOCHKA

Abstract

The prototype of lighting system and algorithms of automatic control of its optical parameters was developed. The results of the research of autoregulation colour temperature algorithms and brightness of the light were shown.

Список литературы

1. *Berson D.M., Dunn F.A., Motoharu Takao* // Science. 2002. Vol. 295. P. 1070–1073
2. *Brainard C., Hanifin P., Jeffrey M.* // The Journal of Neuroscience. 2001. № 21. P. 14–20.
3. *Айзенберг Ю. Б., Шахпаруянц Г. Р.* // Светотехника. 2000. № 5. С. 2–4.
4. *Неровный В. Л., Хартман Р.* // Светотехника. 1999. № 2. С. 33–42.
5. *Абрамова Л. В., Амеликина С. А., Желуникова и др.* // Светотехника. 2001. № 3. С. 13–15.
6. *Ван Ден Бельд.* // Светотехника. 2003. № 1. С. 4–8.
7. *Brainard G.C.* //Fifth International LRO lighting research symposium. Orlando. November, 5, 2002. P. 129–137.
8. *Гусев Н.М., Данциг Н.М., Иванова Н.С. и др.* // Светотехника. 1973. № 2. С. 15–19.
9. *Брейнард К., Бернекер К.А.* // Светотехника. 1996. № 1–2. С. 10–13.
10. *Schubert, E.F., Kim, J.K.* // Science. 2005. Vol. 308. № 5726. P. 1274–1278
11. *Шуберт Ф.Е.* Светодиоды. М., 2008.
12. *Корнага В.И., Сорокин В.М., Олейник А.С. и др.* // Сб. тез. докл. 21-й Междунар. симп. «Передовые дисплейные и световые технологии». Москва, 9–12 апреля 2013. С. 71.
13. *Приказчик С.П.* //Светотехника и электроэнергетика. Харьков. 2008. № 4. С. 24–30
14. *Беспалов Н.Н., Ильин М. В., Григорович С. Ю.* // Электроника и информационные технологии. 2010. № 1. С. 4–8
15. Bruce Justin Lindbloom [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.brucelindbloom.com>. – Дата доступа: 10.01.2015.
16. *Van Vommel* // Proceedings 2nd CIE expert symposium «Lighting and Health» CIE Publication x031: Ottawa, September, 7–8, 2006. P. 62–67.
17. *Новиков В.П.* Автоматизация литейного производства. Часть 1. М., 2008.

УДК 621.396.218:614.89.086.5

ОЦЕНКА НЕОБХОДИМОГО УРОВНЯ МОЩНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ СТАНДАРТА GSM В ГОРОДЕ С УЧЕТОМ ТРЕБОВАНИЙ ВНУТРИСИСТЕМНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

В.И. МОРДАЧЕВ, А.С. СВИСТУНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 12 марта 2015

Приведены результаты имитационного моделирования фрагмента сети сотовой связи с использованием модели типовой городской застройки, обеспечивающие возможность оценки уровня эквивалентной изотропно излучаемой мощности в частотных каналах базовых станций сотовой радиосети стандарта GSM-1800, необходимого и достаточного для обеспечения высокого качества связи с учетом затухания радиоволн в зданиях и уровня внутрисетевых помех, определяемых качеством обеспечения внутрисистемной электромагнитной совместимости сайтов, использующих одинаковые частотные каналы.

Ключевые слова: сотовая связь, базовая станция, эквивалентная изотропно излучаемая мощность, электромагнитная совместимость, электромагнитная безопасность.

Введение

В связи с постоянным ростом территориальной плотности базовых станций (БС) сотовой связи большой интерес представляет вопрос о безопасности их электромагнитного излучения (ЭМИ) для населения. Эквивалентная изотропно излучаемая мощность (ЭИИМ) БС сотовой связи стандарта GSM в городах Республики Беларусь достигает 53...54 дБм/канал, что существенно выше фактически необходимой для нормального функционирования сетей сотовой связи в местах с высокой плотностью населения [1].

Завышенная мощность ЭМИ БС в городах может представлять опасность для населения, поскольку сотовые радиосети – не единственный источник ЭМИ в местах с высокой плотностью населения. Завышенные ЭИИМ БС могут реально приводить к увеличению размеров санитарно-защитных зон действующих передающих радиотехнических объектов (радиотелевизионных передающих центров, локальных группировок РЛС и т.п.), которые принято определять по суммарной интенсивности ЭМП [2, 3]. Кроме того, в силу известных особенностей частотно-территориального планирования сотовых радиосетей, обусловленных многократным повторением использования одних и тех же частотных каналов в территориально разнесенных сайтах сети, реально используемые мощности ЭМИ и БС, и абонентских станций (АС) оказываются завышенными из-за появления проблемы внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС), т.е. вследствие присутствия в сети внутрисетевых помех.

Особую актуальность вопрос об определении научно обоснованной нижней границы диапазона возможных уровней ЭИИМ БС, достаточных для нормального функционирования сотовой связи в местах с высокой плотностью населения, приобретает в связи со следующим. При принятой методике взимания платы за использование радиочастотного спектра базовыми станциями сотовой связи [4] плата в госбюджет пропорциональна ЭИИМ БС. Данное положение находится в противоречии как с самой идеей сотовой связи (покрытие территории не за счет увеличения ЭИИМ БС, а за счет сотовой структуры сети с многократным повторением использования одних и тех же частотных каналов маломощными БС при условии

их территориального разнесения), так и с требованиями электромагнитной безопасности населения. Более того, данное обстоятельство препятствует принятию Лицензиаром решений о снижении ЭИИМ БС до минимально необходимых уровней в связи с тем, что такие решения приведут к снижению поступлений в госбюджет. Изменение сложившейся ситуации возможно только на основе определения научно-обоснованного минимально необходимого уровня ЭИИМ БС в населенных пунктах.

Ранее были выполнены оценки [1] уровней ЭИИМ в частотных каналах БС GSM 900/1800, необходимых и достаточных для обеспечения эффективного использования выделенного сети радиочастотного ресурса при различных высотах подвеса антенн БС, плотности населения, уровнях реальной чувствительности радиоприема в сети, размерности кластера частотного планирования и удельной интенсивности трафика. Эти оценки были выполнены с использованием модели условий распространения радиоволн (РРВ) в городской застройке (urban area) на основе эмпирической модели Окамура–Хата [5,6] с ее интерполяцией на трассы РРВ длиной менее 1 км, для которых ее точность существенно зависит от параметров городской застройки.

Целью данной работы является уточнение оценок [1] необходимых уровней ЭИИМ БС в городской застройке на основе имитационного моделирования фрагмента сети сотовой связи с использованием модели городской застройки центральной части г. Минска и многолучевой модели РРВ, реализованных с применением [7], а также с учетом уточненных требований внутрисистемной ЭМС (требований к отношению «сигнал/внутрисетевая помеха») и характеристик [5,6,8] затухания сигналов GSM в зданиях.

Характеристики имитационного моделирования фрагмента сети GSM

При имитационном моделировании фрагмента сети GSM использованы следующие модели и исходные данные.

1. Модель фрагмента городской застройки центральной части г. Минска, изображенного на рис. 1, его размеры 1,5×1,5 км. В модели учтена топология размещения зданий и их высота. Данная территория является центральной частью города с плотной застройкой. В модели приняты следующие характеристики, влияющие на РРВ в рассматриваемых условиях:

– основной материал стен зданий – кирпич, тип покрытия земной поверхности – асфальт, погодные условия двух видов: низкая влажность (солнечно, ясно) и высокая влажность (дождь);

– высота домов 8...30 м исходя из этажности и архитектуры зданий; ширина главной транспортной магистрали (проспекта) 50 м, ширина улиц 20...30 м в зависимости от количества полос движения транспорта (2...8) и ширины тротуаров;

– территория разделена на три условные категории: дворовая территория, проезжая часть, пешеходная зона. Распределение АС по дворовым территориям и пешеходным зонам принято равномерным случайным. Расположение АС на проезжей части принято равномерным случайным по полосам движения. Количество точек наблюдения – 10000 точек для каждого типа территории;

– территориальная плотность БС 2,5...3,0 ед./км² (6 БС на рассматриваемой территории);

– крыши зданий приняты плоскими, в качестве основного конструктивного элемента крыш принято железобетонное перекрытие (данное предположение обусловлено ограничениями функциональности использованного при моделировании программного обеспечения [7]).

2. Трехмерная модель Х3Д [7] многолучевого РРВ в условиях плотной городской застройки, не имеющая ограничений на использование в принятых условиях и учитывающая множество возможных путей прохождения ЭМИ БС, размещаемых на крышах зданий на высоте 25 м над земной поверхностью, в каждую из рассматриваемых точек размещения АС у поверхности на высоте 15...2,0 м.

Модель основана на использовании трехмерного алгоритма SBR (Shooting and Bouncing Ray). Данный алгоритм используется для определения траекторий лучей РРВ от БС к АС в трехмерном пространстве. Траектория прохождения каждого луча по направлению к точке

наблюдения (АС) начинается в источнике излучения (БС) и продолжается, зеркально отражаясь от стенок зданий и земной поверхности не более заданного количества раз (данный параметр используется для отбора лучей, учитываемых при суммировании на входе приемника АС), дифрагируя на углах и краях крыш зданий.



Рис. 1. Модель фрагмента городской застройки центральной части г. Минска с размещенными в нем шестью БС сети GSM-1800 (Тх1–Тх6).

Параметры модели РРВ Х3D: количество отражений луча – до 6, количество точек дифракций не более 1, угол между двумя соседними лучами, исходящими из одного источника $0,25^\circ$, количество лучей, исходящих из одного источника – до 10.

1. Моделирование выполнено для условий обеспечения качественного приема сигнала БС приемником АС, соответствующего высокой вероятности связи («Grade of Service», GoS) $B = 0,98 \dots 0,99$ при различных уровнях канальной ЭИИМ БС.

2. Анализ проводится для БС GSM-1800, поскольку на их долю приходится 75 % объема радиочастотного спектра, выделяемого сетям GSM. Диапазон анализируемых уровней ЭИИМ БС 40...53 дБм на частотный канал GSM.

3. Коэффициент шума приемников БС и АС GSM-1800 регламентирован на уровне 7 дБ, что соответствует уровню $P_0 = -114$ дБм пороговой чувствительности приемника – уровню приведенного ко входу приемника собственного шума в полосе радиоприема 200 кГц.

4. Принято, что полезным сигналом, принимаемым АС, является сигнал преобладающей БС, для которой потери при РРВ в точку размещения АС являются наименьшими.

Результаты имитационного моделирования

Ниже в табл.1–4 приведены оценки границ диапазонов уровней сигналов преобладающих БС на входе приемников АС полученные в результате статистической обработки результатов моделирования функционирования фрагмента сотовой радиосети при

различных погодных условиях (сухо, дождь) и при расположении АС на территории различного типа (дворовая территория, проезжая часть, пешеходная зона) для вероятности связи (GoS) $B = 0,99$ и $B = 0,98$.

Полученные результаты свидетельствуют о следующем.

1. При ЭИИМ БС 53 дБм/канал (200 Вт/канал), используемой в настоящее время операторами GSM в Республике Беларусь на городских территориях, нижняя граница P_D значений уровня полезного сигнала на входе приемника АС составляет:

– для дворовой территории $P_D = -70,9 \dots -68,2$ дБм, т.е. на 43,1...45,8 дБ выше пороговой чувствительности приемника АС;

– для проезжей части $P_D = -60,7 \dots -57,2$ дБм, т.е. на 53,3...56,8 дБ выше пороговой чувствительности приемника АС;

– для пешеходной зоны $P_D = -63,2 \dots -60,4$ дБм, т.е. на 50,8...53,6 дБ выше пороговой чувствительности приемника АС.

2. Ужесточение требований к качеству связи на 1 % с $B = 0,98$ до $B = 0,99$ сдвигает нижнюю границу значений уровня полезного сигнала на входе приемника АС на 2,6...3,4 дБ, изменение погодных условий изменяет эту границу на 0,1...0,5 дБ.

3. При ЭИИМ БС 43 дБм/канал (20 Вт/канал), в 10 раз меньшей, чем используемая в настоящее время операторами GSM в Республике Беларусь на городских территориях, нижние границы значений уровня полезного сигнала на входе приемника АС для территорий различного вида составляет $P_D - P_0 = 33,1 \dots 35,8$ дБ для дворовой территории, $P_D - P_0 = 43,3 \dots 46,8$ дБ для проезжей части, и $P_D - P_0 = 40,8 \dots 43,6$ дБ для пешеходной зоны.

4. В целях обеспечения высокого качества связи запас $P_D - P_0$ по уровню полезного сигнала должен быть достаточным для преодоления затухания радиоволн при их проникновении внутрь здания. В этом случае разница $D_P = P_D - P_0$ имеет три слагаемых и связана с минимально необходимым отношением «сигнал/собственный шум» на входе приемника Q_N и затуханием радиоволн в здании S_B следующим образом:

$$D_P [dB] = P_D [dBm] - P_0 [dBm] \geq Q_N [dB] + S_B [dB], \quad Q_N [dB] = Q [dB] + \Delta Q [dB], \quad (1)$$

где Q – минимально необходимое защитное отношение на входе приемника АС, равное отношению минимально используемой мощности полезного сигнала $P_{u \min}$ [Вт] на входе приемника АС к мощности суммарной помехи $(P_0 + P_{\Sigma int})$ [Вт], зависящей как от уровня собственных шумов приемника P_0 , так и от уровня внутрисетевой помехи $P_{\Sigma int}$:

$$\frac{P_{u \min}}{P_0 + P_{\Sigma int}} \geq Q; \quad Q_N = \frac{P_{u \min}}{P_0}, \quad Q [dB] = 10 \lg Q, \quad Q_N [dB] = 10 \lg Q_N; \quad (2)$$

ΔQ – дополнительное слагаемое, определяемое качеством частотно-территориального планирования сети (качеством обеспечения внутрисетевой электромагнитной совместимости).

Таблица 1. Диапазоны уровней сигналов преобладающих БС на входе приемников АС при низкой влажности (сухие погодные условия) для вероятности связи (GoS) $B = 0,99$

ЭИИМ частотного канала БС, дБм	Уровень сигнала преобладающей БС на входе приемника АС, дБм		
	Дворовая территория	Проезжая часть	Пешеходная зона
40	-83,8...-22,1	-73,2...-22,9	-76,2...-23,3
43	-80,8...-19,1	-70,2...-19,9	-73,2...-20,3
47	-76,8...-15,1	-66,2...-15,9	-69,2...-16,3
50	-73,8...-12,1	-63,2...-12,9	-66,2...-13,3
53	-70,8...-9,1	-60,2...-9,9	-63,2...-10,3

Таблица 2. Диапазоны уровней сигналов преобладающих БС на входе приемников АС при низкой влажности (сухие погодные условия) для вероятности связи (GoS) $B = 0,98$

ЭИИМ частотного канала БС, дБм	Уровень сигнала преобладающей БС на входе приемника АС, дБм		
	Дворовая территория	Проезжая часть	Пешеходная зона
40	-81,2...-22,1	-70,2...-22,9	-73,6...-23,3
43	-78,2...-19,1	-67,2...-19,9	-70,6...-20,3
47	-74,2...-15,1	-63,2...-15,9	-66,6...-16,3
50	-71,2...-12,1	-60,2...-12,9	-63,6...-13,3
53	-68,2...-9,1	-57,2...-9,9	-60,6...-10,3

Таблица 3. Диапазоны уровней сигналов преобладающих БС на входе приемников АС при высокой влажности (дождь) для вероятности связи (GoS) $B = 0,99$

ЭИИМ частотного канала БС, дБм	Уровень сигнала преобладающей БС на входе приемника АС, дБм		
	Дворовая территория	Проезжая часть	Пешеходная зона
40	-83,9...-20,8	-73,7...-21,5	-76...-22,5
43	-80,9...-17,8	-70,7...-18,5	-73...-19,5
47	-76,9...-13,8	-66,7...-14,5	-69...-15,5
50	-73,9...-10,8	-63,7...-11,5	-66...-12,5
53	-70,9...-7,8	-60,7...-8,5	-63...-9,5

Таблица 4. Диапазоны уровней сигналов преобладающих БС на входе приемников АС при высокой влажности (дождь) для вероятности связи (GoS) $B = 0,98$

ЭИИМ частотного канала БС, дБм	Уровень сигнала преобладающей БС на входе приемника АС, дБм		
	Дворовая территория	Проезжая часть	Пешеходная зона
40	-81,3...-20,8	-70,3...-21,5	-73,4...-22,5
43	-78,3...-17,8	-67,3...-18,5	-70,4...-19,5
47	-74,3...-13,8	-63,3...-14,5	-66,4...-15,5
50	-71,3...-10,8	-60,3...-11,5	-63,4...-12,5
53	-68,3...-7,8	-57,3...-8,5	-60,4...-9,5

Если требуемое минимальное защитное отношение Q меньше значения Q_{CL} защитного отношения для суммарной внутрисетевой помехи, характерного для выбранного типа кластера частотно-территориального планирования сотовой радиосети

$$Q < Q_{CL} = \frac{P_u}{P_{\Sigma int}}, \quad (3)$$

где P_u – обеспечиваемый в сети уровень полезного сигнала при внутрисетевой помехе уровня $P_{\Sigma int}$, то можно найти минимально используемую мощность полезного сигнала $P_{u min}$, привязанную к собственным шумам приемника АС и определяющую фактическое значение реализуемой в сети чувствительности радиоприема АС:

$$P_{\Sigma int} = \frac{P_{u min}}{Q_{CL}}, \quad \frac{P_{u min}}{P_0 + \frac{P_{u min}}{Q_{CL}}} \geq Q.$$

Отсюда

$$P_{u min} \geq P_0 \frac{Q Q_{CL}}{Q_{CL} - Q}, \quad Q < Q_{CL}, \quad (4)$$

$$Q_N = \frac{P_{u min}}{P_0} \geq \frac{Q Q_{CL}}{Q_{CL} - Q_0}, \quad Q < Q_{CL}. \quad (5)$$

Последнее соотношение позволяет оценить величину ΔQ в (1), зависящую от качества частотно-территориального планирования сети. На рис. 2, а показан график зависимости Q_N от значения Q для четырех значений Q_{CL} , взятых с шагом 0,5 дБ в диапазоне 16,5...18 дБ; на рис. 2, б показан график зависимости ΔQ значений Q для четырех значений Q_{CL} , отмеченных выше. Установленные значения Q_{CL} характерны для частотного планирования сети с размерностью кластера 4...7 регулярной сотовой сети [9]. Согласно графикам зависимости на рис. 2, можно утверждать следующее:

– в области $Q_{CL} - Q \geq 5$ дБ, соответствующей высокому качеству частотно-территориального планирования сети, необходимая добавка ΔQ к уровню полезного сигнала, компенсирующая влияние внутрисетевой помехи на качество связи, не превышает 2 дБ;

– при $Q \ll Q_{CL}$ очевидно, что Q приближенно равно значению Q_N ;

– добавка ΔQ к уровню полезного сигнала сопровождается соответствующим «синхронным» увеличением уровня внутрисетевой помехи $P_{\Sigma int}$ и снижением влияния собственного шума приемника на значение Q (снижение до приемлемого уровня значения P_0 в знаменателе);

– при ухудшении качества частотно-территориального планирования сети добавка ΔQ может резко возрастать и достигает 10...15 дБ и более;

– при низком качестве частотно-территориального планирования сети для некоторых областей зоны покрытия условие $Q_{CL} > Q$ может не выполняться; в этих областях вследствие низкого уровня внутрисетевой ЭМС требуемое качество связи останется неудовлетворительным при любом увеличении уровня полезного сигнала (увеличении ЭИИМ БС).

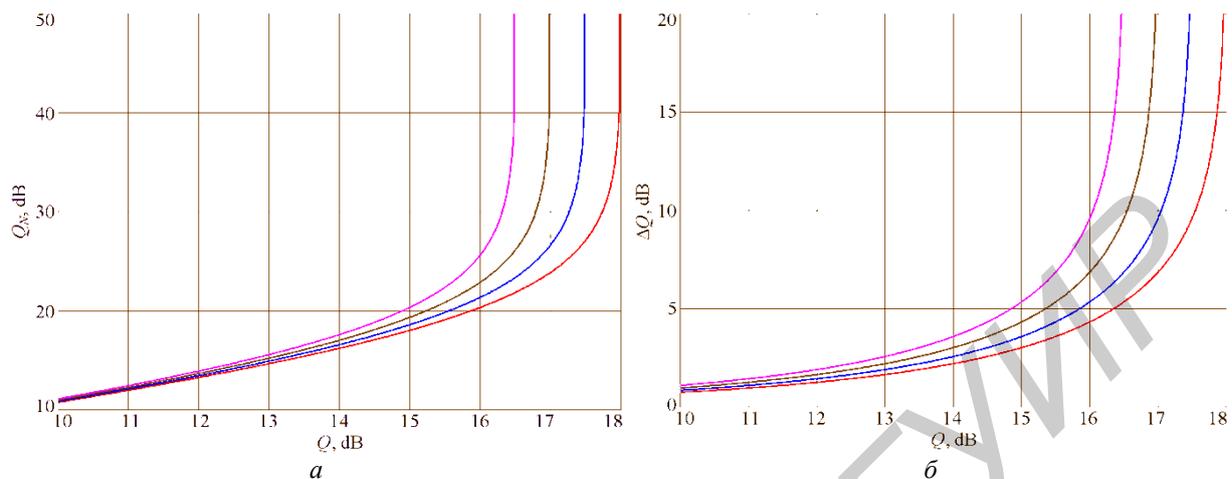


Рис. 2. Графики зависимости Q_N (а) и зависимости $\Delta Q = Q_N - Q$ (б) от значения Q для $Q_{CL} = 16,5 \dots 18$ дБ с шагом 0,5 дБ ($Q_{CL} = 16,5$ – левые крайние кривые, $Q_{CL} = 18$ – правые крайние кривые)

В результате оказывается возможным оценить, насколько запас по уровню полезного сигнала на входе радиоприемника АС, отмеченный выше в п.п. 1, 3, необходим и достаточен для обеспечения требуемого качества сотовой связи, принимая во внимание, что

- в сетях GSM $Q \geq 9$ дБ [10];
- в типовых квазирегулярных трехсекторных сотовых радиосетях GSM, в которых число выделенных сети радиоканалов в 4...7 раз превышает число радиоканалов, используемых в трехсекторном сайте, внутрисистемная ЭМС обеспечивается на уровне $Q_{CL} = 15 \dots 20$ дБ. С этим согласуется определение уровня чувствительности приемников АС GSM на уровне -104 дБм [10], что на 10 дБ превосходит уровень собственных шумов приемника АС;

- при оценке необходимого уровня ЭИИМ БС сети GSM в городской застройке необходимо учитывать затухание сигналов БС в зданиях. По данным [5] затухание радиоволн в зданиях на уровне земли составляет примерно 18...19 дБ для GSM-900 и примерно 16...17 дБ для GSM-1800, по данным [6] основные потери на проникновение радиоволн диапазона UHF на этажи здания зависят от номера этажа и принимают значения в пределах 2,5...16,5 дБ, в соответствии с [8] медианное значение этого затухания может составлять для помещений на уровне земли порядка 11 дБ для GSM-900/1800 при среднеквадратическом отклонении 6 дБ. При территориальной плотности 3...5 БС/км² следует считаться с тем, что в помещении присутствуют сигналы от нескольких окружающих БС, и связь устанавливается по «наилучшему» каналу. Поэтому реальный предел затухания радиоволн в зданиях для сотовой связи может быть принят равным 18...20 дБ.

Таким образом, приведенные результаты моделирования фрагмента сотовой сети стандарта GSM свидетельствуют о следующем.

1. При ЭИИМ БС 53 дБм/канал, используемой в настоящее время операторами GSM в Республике Беларусь на городских территориях, запас по уровню полезного сигнала на входе радиоприемника АС, отмеченный выше в п.п. 1, 3 и создаваемый для компенсации влияния внутрисетевой помехи на качество сотовой связи, составляет 13...15 дБ для АС на дворовой территории, 22...26 дБ для АС на проезжей части, и 20...22 дБ для АС в пределах пешеходной зоны. Такой большой запас по уровню полезного сигнала на входе радиоприемника АС с одной стороны является причиной завышенных значений ЭИИМ БС, а с другой стороны допускает низкое качество частотного планирования сети в городской застройке.

2. При ЭИИМ БС 43 дБм/канал (20 Вт/канал) запас по уровню полезного сигнала на входе радиоприемника АС, создаваемый для компенсации влияния внутрисетевой помехи на

качество сотовой связи, составляет 3...5 дБ для АС на дворовой территории, 12...16 дБ для АС на проезжей части, и 10...12 дБ для АС в пределах пешеходной зоны. Такой запас ориентирован на более высокое, но вполне достижимое качество частотного планирования сети в городской застройке, обеспечиваемое как за счет увеличения объема радиочастотного ресурса, используемого сетью, так и за счет развития инфраструктуры сети, сопровождающегося дроблением сайтов (что позволяет увеличить значение Q_{CL}), а также за счет оптимизации сети.

3. Полученные результаты позволяют определить возможные пути снижения уровня внутрисетевой помехи и увеличения Q_{CL} , либо уменьшения значения добавки ΔQ . В частности:

– уменьшение размеров сайтов (уменьшение зон обслуживания отдельных БС) при фиксированной пространственной плотности АС (пространственной плотности трафика в часы наибольшей нагрузки) позволяют снизить объем трафика, обслуживаемого каждой отдельной БС, и уменьшить число частотных каналов, необходимое для ее функционирования. При фиксированном объеме радиочастотного ресурса, выделенного для рассматриваемой сотовой сети, это позволяет увеличить размерность кластера ее частотно-территориального планирования (или увеличить отношение общего числа частотных каналов сети к числу частотных каналов, используемых отдельной БС, при использовании «оптимизационных» методов частотного планирования сотовых сетей нерегулярной пространственной топологии) и увеличить значение Q_{CL} ;

– ограничение требований к качеству сотовой связи на некотором разумном (стандартном) уровне, чрезмерность этих требований может быть очевидной причиной необходимого роста ΔQ и использования сотовыми операторами существенно избыточных уровней ЭИИМ БС, что крайне нежелательно с точки зрения электромагнитной экологии густонаселенных территорий и электромагнитной безопасности населения.

Заключение

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что ЭИИМ БС на уровне 53 дБм/канал, используемая в настоящее время операторами GSM в Республике Беларусь на городских территориях, является существенно избыточной и ориентирована на низкое качество частотно-территориального планирования сети в городской застройке.

Приведенные в данной работе результаты иллюстрируют специфический состязательный характер отношений Лицензиара и Лицензиата в области строительства сетей сотовой связи. Величина ΔQ представляет собой резерв, обеспечивающий возможность Лицензиату экономить на инвестициях в инфраструктуру сотовой связи. К сожалению, эта экономия осуществляется за счет электромагнитной экологии сотовой связи и электромагнитной безопасности населения территорий, на которых эта экономия имеет место.

Снижение ЭИИМ БС на городских территориях до уровня 43...45 дБм/канал при одновременном увеличении объема используемого каждой из сетей радиочастотного ресурса, высвобождаемого за счет конверсии радиочастотного спектра, и продолжении операторами работ по дальнейшему развитию инфраструктуры сетей за счет увеличения территориальной плотности БС в городской застройке с учетом требований оптимизации городских фрагментов сетей, представляется вполне реальным, так как при этом запас по уровню полезного сигнала на входе радиоприемников АС, создаваемый для компенсации влияния внутрисетевой помехи на качество сотовой связи, остается достаточным для обеспечения высокого качества связи.

Представленные результаты позволяют оценить возможность снижения мощности излучения БС в городской застройке наряду с высокими требованиями к внутрисистемной электромагнитной совместимости. Они показывают, что завышенный средний уровень ЭИИМ БС может быть рассмотрен как один из важнейших факторов, принимаемый во внимание при диагностике качества внутрисистемной электромагнитной совместимости в сети сотовой связи.

Количественные результаты, приведенные выше, получены для сети сотовой связи стандарта GSM. Однако в настоящее время технологическая эволюция сотовой связи ассоциируется со все более широким использованием сотовой связи третьего (UMTS) и четвертого (LTE) поколений при существенном снижении доли услуг, реализуемых в рамках сотовой связи второго поколения (GSM). По этой причине авторы намерены продолжить

исследования, касающиеся получения количественных оценок необходимых и достаточных уровней ЭИИМ БС в сетях сотовой связи третьего, четвертого и последующих поколений.

ESTIMATION OF ACCEPTABILITY OF REDUCTION THE RADIATED POWER OF CELLULAR BASE STATIONS IN URBAN AREA AT HIGH REQUIREMENTS TO THE INTRASYSTEM ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY

V.I. MORDACHEV, A.S. SVISTUNOV

Abstract

Results of estimation of necessary and sufficient levels of radiation power of base stations of cellular communications on urban area are resulted. Analysis is made on the basis of the behavior simulation of the fragment of a GSM network executed with the use of multibeam radiowave propagation model and the topological model of a fragment of urban area of the central part of Minsk. The results indicate that a high communication quality can be achieved at levels of base stations equivalent isotropic radiated power which are essentially less than the corresponding levels actually used by GSM/UMTS operators in considered territory.

Список литературы

1. *Мордачев В.И., Свистунов А.С.* // Докл. БГУИР. 2013. № 7 (77). С. 44–50
2. СанПиН «Гигиенические требования к установке и эксплуатации систем сотовой связи». Утв. Пост. Министерства здравоохранения Республики Беларусь № 14 от 01.02.2010.
3. Оценка риска для здоровья населения от воздействия электромагнитных полей, создаваемых базовыми станциями сотовой подвижной электросвязи и широкополосного беспроводного доступа. Инструкция по применению. Утв. Гл. государств. санитарн. врачом Республики Беларусь 28.06.2010, Рег. № 093–0610.
4. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 15 июля 2006 г. № 890 «Об установлении порядка определения размера ежегодной, разовой платы и платы за выделение радиочастотного спектра».
5. *Siwiak K.* Radiowave propagation and antennas for personal communications. London, 1998.
6. *Parsons J.D.* The mobile radio propagation channel. New Jersey, 2000.
7. Wireless InSite: Site-specific radio propagation prediction software. Reference manual. February, 2014. Ver. 2.7.1.
8. Rec. ITU-R P.1812 A path-specific propagation prediction method for point-to-area terrestrial services in the VHF and UHF bands.
9. *Mehrotra A.* Cellular Radio: Analog and Digital Systems. London, 1994.
10. Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+). Radio Transmission and Reception (GSM 05.05 version 8.5.1 Release 1999). ETSI EN 300 910, V 8.5.1 (2001-11).

УДК 621.396.96

ЭВРИСТИЧЕСКАЯ ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ АНТЕНН RFID-СИСТЕМЫ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КОМБИНИРОВАННОГО МЕТОДА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ

Ю.Б. ГИМПЛЕВИЧ, Д.А. САВОЧКИН

Севастопольский национальный технический университет
Университетская, 33, Севастополь, 99053, Украина

Поступила в редакцию 14 января 2015

Проведена адаптация четырех эвристических алгоритмов оптимизации (генетического алгоритма, алгоритма роста растений, алгоритма имитации отжига, алгоритма роя частиц) к задаче поиска наилучшего размещения антенн при использовании комбинированного метода пространственной двумерной RFID-локализации. В ходе эксперимента наилучший вариант размещения антенн получен с помощью алгоритма имитации отжига.

Ключевые слова: RFID, локализация, эвристическая оптимизация, размещение антенн, генетический алгоритм, алгоритм роста растений, алгоритм имитации отжига, алгоритм роя частиц.

Введение

С целью определения местоположения объектов внутри закрытых помещений часто используют системы на базе технологии радиочастотной идентификации (radio frequency identification, RFID) [1]. При использовании таких систем двумерная оценка местоположения объектов рассчитывается путем обработки измерительной информации, которую получают с помощью нескольких антенн от RFID-меток, установленных на объектах. Для повышения точности локализации при вычислении оценок местоположения могут использоваться комбинированные методы локализации, включающие в себя несколько алгоритмов. Каждый из таких алгоритмов формирует независимую оценку местоположения объекта, после чего вычисляется общая оценка в виде среднего от сформированных оценок [2].

Важным вопросом при создании систем пространственной локализации является поиск такого размещения антенн, которое позволяет достичь максимальной точности локализации [3–4]. При этом для каждой антенны ищется точка расположения в двумерном пространстве размещения антенн (обычно на потолке помещения) и угол поворота (при использовании направленных антенн). В настоящей работе проводится адаптация известных эвристических алгоритмов оптимизации к проблеме размещения антенн при реализации комбинированного метода локализации, а также количественное сравнение эффективности алгоритмов.

Критерий оптимальности размещения антенн

Рассматриваемый в работе комбинированный метод локализации включает в себя три базовых алгоритма: алгоритм трилатерации, алгоритм отпечатков и алгоритм пересечений [2]. Целевая функция $S(a)$ оптимизации размещения антенн вычисляется с учетом факторов, характеризующих оптимальность размещения при реализации базовых алгоритмов. Критерием оптимальности является максимум целевой функции $S(a)$, задаваемой в виде выражения

$$S(a) = c_1' a^2 c_1 a^3 \left[w_{\text{трил}} a \overline{S_{\text{трил}}(a)} + w_{\text{отп}} a \overline{S_{\text{отп}}(a)} + w_{\text{пер}} a \overline{S_{\text{пер}}(a)} \right], \quad (1)$$

где a – вектор координат точек размещения и величин поворотов антенн; $c'_1(a)$ – отношение площади той части центральной области зоны локализации, что покрыта зонами действия хотя бы одной антенны, к общей площади центральной области зоны локализации; $c_1(a)$ – отношение площади той части зоны локализации, что покрыта зонами действия хотя бы одной антенны, к общей площади зоны локализации; $w_{\text{трил}}(a)$, $w_{\text{отп}}(a)$, $w_{\text{пер}}(a)$ – весовые коэффициенты алгоритмов трилатерации, отпечатков и пересечений, соответственно; $S_{\text{трил}} a$, $S_{\text{отп}} a$, $S_{\text{пер}} a$ – нормированные величины факторов $S_{\text{трил}}(a)$, $S_{\text{отп}}(a)$, $S_{\text{пер}}(a)$, характеризующих оптимальность размещения антенн при реализации алгоритмов трилатерации, отпечатков и пересечений, соответственно (нормирование проводится с целью приведения к общему диапазону допустимых значений).

Весовые коэффициенты $w_{\text{трил}}(a)$, $w_{\text{отп}}(a)$, $w_{\text{пер}}(a)$ задаются следующим образом:

$$\begin{cases} w_{\text{трил}} a = c_3 a / 3; \\ w_{\text{отп}} a = w_{\text{пер}} a = \frac{1}{3} \left[1 + \frac{1 - c_3 a}{2} \right], \end{cases}$$

где $c_3(a)$ – отношение площади той части зоны локализации, что покрыта зонами действия трех или более антенн, к общей площади зоны локализации.

В качестве фактора $S_{\text{трил}}(a)$ используется усредненная величина коэффициента горизонтального снижения точности (horizontal dilution of precision, HDOP):

$$S_{\text{трил}} a = \frac{1}{|L_3 a|} \int_{l \in L_3 a} h a, l dl,$$

где $|L_3(a)|$ – площадь той части зоны локализации, что покрыта зонами действия трех или более антенн; $L_3(a)$ – множество точек той части зоны локализации, что покрыта зонами действия трех или более антенн; $h(a, l)$ – величина HDOP для точки l [5].

В качестве фактора $S_{\text{отп}}(a)$ используется коэффициент покрытия зоны локализации:

$$S_{\text{отп}}(a) = \frac{1}{|L|} \int_{l \in L} c a, l dl,$$

где $|L|$ – площадь зоны локализации; L – множество точек зоны локализации; $c(a, l)$ – число зон действия, внутри которых находится точка l при размещении антенн согласно вектору a .

В качестве фактора $S_{\text{пер}}(a)$ используется величина средней ошибки локализации, обеспечиваемой алгоритмом пересечений:

$$S_{\text{пер}}(a) = \frac{1}{|L|} \int_{l \in L} e(a, l) dl,$$

где $e(a, l)$ – ошибка локализации для точки l при размещении антенн согласно вектору a , которая определяется как расстояние между точкой l и оценкой местоположения RFID-метки, формируемой алгоритмом пересечений при расположении метки в точке l [6].

Эвристические алгоритмы оптимизации

Высокая степень нелинейности целевой функции (1) не позволяет аналитически сформировать выражение для нахождения ее максимума. Вариант полного перебора всех возможных значений a также является невозможным, поскольку при необходимости размещения достаточно большого числа антенн вычислительная сложность такого перебора будет крайне велика. В связи с этим мы предлагаем использовать эвристические алгоритмы оптимизации. В данном разделе мы приводим краткое описание четырех алгоритмов оптимизации (генетического алгоритма, алгоритма роста растений, алгоритма имитации отжига, алгоритма роя частиц) и описываем процесс их адаптации к нашей задаче.

Генетический алгоритм оптимизации (genetic algorithm, GA) функционирует согласно принципам эволюции в животном мире [7]. В ходе работы алгоритма вначале создается популяция из P особей (решений задачи оптимизации) со случайными параметрами. При случайном создании особей учитываются два условия: антенны не должны находиться ближе, чем на 50 см друг к другу; зоны действия антенн должны покрывать минимум 85 % зоны локализации. С помощью этих условий мы сужаем начальное пространство решений путем исключения заведомо неоптимальных вариантов для увеличения быстродействия алгоритма.

Далее для каждой из особей рассчитывается значение функции приспособленности (целевой функции решения). После этого выбирается E особей с наибольшими значениями функции, называемые элитами. Все элиты переходят в следующую эпоху (итерацию цикла оптимизации). Кроме этого выбранная случайным образом часть элит мутирует (происходит случайное изменение нескольких параметров соответствующих решений). Сформированные в результате мутации M особей также переходят в следующую эпоху. Помимо этого часть элит скрещивается между собой (формируются новые особи, у которых часть параметров соответствует параметрам одного из родительских особей, а часть – параметрам другого). Сформированные при этом C особей также переходят в следующую эпоху. Все остальные особи популяции отмирают (соответствующие решения задачи оптимизации удаляются из рассмотрения). В следующей эпохе заново формируется $P - E - M - C$ новых особей и процесс эволюции (поиска решений) продолжается дальше, пока не будет достигнут критерий останова (в настоящей работе – по прошествии восьми часов). Результатом работы алгоритма считается то решение, для которого было получено максимальное значение целевой функции за все время работы. В нашей реализации алгоритма мы использовали следующие параметры: общий размер популяции $P = 20$; количество элит в популяции $E = 4$; количество мутирующих особей в популяции $M = 5$; количество особей формируемых в ходе скрещивания $C = 2$.

Процедура мутации особи для нашей проблемы размещения антенн была сформирована следующим образом. Для каждой из антенн выполняются поочередно следующие действия:

1) с вероятностью 0,5 делается 10 попыток изменить позицию антенны по каждой из координат (x и y) на случайную величину, распределенную нормально с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением равным 4 см. Попытка считается успешной, если в результирующем размещении все антенны находятся на расстоянии как минимум 50 см друг от друга. Если хотя бы одна попытка успешна, то дальнейшие попытки не проводятся;

2) с вероятностью 0,5 изменяется величина φ поворота антенны на случайную величину, распределенную нормально с нулевым математическим ожиданием и среднеквадратическим отклонением 9° .

Процедура скрещивания двух особей (a_1 и a_2) формулируется следующим образом. Создается полная копия особи a_1 : $a_c \leftarrow a_1$. Далее в зоне локализации случайным образом выбирается некоторая точка. Для каждой из особей a_2 и a_c находится по одной антенне, расположенной ближе всего к этой точке. После этого позиция и величина поворота найденной антенны особи a_c заменяются позицией и величиной поворота найденной антенны особи a_2 . Результатом процедуры скрещивания является особь a_c .

Алгоритм роста растений (plant growth algorithm, PGA) базируется на принципе развития растений [8]. В ходе работы алгоритма вначале формируется одно случайное решение задачи оптимизации (в терминологии алгоритма – корень), которое записывается в массив решений (при этом учитываются два условия формирования размещений антенн, представленные в описании генетического алгоритма). Далее запускается цикл поиска оптимального решения. На каждой итерации цикла выбирается одно из уже имеющихся в массиве решений. Вероятность p_i выбора i -го решения a_i при этом определяется как

$$p_i = \frac{S(a_i) - \beta \cdot \min_{j \in J} [S(a_j)]}{\sum_{k \in J} \left\{ S(a_k) - \beta \cdot \min_{l \in J} [S(a_l)] \right\}},$$

где β – коэффициент, позволяющий задать степень, с которой уменьшаются величины целевой функции относительно минимального значения в массиве решений (мы задали его равным $\beta = 0,7$); J – множество номеров решений содержащихся в массиве решений.

После выбора одного из решений создается Q его копий, называемых листьями. Каждый лист случайным образом видоизменяется (принцип видоизменения аналогичен процедуре мутации генетического алгоритма), после чего для него считается величина целевой функции. Далее все листья, у которых величина целевой функции больше величины целевой функции того решения, которое использовалось как прообраз, добавляются в массив решений. В конце итерации из массива решений стираются все решения кроме B решений с наибольшими значениями целевой функции. Результатом работы алгоритма считается то решение, для которого было получено максимальное значение целевой функции за все время работы. В нашей реализации алгоритма мы использовали следующие параметры: количество листьев на каждой итерации $Q = 5$; количество оставляемых решений в массиве решений $B = 5$.

Алгоритм имитации отжига (simulated annealing algorithm, SAA) основан на физическом процессе, происходящем при отжиге вещества [9]. В ходе работы алгоритма первоначально формируется одно случайное решение задачи (рабочее решение) с учетом двух условий, представленных в описании генетического алгоритма, а также задается начальная температура T . Далее запускается цикл поиска оптимального решения. На каждой итерации цикла имеющееся решение задачи случайным образом видоизменяется (принцип видоизменения аналогичен процедуре мутации генетического алгоритма), после чего для него рассчитывается величина целевой функции. Если величина целевой функции нового решения оказывается выше предыдущего, то новое решение используется далее в качестве рабочего. Если же величина целевой функции оказывается меньше, то новое решение также может быть выбрано в качестве рабочего, но с определенной вероятностью r_i , которая вычисляется как

$$r_i = \exp\{[S(a_i) - S(a_{i-1})]/T\},$$

где $S(a_i)$, $S(a_{i-1})$ – величины целевой функции нового и рабочего решений, соответственно.

В конце итерации цикла температура T снижается путем умножения на некоторый коэффициент охлаждения Y . Результатом работы алгоритма считается последнее рабочее решение. В качестве дополнительной меры решения проблемы выхода из локальных экстремумов использовалась процедура возвращения решения назад в случае отсутствия улучшения в течение V итераций. В своей реализации алгоритма авторы использовали следующие параметры: начальная температура $T = 1$; коэффициент охлаждения $Y = 0,992$; число итераций без улучшения, после которых происходит возвращение, $V = 10$.

Алгоритм роя частиц (particle swarm algorithm, PSA) основан на логике поведения стай птиц или косяков рыбы [10]. В ходе работы алгоритма первоначально создается K случайных решений задачи оптимизации (частиц в терминологии алгоритма) с учетом двух условий представленных в описании генетического алгоритма. Для каждой частицы случайным образом задается ее начальная скорость в пространстве решений в виде вектора скорости. В нашем случае вектор скорости содержит N элементов (N – число антенн системы), где в каждом элементе содержатся компоненты скорости изменения позиции антенны по x и y координатам, а также скорость вращения антенны. После создания частиц и задания их начальных скоростей запускается цикл поиска оптимального решения. На каждой итерации цикла проводится перерасчет скоростей частиц, после чего частицы перемещаются в пространстве решений на расстояние, определяемое с учетом их скоростей. В конце каждой итерации для каждой частицы вычисляется величина целевой функции. В качестве результата работы алгоритма выдается наилучший результат, полученный за все время среди всех частиц.

Вектор $V_{i,j}$ скорости i -й частицы на j -й итерации вычисляется согласно выражению

$$V_{i,j} = \omega V_{i,j-1} + 2 \cdot U(0,1) \cdot \{a_{i,best} - a_{i,j}\} + 2 \cdot U(0,1) \cdot \{a_{best} - a_{i,j}\}$$

где $\omega = 0,9$ – коэффициент инерции, постепенно уменьшающийся на каждой итерации, пока не достигнет значения $0,2$; $V_{i,j-1}$ – вектор скорости i -й частицы на $(j-1)$ -й итерации; $U(0,1)$ – случайная величина, распределенная равномерно от 0 до 1 ; $a_{i,best}$ – наилучшая позиция (вектор размещения антенн) i -й частицы за все время работы алгоритма до j -й итерации; a_{best} –

наилучшая позиция среди всех частиц за все время работы алгоритма до j -й итерации; a_{ij} – позиция i -й частицы на j -й итерации.

Расчет новой позиции a_{ij} i -й частицы на j -й итерации проводится путем сложения вектора $a_{i,j-1}$ i -й частицы на предыдущей итерации с рассчитанным вектором скорости V_{ij} . При этом в случае выхода значений позиций антенн за пределы зоны локализации (отрицательные значения или значения большие размера зоны) мы выполняли возврат значений в допустимую область, а также меняли знак соответствующей компоненты вектора скорости.

Экспериментальная часть

Мы провели поиск оптимального размещения 16 антенн RFID-системы с помощью четырех описанных в предыдущем разделе эвристических алгоритмов. Поиск размещения проводился для зоны локализации с размером $5 \text{ м} \times 5 \text{ м}$. Зоны действия антенн задавались в виде эллипсов с размерами малой и большой осей равными 1,6 м и 2,5 м соответственно. Зоны неуверенного приема задавались в виде эллипсов с размерами осей равными 1,9 м и 3 м (под зоной неуверенного приема подразумевается такая зона, в пределах которой RFID-метки отвечают антенне с вероятностью большей нуля, но меньшей единицы).

Вычисления проводились на компьютере с процессором Intel Core i5 с частотой 1,8 ГГц и объемом оперативной памяти 4 ГБ. Расчет значений HDOP, коэффициента покрытия и ошибки локализации алгоритма пересечений (для последующего их использования при вычислении значений целевой функции (1)) проводился в точках зоны локализации с шагом в 2 см. При этом каждый алгоритм запускался по 10 раз на 8 часов. Такое время работы было выбрано экспериментально, после того как было замечено, что для всех четырех алгоритмов дальнейшая их работа практически не улучшает результат. Кроме того, данное значение было выбрано и из чисто практических соображений: общее время вычислений заняло более 13 суток, и дальнейшее увеличение времени работы было сочтено нецелесообразным.

После нахождения алгоритмами оптимальных векторов размещения антенн и соответствующих им значений целевой функции были вычислены основные параметры распределения величин целевой функции для каждого алгоритма (см. таблицу).

Параметры распределения величин целевой функции, полученные в ходе десятикратного выполнения алгоритмов оптимизации

Алгоритм оптимизации	Величина целевой функции			
	Наилучшее значение	Наихудшее значение	Среднее значение	Стандартное отклонение
GA	0,5129	0,5023	0,5080	0,003635
PSA	0,4865	0,4666	0,4759	0,007917
SAA	0,5277	0,5139	0,5179	0,004060
PGA	0,5143	0,4989	0,5088	0,005659

На рис. 1 представлен график процесса работы алгоритмов (зависимость величины целевой функции $S(a)$ от времени работы t алгоритма). Значения на графике сформированы путем усреднения величин, полученных в ходе 10 запусков алгоритмов.

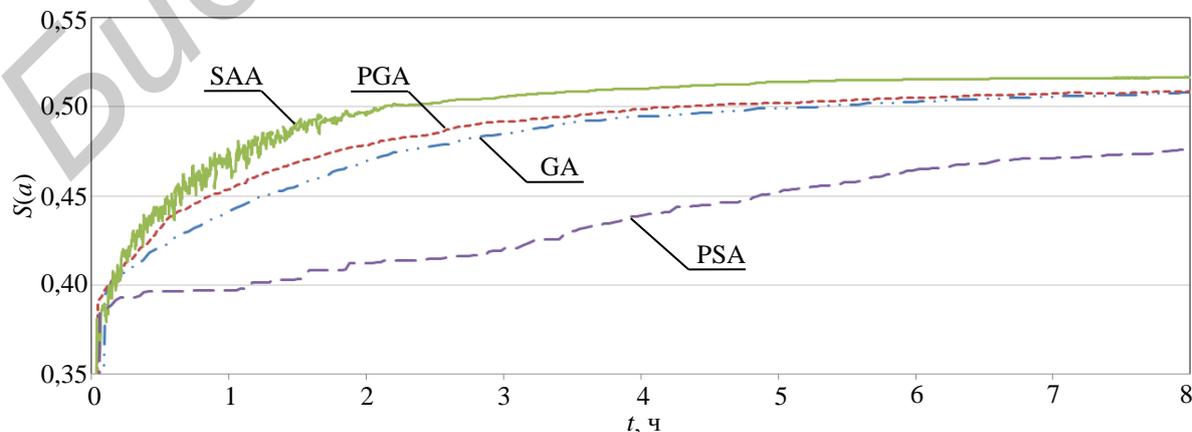


Рис. 1. Зависимость величины целевой функции $S(a)$ от времени t работы алгоритма

На рис. 2 представлены наилучшие варианты размещения антенн, полученные каждым из алгоритмов оптимизации (величины целевой функции для этих вариантов представлены во втором столбце таблицы).

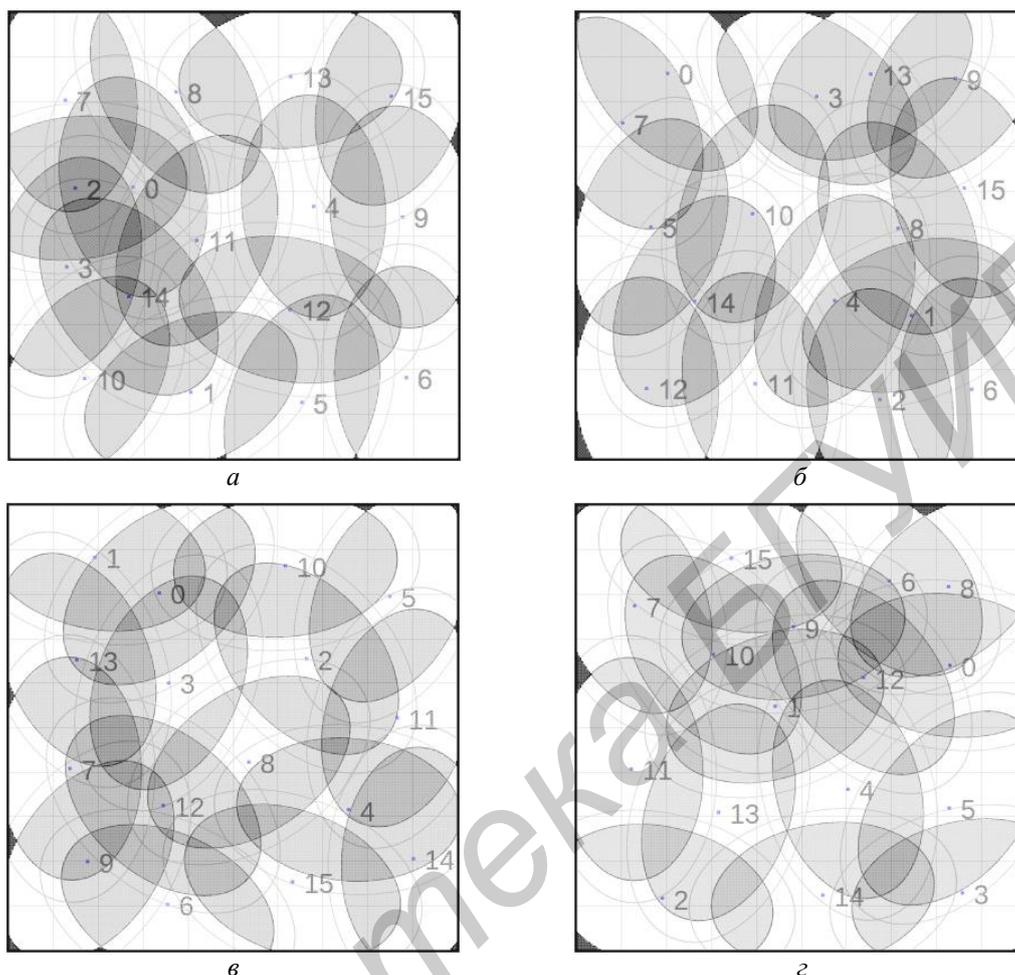


Рис. 2. Наилучшие варианты размещения антенн, полученные в ходе работы алгоритмов GA (а), PSA (б), SAA (в), PGA (г)

По результатам, представленным в таблице и на рис. 1, видно, что наилучшее размещение антенн (величина целевой функции 0,5277) получено алгоритмом имитации отжига, в то время как наихудшее (величина целевой функции 0,4865) получено при использовании алгоритма роя частиц. Наиболее стабильные (среди 10 перезапусков) результаты получены генетическим алгоритмом: величина стандартного отклонения равна 0,003635.

Высокую эффективность алгоритма имитации отжига можно объяснить тем, что он последовательно пытается улучшить единственное рабочее решение, в то время как все остальные алгоритмы постоянно работают с некоторым массивом решений, что очевидно существенно замедляет их работу. Так, за 8 часов работы алгоритм имитации отжига успевал выполнить около 3300 итераций, в то время как все остальные алгоритмы выполняли за это же время от 200 до 500 итераций. Этот эффект нельзя считать недостатком алгоритмов GA, PGA и PSA, поскольку их работа сразу над несколькими решениями должна помогать в преодолении проблемы выхода из локальных экстремумов. Можно было бы даже ожидать, что эти алгоритмы решат такую проблему успешнее, чем алгоритм имитации отжига (который может выйти из локального экстремума только на ранних итерациях, пока величина температуры T еще достаточно высока). Однако был достигнут обратный результат. Авторы считают, что это произошло по той причине, что использованная процедура видоизменения решений на каждой итерации (мутация в терминологии генетического алгоритма) предполагает возможность существенного (хоть и маловероятного) изменения позиций антенн за раз. При этом появляется

возможность выйти сколь угодно далеко из любого локального экстремума. Вероятно, благодаря этому алгоритм имитации отжига и работал достаточно быстро и при том эффективно.

Кроме этого, интересен тот факт, что алгоритм роя частиц показал в рассматриваемом случае самый плохой результат, хотя в литературе он описывается как достаточно эффективный. Авторы полагают, что это произошло по той причине, что во всех остальных алгоритмах при видоизменении решений использовалось два условия: нахождения антенн не ближе чем на 50 см друг к другу; требования покрытия как минимум 85 % зоны локализации зонами действия антенн. Эти условия позволяли не выполнять трудозатратную (время выполнения до 15 секунд) операцию по вычислению величины целевой функции для тех решений, которые заведомо неоптимальны. В алгоритм роя частиц не удалось привести такие условия из-за его принципа работы, предполагающего использование скоростей изменения частиц (решений задачи оптимизации). В связи с этим существенная часть времени работы алгоритма тратилась на расчет целевой функции для заведомо плохих вариантов размещения антенн. Возможно, если каким-то образом разработать реализацию алгоритма роя частиц, совмещающую его классический принцип работы с вышеприведенными условиями, то можно будет ожидать повышения его эффективности.

Заключение

Разработаны реализации четырех эвристических алгоритмов оптимизации для решения задачи размещения антенн RFID-системы при использовании комбинированного метода двумерной пространственной локализации. В ходе экспериментальных исследований наилучшее размещение 16 антенн в зоне локализации размером 5 м×5 м получено с помощью алгоритма имитации отжига. В будущем планируется сравнить эффективность рассмотренных в работе алгоритмов с некоторыми другими эвристическими алгоритмами (муравьиный алгоритм, алгоритм бактерий и др.).

HEURISTIC OPTIMIZATION OF ANTENNA DEPLOYMENT FOR COMBINATIONAL TWO-DIMENSIONAL RFID-BASED LOCALIZATION METHOD

Yu.B. GIMPILEVICH, D.A. SAVOCHKIN

Abstract

Four heuristic optimization algorithms (genetic algorithm, plant growth algorithm, simulated annealing algorithm, particle swarm algorithm) are adapted to the problem of the search for the best antenna deployment using a combinational RFID-based two-dimensional localization method. During the experiment the best antenna deployment was obtained by the simulated annealing algorithm.

Список литературы

1. Zhou J., Shi J. // Journal of intelligent manufacturing. 2009. Vol. 20, № 6. P. 695–707.
2. Savochkin D.A. // MIKON 2014. Gdansk, 16–18 June 2014. P. 563–566.
3. Ji Y., Biaz S., Wu S. et al. // ICCCN. Honolulu, 13–16 August 2007. P. 251–256.
4. Fang S.H., Lin T.-N. // WCNC. Sydney, 18–21 April 2010. P. 1–4.
5. Levanon N. // IEE Proceedings - radar, sonar and navigation. 2000. Vol. 147, № 3. P. 149–155.
6. Savochkin D.A. // Матер. конф. «РТ-2014». Севастополь, 12–17 мая 2014. С. 70.
7. Guan Q., Liu Y., Yang Y. et al. // ISDA'06. Jinan, 16–18 October 2006. Vol. 2. P. 567–572.
8. Yihua H., Shilei L. // ICCM. Seoul, 24–26 April 2012. Vol. 1. P. 196–201.
9. Farkas K., Huszak A., Godor G. // Informatics & IT today. 2013. Vol. 1, № 1. P. 28–33.
10. Gong Y.J., Shen M., Zhang J. et al. // IEEE TII. 2012. Vol. 8, № 4. P. 900–912.

УДК 66.067.124:537.811

ФОРМОВАНИЕ ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6 Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 7 апреля 2015

Приведены результаты исследования процесса получения высокоэффективных пористых материалов из металлических порошков методом формования в электромагнитном поле. Определены оптимальные режимы формования пористых материалов, применяемых в качестве фильтрующих элементов.

Ключевые слова: электромагнитное поле, пористый материал, частица, фильтрующий элемент.

Введение

Одним из перспективных направлений создания высокоэффективных пористых материалов является использование в процессе формования электромагнитного поля [1–3]. К настоящему времени накоплен определенный теоретический и экспериментальный материал о влиянии параметров электромагнитного поля на процессы формования ферромагнитных порошков и на их физико-механические характеристики. Однако отсутствует научно-обоснованный выбор параметров электромагнитного поля при формовании пористых материалов, используемых в качестве фильтрующих элементов.

Поэтому целью данной работы является проведение теоретических и экспериментальных исследований процесса формования ППМ в электромагнитном поле и установлении основных закономерностей взаимодействия частиц порошка с электромагнитным полем, позволяющих прогнозировать эксплуатационные характеристики получаемых пористых материалов.

Теоретическое описание процесса формования ферромагнитных частиц под воздействием электромагнитного поля

Рассмотрим возникновение сил магнитного поля, действующих на ферромагнитные частицы порошка. При заполнении формы для спекания, расположенной на сердечнике электромагнита, ферромагнитным порошком, согласно законам ферромагнетизма возникают силы взаимодействия между частицами и формой, которые стремятся прижать ферромагнитные частицы к основанию формы для спекания. Магнитное поле в области его действия (расстояние между поверхностью слоя порошка и рабочей поверхностью полюсного сердечника) в направлении силы тяжести неоднородно, а вектор магнитной индукции направлен по нормали к рабочей поверхности полюсного сердечника. При этом частицы порошка наибольшей осью l_{\max} могут быть расположены как вдоль силовых линий, так и под углом α к магнитным силовым линиям (рис. 1).

Находясь в зоне действия магнитного поля, частицы намагничиваются, при этом наибольший магнитный момент будет в плоскости, проходящей через наибольшую ось металлической частицы.

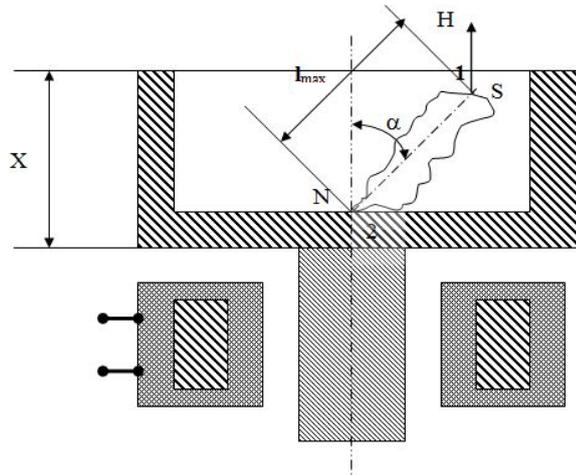


Рис. 1. Схема сил, действующих на частицу и ориентирующих ее в магнитном поле

Если напряженность в точке 1 будет H_1 , то напряженность в точке 2, где расположен противоположный полюс

$$H_2 = H_1 + \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) x, \quad (1)$$

где $\frac{\Delta H}{\Delta x}$ – градиент магнитного поля; x – расстояние действия магнитного поля от поверхности слоя порошка до дна формы.

Магнитные силы, действующие на частицу, соответственно будут равны

$$F_{M1} = mH; \quad (2)$$

$$F_{M2} = mH + m \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) x, \quad (3)$$

где m – магнитная масса ферромагнитной частицы.

При положительном градиенте $F_{M2} > F_{M1}$ и на ферромагнитную частицу действует пара сил с моментом

$$M = M_r H \sin \alpha, \quad (4)$$

где $M_r = ml$ – магнитный момент ферромагнитной частицы.

Следовательно, ферромагнитная частица в неоднородном магнитном поле, действующем в радиальном направлении рабочего зазора, будет поворачиваться, стремясь занять такое положение, при котором его наибольшая ось будет параллельна внешнему магнитному полю. Магнитный момент ферромагнитной частицы зависит от ее размеров и магнитных свойств материала. С учетом того, что форму частиц металлического порошка в первом приближении можно представить в виде эллипсоида вращения, их магнитный момент будет равен

$$M_r = \frac{4}{3} \pi a b^2 k_M H, \quad (5)$$

где $a = l_{\max}/2$; $b = l_{\min}/2$ – полуоси эллипсоида l_{\max} и l_{\min} наибольший и наименьший размеры частицы; k_M – магнитная восприимчивость; H – напряженность магнитного поля.

Уравнение для расчета силы, действующей вдоль магнитного поля можно представить в следующем виде:

$$F_{Mr} = \frac{4}{3} \pi a b^2 k_M \left(\frac{\Delta H}{\Delta x} \right) \cos \alpha. \quad (6)$$

Необходимо отметить, что внешнее магнитное поле, создаваемое катушками электромагнитной системы, наводит в ферромагнитных частицах свое локализованное

магнитное поле, которое взаимодействует с магнитными полями формы и полями ферромагнитных частиц порошка.

Магнитный поток, созданный локализованным магнитным полем, стремится замкнуться через контур, имеющий наименьшее магнитное сопротивление. Если по соседству окажутся две ферромагнитные частицы, то их магнитные поля замкнутся взаимно через эти частицы. Если же ферромагнитные частицы окажутся возле оснастки, то их локализованные поля замкнутся через поверхность оснастки. В первом случае частицы окажутся прижатыми друг у другу, а во втором прижатыми к поверхности формы для спекания. В прижатых друг к другу ферромагнитных частицах наводится новое магнитное поле и соответственно возникает магнитный момент. Наведенное новое локализованное поле взаимодействует с полями новых ферромагнитных частиц, и таким образом происходит формирование цепочек, состоящих из частиц, сориентированных по направлению силовых линий электромагнитного поля.

Исследование влияния параметров электромагнитного поля и свойств исходных порошков на процесс их ориентации вдоль силовых линий

К факторам, влияющим на процесс электромагнитного формирования порошка, можно отнести магнитную восприимчивость, частоту и напряженность электромагнитного поля, размер частиц, влажность, температуру материала и т.д. Эффективность магнитной ориентации металлических частиц главным образом определяется магнитной восприимчивостью частиц порошка, которая при прочих равных условиях определяет величину магнитной силы, необходимой для ориентации вдоль силовых линий. Размер частиц порошка существенно влияет на процесс их ориентации в магнитном поле, так как от размеров частиц зависит величина и роль сил, участвующих в процессе ориентации. Влияние размеров частиц на характер силового режима ориентации можно определить принципиально для трех основных диапазонов:

- 1) для порошков с размером частиц более 500 мкм, когда силы тяжести значительно превышают силы адгезионного слипания;
- 2) для порошков с размером частиц от 50 до 500 мкм, когда адгезионные силы приблизительно равны силам тяжести;
- 3) для порошков с размером частиц менее 50 мкм, когда адгезионные силы превышают силы тяжести и металлический порошок состоит из отдельных конгломератов. На рис. 2 представлены результаты экспериментальных исследований влияния размеров частиц порошка ($D_{\text{ч}}$) на их магнитную восприимчивость (χ). Измерения проводили при напряженности электромагнитного поля, равном 30,0 Э.

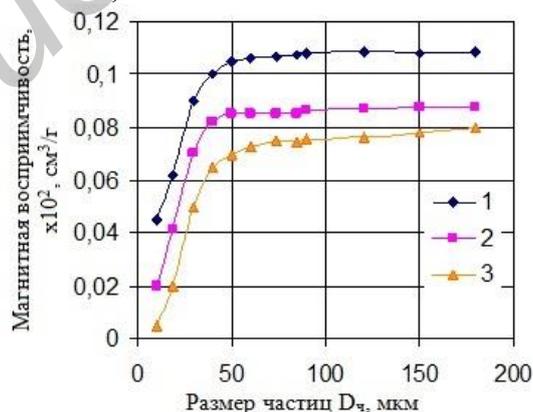


Рис. 2. Зависимость величины магнитной восприимчивости от размеров частиц металлического порошка: 1 – ПЖ-3; 2 – ПН-1; 3 – ШХ-15

Снижение магнитной восприимчивости происходит особенно резко в области размеров частиц, близких к доменным размерам. Из рис. 2 видно, что в области размеров частиц менее 30 мкм кривая $\chi = f(D_{\text{ч}})$ резко падает. Эта зависимость отражает изменения энергии намагничивания на единицу объема ферромагнетика. На основании полученных результатов исследований можно сделать вывод, что для формирования анизотропных поровых структур с

помощью электромагнитного поля необходимо использовать порошки с размером частиц более 30 мкм.

Ориентация частиц порошка с размером менее 30 мкм значительно сложнее, чем крупных, это обусловлено тем, что высокоразвитая поверхность частиц мелкого порошка имеет большие значения удельной свободной поверхностной энергии, что приводит к адгезионному слипанию отдельных частиц, т.е. к их агломерации. Для разделения агломератов необходимо приложить силовое поле, которое должно быть выше адгезионных сил, и в зависимости от начального положения частиц, больше сил тяжести.

На рис. 3 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости длины агломератов сориентированных частиц от их размеров и частоты магнитного поля.

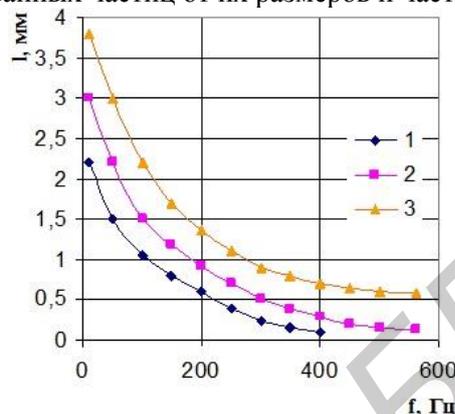


Рис. 3. Зависимость длины магнитной флоккулы от частоты магнитного поля порошка ПЖ-3 с размерами частиц: 1 – (50–100); 2 – (100–160); 3 – (200–315) мкм

Зависимости рис. 3 показывают, что с увеличением частоты магнитного поля длина сформированных флоккул уменьшается. Поэтому для формирования анизотропных поровых структур наиболее предпочтительно применять электромагнитную систему постоянного тока, или переменный ток низкой частоты, причем частицы с большим размером имеют большую длину магнитных флоккул.

На рис. 4 представлены результаты экспериментальных исследований зависимости напряженности электромагнитного поля (H), способного сориентировать частицы порошка вдоль силовых линий, от толщины слоя порошка (h).

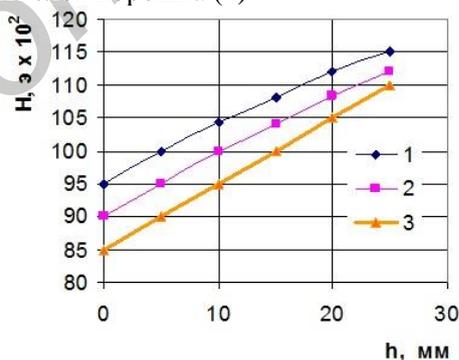


Рис. 4. Зависимость величины напряженности электромагнитного поля H , способного сориентировать частицы от толщины слоя порошка марки ПЖ-3 с размерами частиц: 1 – (0,315–0,2); 2 – (0,16–0,1); 3 – (0,1–0,063) мм

Результаты экспериментальных исследований подтверждают ранее сделанные расчеты и сделанные выводы, что наиболее трудно сориентировать частицы с малым размером, которые удалены от поверхности формы.

Исследование процесса получения пористых материалов с помощью электромагнитного поля

На основании проведенных теоретических и экспериментальных исследований процесса ориентации частиц порошка в электромагнитном поле была рассчитана и изготовлена установка для формования ППМ с анизотропной поровой структурой.

Установка включает однородный соленоид, оптимальные размеры которого были определены расчетным путем и проверены экспериментально. Внутренний диаметр составил 80 мм. Пределы регулировки напряженности были выбраны от 0 до 1000 э. Внутри соленоида помещен магнитный стержень длиной 65 мм и диаметром 75 мм. Форма для спекания была изготовлена из биметалла, нижний слой которого был изготовлен из ферромагнитного материала (сталь 45), а верхний – из коррозионностойкой стали марки X18H9T. При установке на сердечник, форма притягивалась к сердечнику, и не отрывалась в процессе формования.

Исследования процесса формования пористых материалов состояли в проведении экспериментов по определению влияния величины электромагнитного поля, размеров частиц, на пористость, размеры пор и проницаемость полученных материалов. На рис. 5. приведены результаты экспериментальных исследований влияния напряженности электромагнитного поля на пористость для железного порошка марки ПЖ-3.

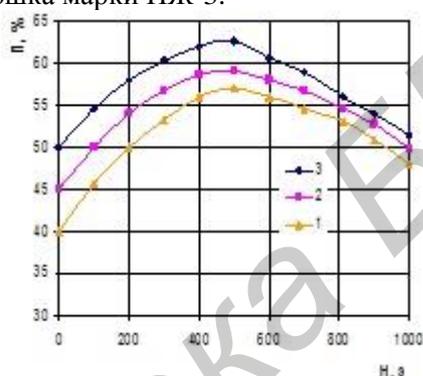


Рис. 5. Зависимость пористости образцов от напряженности магнитного поля при формовании порошка марки ПЖ3: 1 – (0,2–0,315); 2 – (0,1–0,16); 3 – (0,063–0,1) мм

Данные результатов исследований показывают, что наименьшая пористость образцов достигается при напряженности магнитного поля, равном 400 э. Результаты экспериментальных исследований влияния напряженности магнитного поля на величину коэффициента проницаемости и средних размеров пор представлены на рис. 6.

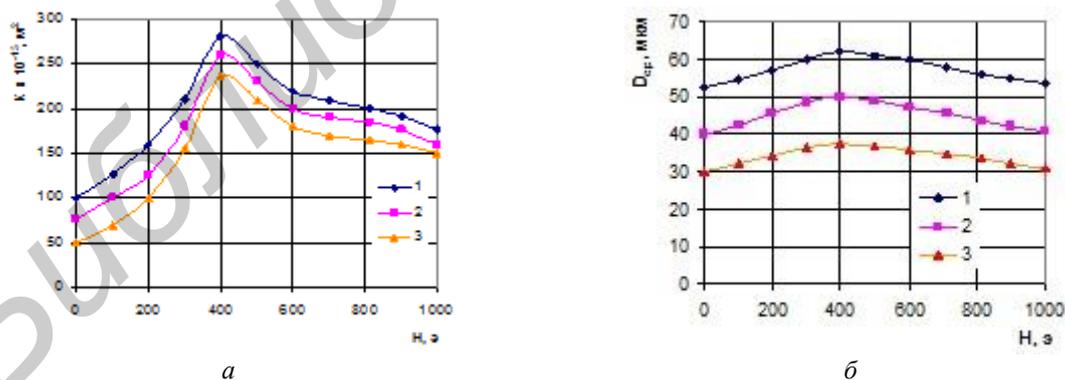


Рис. 6. Зависимость коэффициента проницаемости K (а) и средних размеров пор (б) от напряженности магнитного поля при формовании из порошков марки ПЖ3: 1 – (0,2–0,315); 2 – (0,1–0,16); 3 – (0,063–0,1) мм

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что существуют определенные значения величин напряженности электромагнитного поля, при которых достигаются наиболее высокие эксплуатационные характеристики пористых материалов, применяемых в качестве фильтрующих элементов. Так, например, для железного порошка марки ПЖ-3 оптимальная величина напряженности электромагнитного поля составляет 400 э, т.к. при данной величине достигается максимальная проницаемость пористых материалов. Структура образца пористого материала, полученного формованием в электромагнитном поле представлена на рис. 7.



Рис. 7. Микроструктура пористого материала из порошка железа марки ПЖ-3, полученного методом формования в электромагнитном поле $\times 25$

Заключение

В работе выполнен комплекс теоретических и экспериментальных исследований процесса получения пористых материалов из металлических порошков методом формования в электромагнитном поле при наложении вибрации.

На основании проведенных исследований получены выражения, позволяющие рассчитать основные параметры электромагнитного поля, а также конструкционные параметры устройства, способного сориентировать заданный слой частиц порошка вдоль силовых линий.

MOLDING OF POROUS MATERIALS BY MEANS OF AN ELECTROMAGNETIC FIELD

L.P. PILINEVICH

Abstract

The researching results of receiving process of highly effective porous materials from metal powders by molding in an electromagnetic field are given. Molding optimal regime of the porous materials used as filter elements are defined.

Список литературы

1. *Ilyuschenko A.F., Pilinevich L.P., Rak A.L. et al.* // Proceedings of 15th International plansee seminar «Powder metallurgical high performance materials». 2001. Vol. 3. P. 248–261.
2. *Пилиневич Л.П., Тарновский И.Э.* // Матер. конф. «Новые материалы и технология их обработки». Минск, 22–23 апреля 2003 г. С. 122–123.
3. Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой методы получения / Под ред. П.А. Витязя. Минск, 2005.

УДК 621.396.96

МЕЖОБЗОРНАЯ КОМПЕНСАЦИЯ ДИСКРЕТНЫХ МЕШАЮЩИХ ОТРАЖЕНИЙ С ФОРМИРОВАНИЕМ КАРТЫ ПОМЕХ И НАКОПЛЕНИЕМ РЕШЕНИЙ

А.С. СОЛОНАР, С.А. ГОРШКОВ, П.А. ХМАРСКИЙ, А.М. ВАШКЕВИЧ

*Военная академия Республики Беларусь
Независимости, 220, Минск, 220057, Беларусь*

Поступила в редакцию 25 ноября 2014

Рассмотрен метод межобзорной селекции движущихся целей на фоне дискретных мешающих отражений с формированием карты помех и накоплением решений. Проведен сопоставительный анализ коэффициентов подавления одной карты помех с накоплением решений с двумя совмещенными картами помех для различных условий наблюдения.

Ключевые слова: дискретные мешающие отражения, селекция движущихся целей, компенсация, карта помех.

Введение и постановка задачи

Важной проблемой, возникающей при автоматизации процесса радиолокационного наблюдения в РЛС кругового обзора, является сложность выделения (селекции) радиолокационных отметок истинных целей на фоне ложных, называемых дискретными мешающими отражениями [1–3]. Дискретные мешающие отражения относятся к классу имитирующих помех. Они являются остатками компенсации мешающих отражений от объемно или поверхностно распределенных отражателей, сосредоточенных местных предметов или локальных неоднородностей атмосферы. Эти остатки наблюдаются на индикаторах кругового обзора в виде целеподобных отметок.

Дискретные мешающие отражения существенно затрудняют автоматизацию процесса межобзорного сопровождения целей в РЛС кругового обзора [2, 4–9]. Для борьбы с дискретными мешающими отражениями используют различные алгоритмы межобзорной селекции движущихся целей (МСДЦ) на фоне дискретных мешающих отражений, в основе которых лежат либо карты помех, либо алгоритмы селекции с одновременным сопровождением дискретных мешающих отражений и целей на этапе вторичной обработки.

Алгоритмы МСДЦ, в основе которых лежат карты помех, отличаются относительной простотой реализации, однако основным недостатком таких алгоритмов является невозможность использования предыстории перемещения дискретных мешающих отражений в пространстве. Алгоритмы, использующие селекцию с одновременным сопровождением дискретных мешающих отражений и целей, напротив, лишены основного недостатка карт помех, но при этом требуют больших вычислительных ресурсов и сложны в своей реализации.

Сочетание обоих алгоритмов позволяет повысить качество межобзорной селекции, при этом алгоритмы на основе карт помех используются для предварительной селекции. На рис. 1 представлена обобщенная структура устройства МСДЦ на фоне дискретных мешающих отражений. Для предварительной селекции дискретных мешающих отражений применяется карта помех, в задачу которой входит принятие решения о классе отметки (истинная или ложная). Класс выставляется каждой отметке в блоке установки класса отметки по схеме «или», после чего она выдается на устройство межобзорной селекции с одновременным сопровождением дискретных мешающих отражений и целей. По дискретным мешающим

отражениям не создаются новые траектории, хотя все отметки и траектории поступают к потребителю радиолокационной информации.

Для импульсных РЛС обзора методы МСДЦ с формированием карты помех бывают с накоплением решений и с усреднением по мощности. В основе формирования карт помех лежит принцип разбиения на ячейки всей зоны обзора РЛС в координатах азимут–дальность.

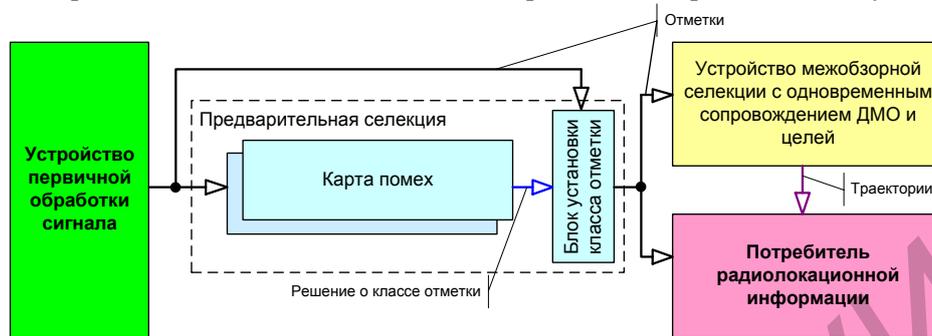


Рис. 1. Обобщенная структура устройства МСДЦ на фоне дискретных мешающих отражений

В картах помех с усреднением по мощности каждой ячейкой происходит некогерентное межобзорное накопление квадрата амплитуды принятого сигнала, попавшего в ячейку, с последующим вычислением среднего значения \bar{Z}_{cp} (средней мощности). Принятие решения о классе отметки, попавшей в ячейку, осуществляется путем сравнения квадрата модуля отраженного сигнала отметки $Z_{от}$ с порогом \bar{Z}_{cp} . Если $\bar{Z}_{cp} < Z_{от}$, принимается решение, что отметка истинная. Если объект от обзора к обзору перемещается с относительно малыми скоростями, то это приведет к увеличению порога \bar{Z}_{cp} и к принятию решения о том, что отметка ложная.

Для карт помех с накоплением решения в каждой ячейке происходит подсчет числа отметок, попавших в нее за несколько обзоров. Если это число превышает пороговое, то считается, что в данной ячейке находится помеха (эта ячейка помечается бланком запрета автоматического обнаружения траекторий на этапе вторичной обработки, т.е. ячейка бланкирована). Отметки, попавшие в такую ячейку, считаются ложными. С точки зрения практической реализации, карты помех с накоплением решений проще по сравнению с картами помех с усреднением по мощности.

Пространственная избирательность карт помех определяется размерами ячейки, которые выбираются равными нескольким размерам элемента разрешения РЛС. При этом цели, находящиеся вблизи элемента разрешения, содержащего дискретные мешающие отражения, будут также бланкированы. Если цель попадает в область пространства с большим числом дискретных мешающих отражений, то вероятность ее обнаружения существенно снижается, т.к. значительная часть пространства радиолокационного наблюдения оказывается покрытой бланками. Кроме того, возникает эффект кромки при компенсации движущихся дискретных мешающих отражений, появляющийся вследствие задержки времени принятия решения критерийным обнаружителем при переходе дискретных мешающих отражений из одной пространственной ячейки в другую.

Авторами статьи предлагается использовать не одну, а две совмещенные карты помех с взаимно перекрывающимися ячейками для уменьшения числа отметок от остатков компенсации перемещающихся мешающих отражений (для уменьшения времени переходных процессов в карте помех) [6].

Цель статьи – сравнение эффективности одной карты помех с накоплением решений с двумя совмещенными картами.

Постановка задачи. Рассмотрим зону обнаружения двухкоординатной РЛС кругового обзора, которая имеет следующие характеристики: максимальная дальность обнаружения $r_{max} = 45000$ м; $\Delta\beta = 2^\circ$, $\Delta r = 120$ м – разрешающая способность по азимуту и дальности, соответственно; интервал обновления данных T равен 8 с.

Задача – провести сравнение эффективности одной карты помех с накоплением решений с двумя совмещенными картами методом математического моделирования для различных условий наблюдения.

Принципы формирования карты помех с накоплением решений

Классическая карта помех (см. рис. 2 – вторая карта помех) представляет собой зону обнаружения, разбитую на ячейки (элементы разрешения) по азимуту и дальности. В классической карте помех используется только одна карта (вторая карта помех на рис.2) с размерами ячеек:

$$B = (2 \div 10) \Delta\beta, R = (2 \div 10) \Delta r,$$

где B – размер ячейки по азимуту в градусах; R – размер ячейки по дальности в метрах; $\Delta\beta$ – разрешающая способность по азимуту в градусах; Δr – разрешающая способность по дальности в метрах.

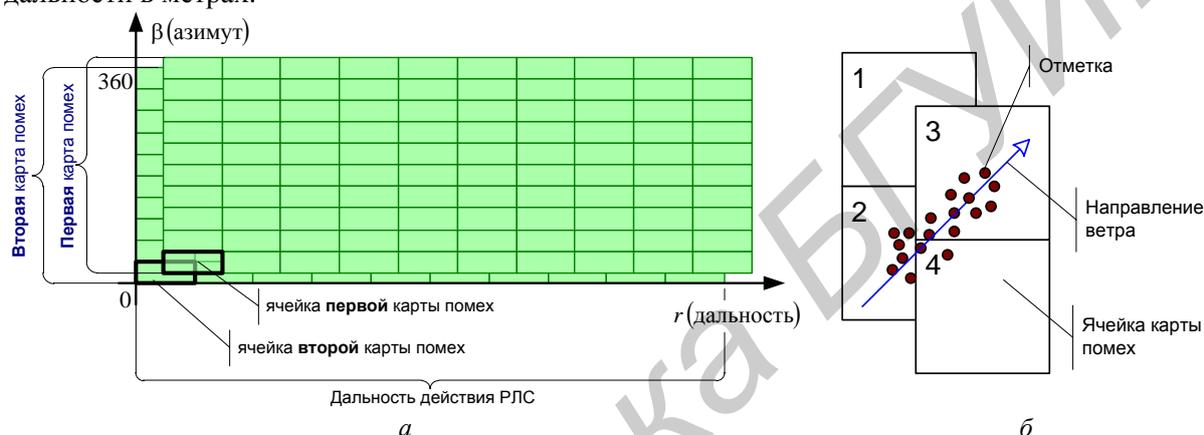


Рис. 2. Принцип разделения зоны обнаружения РЛС при построении карты помех (а) и пояснение необходимости перекрытия ячеек карты помех (б)

В каждой ячейке карты помех с накоплением решений на $(k+1)$ -ом обзоре РЛС осуществляется:

1) подсчет числа S_{k+1} единичных решений $\varphi_i (i = k - M + 1, \dots, k + 1)$ обнаружения попадания отметки (отметок) в ячейку за M идущих подряд обзоров:

$$S_{k+1} = \sum_{i=k-M+1}^{k+1} \varphi_i, \text{ где } \varphi_{k+1} = \begin{cases} \text{если отметка попала в ячейку в } i\text{-ом обзоре;} \\ 0, \text{ наоборот;} \end{cases}$$

2) принятие решения об обнаружении помехи в ячейке критерийным обнаружителем K из M :

$$\chi = \begin{cases} 1, \text{ если } S_{k+1}^{\zeta} = \sum_{i=k-M+1}^{k+1} \varphi_i \geq K; \\ 0, \text{ во всех других случаях.} \end{cases} \quad (1)$$

В ячейке должен быть реализован критерийный обнаружитель на базе сдвигающего влево буфера (см. рис. 3). Размер буфера равен M .



Рис. 3. Буфер критерийного обнаружителя

Обнаружение помехи в ячейке эквивалентно формированию бланка запрета автоматического обнаружения траектории на этапе вторичной обработки в пределах занимаемого этой ячейкой пространства. Отметки, пришедшие на $(k+1)$ -м обзоре, проверяются на предмет попадания в бланки запрета автоматического обнаружения. Если отметка попадает

в бланк, то ей ставится признак – «ложная отметка». По ложным отметкам на этапе вторичной обработки не происходит обнаружение траекторий.

Перемещение помехи из ячейки в соседнюю приведет к обнаружению помехи в соседней ячейке только через M обзоров, в соответствии с (1). В течение M обзоров отметки будут считаться истинными, что приведет к появлению ложных траекторий. Поэтому можно говорить, что число M определяет длительность переходных процессов в карте помех. Уменьшение M приводит к снижению качества селекции, увеличение – к увеличению длительности переходных процессов.

При проведении научных исследований авторами статьи было предложено использовать для предварительной селекции две карты помех вместо одной. При этом карты должны быть сдвинуты на величину $\Delta\beta/2$ по азимуту и $\Delta r/2$ по дальности (рис. 2, а). Признак «ложная отметка» выставляется, если отметка попадает в бланк хотя бы одной карты помех [6].

Сдвиг ячеек карт помех позволяет быстрее отреагировать на перемещение помехи в пространстве (перемещение помехи из ячейки в ячейку) по сравнению с одной картой помех. Идея заключается в том, что если для двух смежных ячеек одной карты помех будет наблюдаться переход помехи из ячейки в ячейку, то для ячеек другой карты помех этого перехода нет (рис. 2, б).

Результаты математического моделирования

Для проверки эффективности работы одной карты помех с накоплением решений с двумя совмещенными картами был разработан комплекс математического моделирования. Комплекс моделирования состоит из устройства формирования задающего воздействия (модель летательного аппарата и модель полета летательного аппарата); устройства формирования входного воздействия (модель РЛС); карты помех (устройство компенсации дискретных мешающих отражений); блока оценки показателей качества. *Задающее* воздействие представлено детерминированной полиномиальной моделью 1-го порядка и моделью случайного ускорения в виде некоррелированного гауссовского шума с нулевым математическим ожиданием и СКО случайного маневра равным $0,001 \text{ м/с}^2$. *Возмущающее* воздействие соответствовало ошибкам первичных измерений в двухкоординатной РЛС кругового обзора со среднеквадратическим отклонением по азимуту $0,45^\circ$ и по дальности 50 м.

Показатели качества. Качество работы РЛС с устройством межобзорной компенсацией дискретных мешающих отражений оценивают по степени различимости сигналов движущихся целей на фоне пассивных помех. Одним из основных показателей качества работы устройства компенсации мешающих отражений является коэффициент подавления помехи [2,6,10]: $K_{\text{п}} = 10 \cdot \lg \frac{P_{\text{пвх}}}{P_{\text{пвых}}}$, где $P_{\text{пвх}}$ – мощность некомпенсированного остатка пассивной помехи; $P_{\text{пвых}}$ – мощность пассивной помехи на входе системы подавления.

Для устройств межобзорной компенсации в качестве критерия вводится коэффициент подавления дискретных мешающих отражений $K_{\text{р}}$ [2,6,10], показывающий во сколько раз уменьшается число $n_{\text{вых ДМО}}$ ложных отметок (дискретных мешающих отражений) на выходе устройства предварительной селекции по сравнению с числом отметок $n_{\text{вх ДМО}}$ на его входе:

$$K_{\text{р}} = \frac{n_{\text{вых ДМО}}}{n_{\text{вх ДМО}}}.$$

Отметка, сформированная по остаткам компенсации мешающих отражений, считается подавленной (скомпенсированной), если ей установлен признак – «ложная отметка» (дискретное мешающее отражение).

При моделировании считалось, что на вход устройства предварительной селекции поступают отметки от $N_{\text{ц}}$ объектов, движущихся с одинаковой скоростью в одном направлении, начальные координаты траекторий объектов задавались случайным образом по всей зоне обзора РЛС перед началом моделирования. Считалось, что пропусков в обнаружении

объектов не происходит, за исключением случаев выхода их из зоны обнаружения РЛС. Было проведено два модельных эксперимента. В первом эксперименте для постоянной скорости объектов было проведено сопоставление коэффициентов подавления карты помех с накоплением решений с двумя совмещенными картами помех. Во втором модельном эксперименте исследовалось влияние скорости движения дискретных мешающих отражений и размеров ячейки карты помех на коэффициенты подавления карт помех.

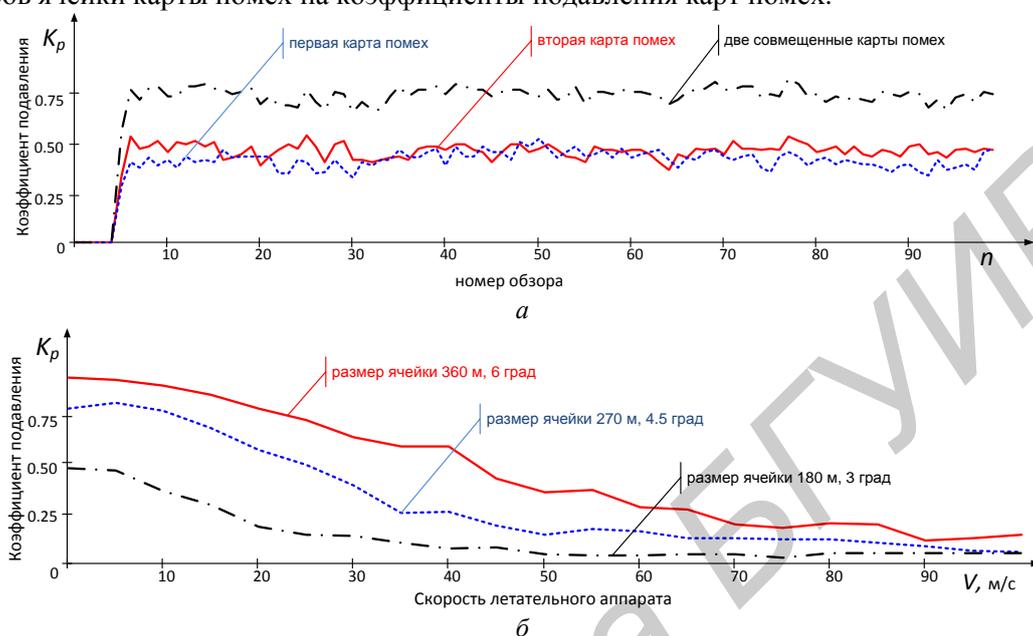


Рис. 4. Зависимость коэффициента подавления от: а – номера обзора (для первой, второй и двух совмещенных карт помех); б – скорости летательного аппарата и размеров ячейки (для двух совмещенных карт помех)

Модельный эксперимент 1. На рис. 4, а представлены коэффициенты подавления дискретных мешающих отражений карт помех при фиксированной скорости движения дискретных мешающих отражений. Скорость движения составляла 5 м/с, угол курса 300°. Видно, что в течение первых пяти обзоров пространства наблюдается переходной процесс (отсутствие подавления). Это явление, в первую очередь, связано с необходимостью выполнения критерия (пять из семи) об обнаружении помехи, заложенного в карту помех. Использование двух смещенных карт помех позволяет существенно увеличить коэффициент подавления (до 25 %) по сравнению с устройством, использующим только одну карту помех.

Модельный эксперимент 2. На рис. 4, б представлены показатели качества устройства межобзорной селекции движущихся целей для различных скоростей движения дискретных мешающих отражений и параметров карты помех. Видно, что коэффициент подавления уменьшается с уменьшением размера ячейки карты помех, что связано с невыполнением критерия об обнаружении (1) в пределах одной ячейки. При размерах ячейки карты помех равных 360 м по дальности и 6° по азимуту, цели, летящие со скоростью менее 45 м/с, с вероятностью 50 % могут быть определены как ложная отметка. При таких размерах ячеек карты помех велика вероятность бланкирования отметок целей. При размерах ячейки 270 м на 4,5° коэффициент подавления уменьшается приблизительно на 20 %, также уменьшается минимальная скорость цели (25 м/с). При дальнейшем уменьшении размеров ячеек карты помех (до 180 м на 3°) коэффициент подавления резко уменьшается и не превышает 0,5.

Для принятых характеристик РЛС, наилучшим будет размер ячейки 270 м на 4,5°, при котором устройство обработки обеспечивает подавление пассивных помех, радиальная скорость которых может составлять до 25 м/с.

Заключение

Дискретные мешающие отражения существенно затрудняют автоматизацию процесса межобзорного сопровождения целей в РЛС кругового обзора. Для компенсации дискретных

мешающих отражений используют различные алгоритмы межобзорной селекции движущихся целей на фоне дискретных мешающих отражений, в основе которых лежат либо карты помех, либо алгоритмы селекции с одновременным сопровождением дискретных мешающих отражений и целей на этапе вторичной обработки.

Рассмотрены особенности построения устройства межобзорной селекции движущихся целей на фоне дискретных мешающих отражений с формированием карты помех и с накоплением решений. Особенностью этого устройства является критерийное обнаружение факта наличия дискретных мешающих отражений в пределах ячейки карты помех. Отметки, попавшие в ячейку, в которой произошло обнаружение дискретных мешающих отражений, бланкируются.

Для снижения времени обнаружения дискретных мешающих отражений при переходе помехи из одной ячейки карты помех в соседнюю, предлагается использовать не одну, а две карты помех, смещенных друг относительно друга на половину размера одной ячейки. Результаты математического моделирования подтверждают необходимость использования двух смещенных карт помех – коэффициент подавления дискретных мешающих отражений увеличивается максимум на 25 %. Для принятых характеристик РЛС, наилучшим будет размер ячейки 270 м на 4,5°, при котором, устройство обработки обеспечивает подавление пассивных помех, радиальная скорость которых может составлять до 25 м/с.

MULTI-SCAN MOVING TARGET INDICATION WITH CLUTTER MAP AND STORAGE SOLUTIONS

A.S. SOLONAR, S.A. GORSHKOV, P.A. KHMARSKI, A.M. VASHKEVICH

Abstract

The multi-scan moving target indication with clutter map and storage solutions approach is considered. The estimation performance of compensation devices is compared.

Список литературы

1. Радиоэлектронные системы: основы построения и теория. Справочник / Под ред. Я.Д. Ширмана. М., 2007.
2. Плекин В.Я. Цифровые устройства селекции движущихся целей. М., 2003.
3. Охрименко А. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч.1. Основы радиолокации. М., 1983.
4. Кузьмин С.З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации. М., 1974.
5. Фарина А., Студер Ф. Цифровая обработка радиолокационной информации. Сопровождение целей. М., 1993.
6. Солонар А.С., Горшков С.А. // Сб. научн. тр. МРФ «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Харьков, 22–24 октября 2008 г. С. 100–102.
7. Литвинов В.В., Жирнов В.В., Филюшкин И.П. // Судостроительная промышленность. Сер. РЛ. 1991. Вып. 29. С. 83–88.
8. Дохов А.И., Жирнов В.В. // Сборник научных трудов МРФ «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития», Харьков, 11–14 октября 2002 г. С. 54–57.
9. Горшков С.А., Солонар А.С., Седышев С.Ю. // Тез. докл. Международной НТК «Теория и техника передачи и обработки информации», Харьков, 7–10 октября 2003 г. С. 193–194.
10. Справочник по радиолокации / Под ред. М.И.Скольника. Пер. с англ. М., 2014.

УДК 537.2:621.38

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАКСИМАЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ РАЗРЯДОВ СТАТИЧЕСКОГО ЭЛЕКТРИЧЕСТВА И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ДИОДЫ ШОТТКИ

В.А. СОЛОДУХА, В.Л. ЛАНИН*, Я.А. СОЛОВЬЕВ

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 14 апреля 2015

Предложена методика прогнозирования допустимых потенциалов разрядов статического электричества положительной и отрицательной полярности с напряжением до 15 кВ на структуры диодов Шоттки с охранным кольцом.

Ключевые слова: статическое электричество, разряды, диоды Шоттки, охранный кольцо.

Введение

Электростатические разряды (ЭСР) создают весьма значительные потери в производстве и эксплуатации полупроводниковых приборов. Многие исследования показывают, что ЭСР вызывают 16–22 % отказов у изготовителей приборов, 9–15 % у различных субподрядчиков, 9–13 % у изготовителей электронной аппаратуры, и 27–33 % у потребителей аппаратуры [1]. Общеизвестно отрицательное влияние ЭСР, в первую очередь, на интегральные схемы МОП- и ОП-ИС. Электростатические разряды вызывают такие виды повреждений, как тепловой пробой *p-n*-перехода, образование в оксиде пустот, расплавление металлических проводников и др. Некоторые биполярные приборы также чувствительны к ЭСР. Особенно опасны ЭСР для ТТЛ ИС с барьером Шоттки, которые пробиваются при энергии ЭСР в 2–3 раза меньшей, чем необходимо для пробоя ТТЛ ИС. Это происходит вследствие меньшего размера барьера Шоттки [2].

Развитие и совершенствование диагностических методик, направленных на определение работоспособности полупроводниковых приборов в тех или иных условиях эксплуатации, требует достаточно больших материальных затрат, что в большинстве случаев обусловлено высокой стоимостью диагностического оборудования. В настоящее время наиболее оптимальное решение минимизации затрат при получении данных по устойчивости ИС к воздействию ЭСР достигается с помощью моделирования. Построение моделей во многом зависит от правильного выбора физических параметров, влияющих на достоверность полученных результатов, а также математического аппарата, позволяющего максимально адекватно описать и оценить полученный результат [3, 4].

Методика эксперимента

Повреждения диодов Шоттки с охранным кольцом (рис. 1) импульсами ЭСР происходит, как правило, в области закругления охранного кольца из-за пробоя и *p-n*-перехода и барьеров Шоттки, когда сквозь них формируются проводящие каналы. Диод Шоттки может подвергаться воздействию ЭСР как положительной, так и отрицательной полярности. Эквивалентные схемы разряда статического электричества приведены на рис. 2. При воздействии импульса ЭСР положительной полярности диодная структура окажется под

прямым смещением, а, значит, ток разряда будет протекать непосредственно через контакт металл–полупроводник диода Шоттки и частично через $p-n$ -переход охранного кольца.

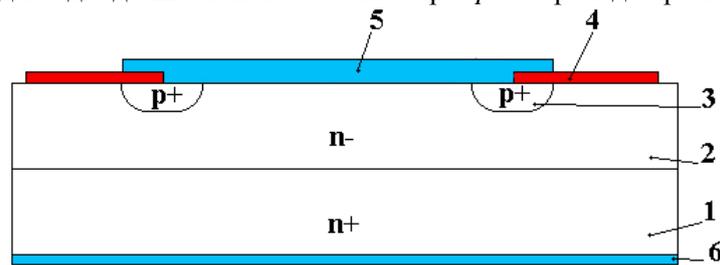


Рис. 1. Структура диода Шоттки с охранным кольцом: 1 – подложка; 2 – эпитаксиальный слой; 3 – охранный слой; 4 – защитный слой; 5 – металлизация анода; 6 – металлизация катода

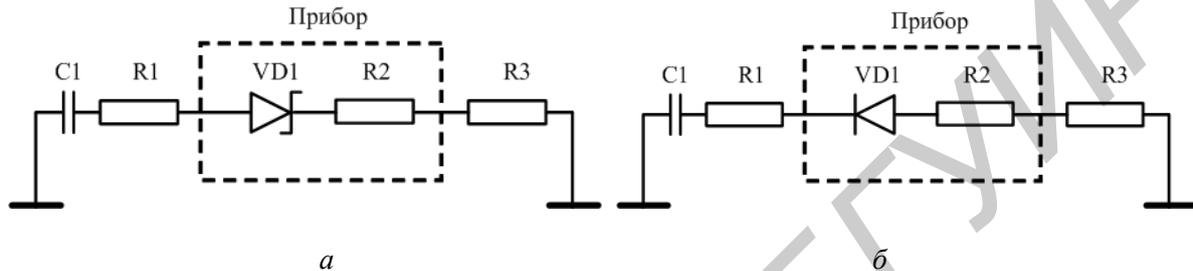


Рис. 2. Эквивалентные схемы разряда статического электричества через диод Шоттки: а – для импульсов положительной полярности, б – для импульсов отрицательной полярности

Учитывая, что доля тока, протекающего через контакт металл-полупроводник, на 2–3 порядка превосходит долю тока, протекающего через $p-n$ -переход охранного кольца, эквивалентная схема разряда статического электричества положительной полярности соответствует приведенной на рис. 1, а. При рассмотрении модели человека, держащего металлический предмет (метод ИЕС 61000-4-2), емкость $C1$ в расчетах принимается равной 150 пФ, а сопротивление $R1$ – 330 Ом [5]. Напряжение на диодной структуре $VD1$ соответствует падению напряжения на контакте металл-полупроводник при прямом смещении [6]:

$$V_D = \phi + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{I_P}{AT^2 S_k}\right), \quad (1)$$

где I_P – ток разряда, A – постоянная Ричардсона, T – абсолютная температура, q – заряд электрона, S_k – площадь выпрямляющего контакта металл–полупроводник, k – постоянная Больцмана, ϕ – высота барьера.

Сопротивление $R2$ соответствует последовательному сопротивлению диода и складывается из последовательного соединения сопротивлений эпитаксиального слоя R_{N-} и подложки R_{N+} :

$$R2 = R_{N-} + R_{N+}. \quad (2)$$

Величина сопротивления эпитаксиального слоя определяется выражением:

$$R_{N-} = \rho_{N-} \frac{d_{N-}}{S_k}, \quad (3)$$

где ρ_{N-} – удельное сопротивление эпитаксиального слоя, d_{N-} – его толщина.

В свою очередь:

$$R_{N+} = \rho_{N+} \frac{d_{N+}}{S_{N+}}, \quad (4)$$

где ρ_{N+} – удельное сопротивление подложки, d_{N+} – ее толщина, S_{N+} – площадь кристалла.

Сопротивление $R3$ соответствует контактному сопротивлению между прибором и землей, его величина будет пренебрежимо мала по сравнению с $R1$, поэтому в расчетных целях

принимается $R3 = 0$. Согласно теории Вунша–Белла, пороговая плотность мощности определяется зависимостью [7]:

$$P / S = \sqrt{\pi K_P C_P (T_{\max} - T_1) t}^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

где S – площадь перехода, K_P – коэффициент теплопроводности кремния, C_P – удельная теплоемкость кремния, T_{\max} – максимальная температура структуры, T_1 – рабочая температура структуры.

Теория Вунша–Белла предусматривает три случая отказа полупроводникового прибора из-за импульсного воздействия ЭСР [8].

Случай 1. Нагрев структуры от комнатной температуры до температуры плавления 675°C (отказ полупроводникового прибора из-за плавления алюминиевой металлизации). Уравнение (5) для данного случая принимает вид:

$$P / S = 1109,4 t^{\frac{1}{2}}. \quad (6)$$

Случай 2. Нагрев структуры от комнатной температуры до температуры плавления 1415°C (отказ полупроводникового прибора из-за плавления кремния). Уравнение (5) примет вид:

$$P / S = 1809,7 t^{\frac{1}{2}}. \quad (7)$$

Случай 3. Аналогичен случаю 2, но ток через структуру протекает не равномерно, а через горячие точки и энергия импульса рассеивается на $1/10$ от площади перехода. Тогда:

$$P / S = 180,9 t^{\frac{1}{2}}. \quad (8)$$

Учитывая, что рассеяние энергии импульсов ЭСР происходит в приповерхностной области полупроводника, в настоящей работе при расчете максимального допустимого потенциала использовали критерии, соответствующие случаям 2 и 3.

Постоянная времени схемы, представленной на рис. 2, а, определяется как:

$$\tau = (R1 + R2 + R3)C1. \quad (9)$$

Время действия импульса ЭСР, приведенного к прямоугольному импульсу:

$$t = 5\tau. \quad (10)$$

Средняя мощность, рассеиваемая структурой за время 5τ , равна [1]:

$$P = \frac{V_D I_P}{5} + \frac{I_P^2 R2}{10}. \quad (11)$$

Уравнение (11) решается относительно I_P численными методами оптимизации второго порядка, входящими в стандартный пакет функций табличного процессора EXCEL.

Результаты и их обсуждение

Расчеты максимально допустимых потенциалов ЭСР проводили для диодных структур с номинальным обратным напряжением 45 В (эпитаксиальный слой 5 КЭФ 0,6), 60 В (эпитаксиальный слой 6,5 КЭФ 1,2) и 100 В (эпитаксиальный слой 9 КЭФ 2,5) в диапазоне площадей контакта металл–кремний от 0,3 до 4 мм², согласно критериям для случаев 2 и 3. Результаты расчетов максимального допустимого потенциала импульса положительной полярности для диодных структур с номинальными обратными напряжениями 45 и 100 В, с площадью контакта металл–кремний 0,314 мм² и высотой барьера Шоттки 0,82 В представлены в табл. 1. Расчетные зависимости максимального допустимого потенциала импульса положительной полярности диодных структур приведены на рис. 3.

Таблица 1. Расчетные значения максимального допустимого потенциала импульса ЭСР положительной полярности

Номинальное обратное напряжение, В	Критерий	R_2 , Ом	τ , нс	t , мкс	P , Вт	I_p , А	V_D , В	U_p , кВ
45	Случай 2	0,49	49,6	0,248	2823,8	237,9	0,820	78,6
	Случай 3				282,4	74,1	0,818	24,5
100	Случай 2	3,87	50,1	0,250	2838,2	85,4	0,818	28,5
	Случай 3				283,8	26,8	0,816	8,9

Как видно из табл. 1, величина максимально допустимого потенциала импульса ЭСР положительной полярности снижается с увеличением номинального обратного напряжения диода Шоттки, что главным образом обусловлено увеличением сопротивления R_2 , определяемого толщиной эпитаксиального слоя и его удельным сопротивлением.

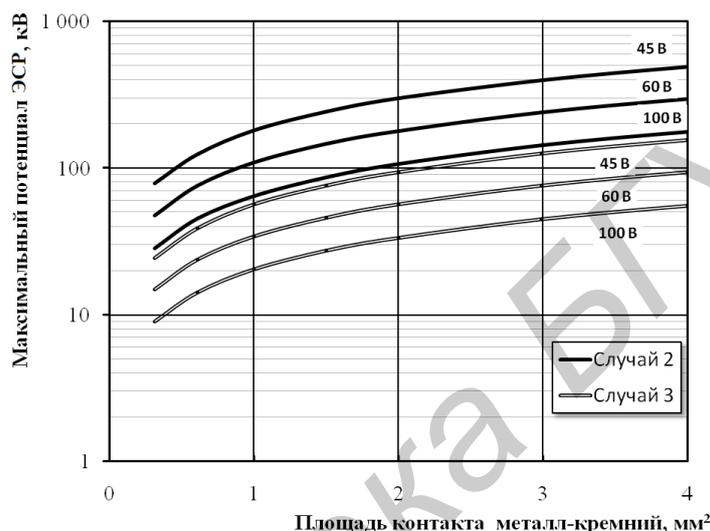


Рис. 3. Зависимости максимально допустимых потенциалов импульсов ЭСР положительной полярности для диодов Шоттки от номинальных обратных напряжений и площади контакта

Из рис. 3 видно, что величина максимально допустимого потенциала импульса ЭСР положительной полярности монотонно возрастает с увеличением площади контакта металл-кремний, что также обусловлено, в первую очередь, уменьшением сопротивления R_2 . Принимаем, что потенциал ЭСР, возникающий в рамках модели человека, держащего металлический предмет, составляет 15 кВ: таким образом, в рамках модели человека, держащего металлический предмет, для случая 2 гарантируется стойкость к импульсам ЭСР положительной полярности диодов Шоттки номинальным обратным напряжением до 100 В и с площадью перехода металл-кремний более 0,3 мм². Для случая 3 гарантируется стойкость к импульсам ЭСР положительной полярности диодов Шоттки номинальным обратным напряжением до 60 В при площади перехода металл-кремний более 0,3 мм², либо до 100 В при площади перехода металл-кремний более 0,6 мм².

При проведении испытаний по методу ИЕС 61000-4-2 (модель человека, держащего металлический предмет) импульсами ЭСР положительной полярности потенциалом 15 кВ на диодных структурах с площадью 0,314 мм² и с обратным напряжением 120 В отказы не зафиксированы. Таким образом, могут быть сделаны следующие выводы:

- прохождение тока разряда через диод Шоттки в прямом направлении происходит равномерно, без образования горячих точек;
- структура диода Шоттки с охранным кольцом гарантирует стойкость к воздействию импульсов ЭСР положительной полярности в рамках модели человека, держащего металлический предмет.

Эквивалентная схема разряда статического электричества отрицательной полярности соответствует рис. 2, б. Согласно модели человека держащего металлический предмет (метод ИЕС 61000-4-2) емкость C_1 в расчетах принимается равной 150 пФ, а сопротивление R_1 – 330 Ом. Воздействие на диод Шоттки импульсов ЭСР отрицательной полярности реализуется

путем их подачи на катодный вывод диодной структуры, представленной на рис. 1. При этом диодная структура окажется под обратным смещением.

Напряжение на диодной структуре VD1 (рис. 2, б) соответствует напряжению лавинного пробоя диодной структуры. Сопротивление R2 соответствует дифференциальному сопротивлению диодной структуры при обратном смещении. При этом очевидно, что обратное напряжение диодной структуры соответствует напряжению пробоя *p-n*-перехода охранного кольца и определяется толщиной и удельным сопротивлением эпитаксиального слоя, а также геометрией охранного кольца. В то же время дифференциальное сопротивление будет зависеть от толщины и удельного сопротивления эпитаксиального слоя, поскольку эпитаксиальный слой в структуре диода Шоттки обладает наибольшим электрическим сопротивлением, так как является элементом структуры с наименьшей концентрацией легирующей примеси.

Сопротивление R3 соответствует контактному сопротивлению между прибором и землей. В данном случае его величина будет пренебрежимо мала по сравнению с R1, поэтому в расчетных целях принимается $R3 = 0$.

Максимально допустимый потенциал импульса ЭСР отрицательной полярности определяли согласно критерию Вунша–Белла с использованием выражений (5–12). Для импульсов ЭСР отрицательной полярности в уравнении (11) в качестве значения параметра V_D использовали величину номинального обратного напряжения. Квадратное уравнение (11) в случае импульса ЭСР обратной полярности будет иметь единственное положительное решение относительно I_p , имеющее положительные значения [4]:

$$I_p = \frac{\sqrt{4U_D^2 + 40PR2} - 2U_D}{2R2}. \quad (12)$$

Анализ уравнений (1–12) показывает, что ключевыми параметрами, влияющими на устойчивость диодов Шоттки к импульсам ЭСР отрицательной полярности, являются дифференциальное сопротивление диодной структуры и площадь *p-n*-перехода охранного кольца. Экспериментальные исследования величины дифференциального сопротивления диодов Шоттки с размерами структуры 0,76×0,76 мм показали, что для структур с номинальным обратным напряжением 45 В оно составило 40 Ом, с номинальным обратным напряжением 60 В – 90 Ом, с номинальным обратным напряжением 100 В – 300 Ом.

Расчеты максимально допустимых потенциалов ЭСР проводили для диодных структур с номинальным обратным напряжением 45, 60 и 100 В с учетом приведенных выше значений дифференциальных сопротивлений и в диапазоне площадей *p-n*-переходов от 0,05 до 0,4 мм², согласно критериям Вунша–Белла для случаев 2 и 3. Результаты расчетов максимального допустимого потенциала импульса ЭСР отрицательной полярности для диодных структур с номинальными обратными напряжениями 45 и 100 В с площадью *p-n*-перехода охранного кольца 0,104 мм² (размеры кристалла диодной структуры 1,42×1,42 мм) представлены в табл. 2. Расчетные зависимости максимального допустимого потенциала импульса ЭСР отрицательной полярности диодных структур Шоттки приведены на рис. 4.

Таблица 2. Расчетные значения максимального допустимого потенциала импульса ЭСР отрицательной полярности

Номинальное обратное напряжение, В	Критерий	R2, Ом	τ, нс	t, мкс	P, Вт	I _p , А	V _D , В	U _p , кВ
45	Случай 2	40	55,5	0,278	5133	34,6	50	12,8
	Случай 3				513,3	10,1	50	3,8
100	Случай 2	300	94,5	0,473	3968,2	11,1	120	7,1
	Случай 3				696,8	3,26	120	2,1

Как видно из табл. 2, при одинаковых размерах и топологии диодной структуры при увеличении номинального обратного напряжения с 45 до 100 В максимально допустимый потенциал импульса ЭСР обратной полярности уменьшается почти в 2 раза. Данный эффект объясняется, главным образом, существенным ростом дифференциального сопротивления диодной структуры, обусловленным увеличением толщины эпитаксиального слоя с 5 до 10 мкм и его удельного сопротивления с 0,6 до 2,5 Ом·см.

При одинаковых значениях дифференциального сопротивления в рамках случая 2 (рис. 4) максимально допустимый потенциал импульса ЭСР отрицательной полярности более

15 кВ обеспечивается для диодных структур с номинальным обратным напряжением 45 В при площади p - n -перехода охранного кольца более $0,2 \text{ мм}^2$ (размер кристалла диодной структуры $2,5 \times 2,5 \text{ мм}$), с номинальным обратным напряжением 60 В – более $0,37 \text{ мм}^2$ (размер кристалла диодной структуры $4,57 \times 4,57 \text{ мм}$) и не обеспечивается для структур с номинальным обратным напряжением 100 В.

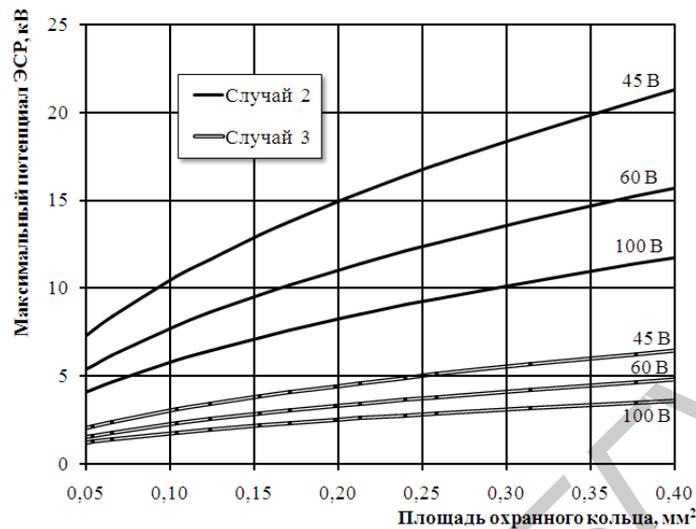


Рис. 4. Зависимости максимально допустимых потенциалов импульсов ЭСР отрицательной полярности для диодов Шоттки от величины обратных напряжений и площади охранного кольца

Таким образом, приведенные расчеты для случая 2 указывают на необходимость повышения стойкости диодных структур в диапазоне номинальных обратных напряжений от 45 до 100 В и площади p - n -переходов охранного кольца даже $0,6 \text{ мм}^2$ и более. То есть, диодные структуры, соответствующие случаю 3 критерия Вунша–Белла, не обеспечивают стойкость к импульсам ЭСР отрицательной полярности структур малой площади, в особенности при наибольшем номинальном обратном напряжении.

Также видно, что для одинаковых значений дифференциального сопротивления для случая 3 максимально допустимый потенциал импульса ЭСР отрицательной полярности более 15 кВ не обеспечивается для диодных структур в диапазоне номинальных обратных напряжений от 45 до 100 В и площади p - n -переходов охранного кольца от $0,6 \text{ мм}^2$ и более. То есть, диодные структуры, соответствующие случаю 3 критерия Вунша–Белла, не обеспечивают стойкость к импульсам ЭСР отрицательной полярности.

Заключение

1. На основе критериев Вунша–Белла разработана методика расчета максимальных допустимых потенциалов импульсов ЭСР положительной и отрицательной полярности, воздействующих на структуру диодов Шоттки с охранным кольцом, в соответствии с моделью человека, держащего металлический предмет (метод ИЕС 61000-4-2).

2. Расчеты показывают, что структура диода Шоттки с охранным кольцом с площадью контакта металл–кремний более $0,3 \text{ мм}^2$ и обратным напряжением до 120 В обеспечивает стойкость к воздействию импульсов ЭСР положительной полярности с напряжением до 15 кВ.

3. Стойкость диодов Шоттки с охранным кольцом к воздействию импульсов ЭСР отрицательной полярности с потенциалом 15 кВ в рамках критерия Вунша–Белла, соответствующего случаю 2 (отказ при воздействии импульса ЭСР обусловлен плавлением кремния), обеспечивается для структур с номинальным обратным напряжением 45 В при площади p - n -перехода охранного кольца более $0,2 \text{ мм}^2$ с номинальным обратным напряжением 60 В – более $0,37 \text{ мм}^2$, и не обеспечивается для структур с номинальным обратным напряжением 100 В.

4. Для обеспечения стойкости диодов Шоттки к ЭСР целесообразно определить ключевые конструктивно-технологические факторы, непосредственно влияющие на устойчивость диодов Шоттки к воздействию импульсов отрицательной полярности, и обеспечить их соответствие случаю 2 критерия Вунша–Белла.

FORECASTING OF MAXIMALLY ADMISSIBLE POTENTIALS OF THE STATIC ELECTRICITY CATEGORIES AND THEIR INFLUENCE TO THE SHOTTKI DIODES

V.A. SOLODUCHA, V.L. LANIN, Y.A. SOLOV'YOV

Abstract

The forecasting technique of admissible potentials of the static electricity categories of positive and negative polarity with voltage to 15 kV on structures of diodes Shottki with the guard ring is offered.

Список литературы

1. Горлов М.И., Емельянов А.В., Плебанович В.И. Электростатические заряды в электронике. Минск, 2006.
2. Строгонов А., Горлов М. // Компоненты и технологии. 2008. № 3. С. 188–192.
3. Кечиев Л.Н., Пожидаева Е.Д. Защита электронных средств от воздействия статического электричества. М., 2005.
4. Пискун Г.А., Алексеев В.Ф., Ланин В.Л. и др. // Докл. БГУИР. 2014, № 4 (82). С. 16–22.
5. ГОСТ 30804.4.2-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний.
6. Солодуха В.А., Турцевич А.С., Соловьев Я.А. и др. // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. 2012. № 5. С. 22–26.
7. Зи С.М. Физика полупроводниковых приборов. М., 1984.
8. Джоветт Ч.Е. Статическое электричество в электронике. М., 1980.

УДК 539.216:546.824-31

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ ТОНАЛЬНОЙ КОМПРЕССИИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ДИСПЛЕЕВ

А.В. СЫЧЁВ, А.А. СТЕПАНОВ, А.Г. СМИРНОВ, *К. БЛАНКЕНБАХ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Республика Беларусь

*Университет г. Пфорцхайма, Технический факультет
Тифенброннер Штрассе, 65, Пфорцхайм, 75155, Германия

Поступила в редакцию 27 апреля 2015

Приведены результаты сравнительного анализа методов тональной компрессии, используемых при обработке изображений жидкокристаллических дисплеев при воздействии интенсивного внешнего освещения, с целью повышения достоверности считывания информации. Предложены два новых метода тональной компрессии, которые основаны на метрологических стандартах жидкокристаллических дисплеев. Предложенные методы сравниваются с известными методами по тематике «улучшение изображения при воздействии внешнего освещения».

Ключевые слова: жидкокристаллические дисплеи, внешняя засветка, улучшение изображения, тональная компрессия, цветокоррекция.

Введение

Отражение света от поверхности жидкокристаллического дисплея (ЖКД) при его интенсивной внешней засветке значительно ухудшает качество восприятия изображения, что приводит во многих случаях к недостоверности считывания информации. Особенно это существенно при использовании ЖКД, например, в салоне автомобиля или кабине пилота. Данную проблему можно решить применением специальных методов тональной компрессии, которые базируются на разных идеологиях и отличаются друг от друга в зависимости от характера корректируемого изображения [1].

Как правило, различают два типа изображений:

- 1) фотореалистичное изображение, формируемое с помощью технических средств, например, фотографии [2];
- 2) нефотореалистичное изображение – противоположное фотореалистичному изображению – которое относится к области компьютерной графики и получается методами имитации объектов [3].

Процесс получения изображения осуществляется при помощи метода визуализации, цветокоррекции, который возвращает преобразованные координаты цвета к первоначальным, и тональной компрессии (от англ. tone mapping), который изменяет яркость изображения по определенной модели.

Разработаны метод тональной компрессии и метод цветокоррекции, которые реализованы в едином алгоритме по преобразованию изображения в условиях интенсивного внешнего освещения. В данной работе приведены результаты преобразования изображений с помощью разработанных методов и проведено сравнение с известными ранее.

Методы тональной компрессии

Отражение любого рода источника света от поверхности ЖКД значительно ухудшает его оптические характеристики.

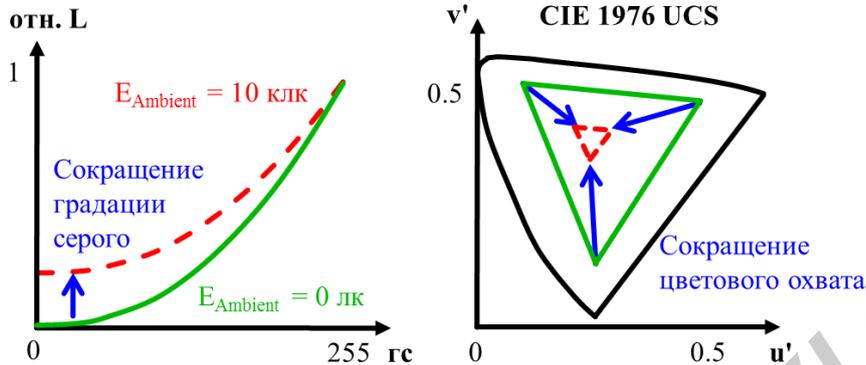


Рис. 1. Изменения ступеней градации серого (слева) и цветового охвата (справа) дисплея при влиянии внешнего освещения с интенсивностью 10^4 лк [1].

Из рис. 1 видно, что влияние внешнего освещения приводит к смещению градации серой шкалы (слева) и уменьшению цветового охвата (справа) дисплея [1, 5]. На рис. 1, а зеленая линия соответствует характеристике дисплея в темной комнате, то есть без внешнего источника освещения. Освещенность в данном случае равна $E_{Ambient} = 0$ лк. Смещение красной линии на этом рисунке относительно зеленой демонстрирует ухудшение характеристик дисплея при наличии отраженного от поверхности дисплея яркого света от внешнего источника, например, с интенсивностью освещенности $E_{Ambient} = 10^4$ лк. На рис. 1 максимальная яркость принята за единицу. Отражение внешнего источника света от поверхности дисплея увеличивает общую яркость изображения, при этом относительная яркость между двумя соседними ступенями градации серого уменьшается. На рис. 1, а это отчетливо видно на низких ступенях градации серого. Так, приблизительно до 50-й ступени градации серой шкалы, кривая проходит почти горизонтально. Целью метода тональной компрессии является увеличение яркости низких ступеней градации серого, так как они подвержены наибольшему смещению. Увеличение яркости нижних ступеней градации ведет к увеличению относительной яркости между ними и способствует улучшению восприятия всего изображения. В идеальном случае, восприятие изображения должно быть таким, каким оно воспринимается в темной комнате.

Так как отраженный свет имеет большую яркость, чем яркость низких ступеней градации серого, это приводит к тому, что общая яркость отраженного света с яркостью каждой из низких соседних ступеней градации серого не намного отличаются от яркости отраженного света, тем самым становясь для человека физически неразличимыми.

Чтобы различить две соседние градации серого, нужна минимальная относительная яркость ΔL – порог различия, который определяется из закона Вебера [6]. Закон Вебера говорит о том, что любой орган чувств при определенной перемене реагирует на изменения (например, глаз реагирует на интенсивность света или яркость). Так, человеческий глаз регистрирует изменение яркости от 1 до 2 %.

Методы тональной компрессии позволяют увеличивать яркость ступеней градации серого, делая низкие тона более различимыми, изменяя низкие ступени градации серого на более высокие. Однако это ведет к сокращению диапазона более высоких ступеней. Известно, что максимальное число ступеней градации серого равно 256-ти (от 0 до 255), что обусловлено 8-ми битной разрядностью шины данных для каждого цвета. Разработанный метод тональной компрессии « ΔE », (нем. Empfindung – ощущение) базируется на следующей зависимости [1]:

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} = \Delta L^* [1]. \quad (1)$$

Выражение (1) определяет разницу яркостей двух соседних ступеней градации серого ΔL^* , а также цветовые координаты Δu^* и Δv^* . В данном методе тональной компрессии изменяется только значения яркости, не изменяя цвета.

Теоретическая яркость ступеней градации серого рассчитывается согласно выражению (2), рассматривая два соотношения яркостей самой ступени градации серого к максимальной яркости:

$$L_n^* = \begin{cases} \left(\frac{29}{3}\right)^3 \frac{L_n}{L_{\text{Max}}}, & \frac{L_n}{L_{\text{Max}}} \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3; \\ 116 \left(\frac{L_n}{L_{\text{Max}}}\right)^{\frac{1}{3}} - 16, & \frac{L_n}{L_{\text{Max}}} > \left(\frac{6}{29}\right)^3. \end{cases} \quad (2)$$

Разработанный второй метод тональной компрессии « $\Delta L/L$ » основан на зависимости (3), а значение яркости рассчитывается по формуле (2).

$$\frac{\Delta L}{L}(GL_n) = \frac{L_{n+1}^* - L_n^*}{\left(\frac{L_{n+1}^* + L_n^*}{2}\right)}. \quad (3)$$

Теоретически « $\Delta L/L$ » алгоритм при влиянии внешнего освещения может быть описан степенной функцией типа GL^α . Например, при интенсивности внешнего освещения $E_{\text{Ambient}} = 10^4$ лк, параметр α равен 0,45. Степенная функция используется как метод для предотвращения негативного эффекта клиппинга (от англ. clipping), т.е. «обрезания» высоких уровней градации серого. Аналогично, подобная степенная функция может использоваться также и в методе « ΔE » для предотвращения клиппинг-эффекта [7]. Применяя предлагаемые алгоритмы, можно изменять яркость изображения в зависимости от изменения яркости внешнего освещения, учитывая параметры дисплея.

Целесообразно сравнить предлагаемый метод тональной компрессии с тремя известными методами, описанными в литературе. Так, в работе Чена и его коллег [8] описывается метод «глобальной» адаптации яркости, который определяет ее значение на всем изображении («глобально»), а улучшает локальный контраст. Метод «глобальной» адаптации яркости использует передаточную функцию фотокамеры [9] с дополнительным параметром (τ), отвечающим за яркость изображения:

$$D = \frac{\log((I - \tau) + 1)}{\log((I_{\text{Max}} - \tau) + 1)} [9]. \quad (4)$$

При помощи сочетания метода «глобальной» адаптации яркости и метода улучшения локального контраста предотвращается потеря контраста и «вымывание» цвета. Данный метод включает единственный внешний параметр – величину чувствительности яркости глазом человека. Результат преобразования оригинального изображения показан на рисунке рис. 2.



Рис. 2. Преобразование изображения с использованием методов «глобальной» адаптации яркости и улучшение локального контраста [8]

Оптимизация изображения с помощью функции восприятия яркости глазом человека в зависимости от длины волны света использовал Динг [10] при разработке другого метода тональной компрессии. Данный метод реализуется в три этапа: а) получение максимального значения яркости изображения; б) адаптивная настройка яркости; в) восстановление первоначального цвета. При этом на первом этапе определяется максимальное значение яркости всего изображения. Для этого преобразуются три базовых цвета изображения: красный, зеленый и синий (система *RGB* – Red, Green, Blue) в цветовую модель *YUV*, в которой цвет разделяется на его яркость (*Y*) и две цветоразностные координаты (*U* и *V*). При трансформации цвета в цветовую модель не учитываются никакие параметры дисплея. После преобразования находится максимальное значение яркости (*Y*), которое на втором этапе адаптируется по похожему принципу как в HDR1-методе. На третьем этапе происходит восстановление первоначального цвета. Конечный результат применения данного метода тональной компрессии показан на рис. 3.



Рис. 3. Преобразование изображения с использованием цветовой модели *YUV* [10]

Яркость за счет диффузного отражения интенсивного внешнего излучения учитывается в методе тональной компрессии Мантиука [11]. Данный метод основан на использовании двух моделей – модели гамма-коррекции дисплея и визуальной модели. Модель гамма-коррекции дисплея под названием GOGO (от англ. Gain-Offset Gamma-Offset) имеет некоторое сходство с предлагаемым алгоритмом и описывается выражением:

$$L_d(L') = (L')^\gamma * (L_{Max} - L_{Black}) + L_{Black} + \left(\frac{R_d}{\pi} \right) \cdot E_{Ambient} \cdot \quad (5)$$

В визуальной модели метода тональной компрессии используется порог различия JND (от англ. just-noticeable difference), который также имеет сходство с соответствующим параметром в предлагаемом методе. Результат преобразования изображения, используя метод гамма-коррекции и визуальной модели представлен на рис. 4.

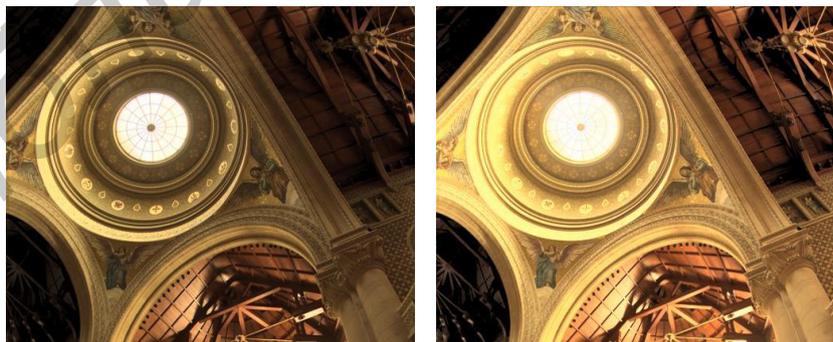


Рис. 4. Результат применения модели гамма-коррекции дисплея и визуальной модели для интенсивности внешнего освещения $E_{Ambient} = 10^4$ лк [11]

Таким образом, сравнительный анализ всех вышеперечисленных методов тональной компрессии показал, что все они демонстрируют неплохие результаты – скорректированное изображение смотрится намного ярче, чем оригинальное, тем самым оно будет лучше восприниматься человеком даже в условиях интенсивного внешнего освещения.

Основные преимущества предлагаемого метода по сравнению с вышеперечисленными вытекают из следующего:

- 1) использование параметров дисплея для получения наилучших преобразований именно для этого дисплея;
- 2) использование параметров наружной засветки для получения оптимального увеличения яркости.

В параметры дисплея включены его максимальная и минимальная яркости, цветность и коэффициент отражения. При помощи данных параметров возможна наилучшая адаптация яркости и цвета при влиянии внешнего освещения. Результаты преобразования после применения этих методов тональной компрессии в комбинации с методом цветокоррекции показаны на рис. 5. На рис. 5 слева отображено оригинальное изображение, метод ΔE (в центре) и ΔL (справа). Преобразование производилось с учетом параметра внешнего освещения $E_{Ambient} = 5 \times 10^3$ лк.

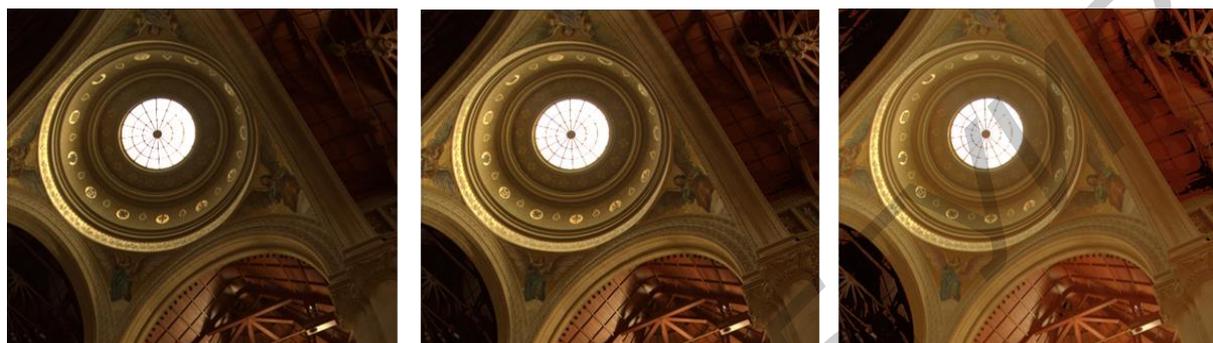


Рис. 5. Визуализация разработанных алгоритмов при внешнем освещении $E_{Ambient} = 5 \times 10^3$ лк

Сравнивая результаты преобразования, можно отметить, что преобразованное изображение значительно ярче оригинального, тем самым удалось улучшить «читаемость» деталей в темных областях (слева под аркой). Если сравнивать цвета, то можно отметить, что насыщенность цвета не изменилась, то есть не наблюдается эффекта «вымывания» цвета.

Заключение

Проведен сравнительный анализ существующих методов тональной компрессии по коррекции изображений жидкокристаллических дисплеев в условиях интенсивной внешней засветки, описаны основные принципы их работы. Представлены разработанные авторами методы тональной компрессии и проведено их сравнение с описанными в литературе, при этом можно констатировать, что:

- все рассмотренные методы увеличивают яркость изображения по определенной модели, тем самым результаты преобразования отличаются друг от друга,
- преимущество предлагаемых методов тональной компрессии и цветокоррекции заключается в комплексном учете параметров как самого дисплея, так и внешнего освещения.

Таким образом при применении метода тональной компрессии изображение становится ярче, тем самым становится более удобочитаемым при влиянии внешнего освещения на поверхность дисплея. При дополнительном применении метода цветокоррекции, координаты всех цветов изображения остаются без изменения.

COMPARISON OF TONE MAPPING METHODS DURING IMAGES PROCESSING ON LIQUID CRYSTAL DISPLAYS

A.V. SYCEV, A.A. STEPANOV, A.G. SMIRNOV, K. BLANKENBACH

Abstract

Image enhancement algorithms improve readability on liquid crystal displays under bright ambient light conditions and are the theme of many researchers and developers. The existing problem is the reflection on the surface of the display under bright light source and is relevant in many applications. Several methods of tone mapping (gamma adaptation), which were compared with existing models related to «improving the image under bright ambient light conditions» are developed.

Список литературы

1. *Blankenbach K., Sycev A., Kurbatfinski S. et. al.* // J. of the Society for Information Disp. 2014. Vol. 22, Iss. 5. P. 267–279.
2. *Garg K., Nayar K.* // Int. J. of computer vision. 2006. № 75(1). P. 3–27.
3. Non-Photorealistic Rendering. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.cl.cam.ac.uk/teaching/0910/RSL/Richardt.pdf. – Дата доступа: 05.05.2015.
4. *Chang C., Bishop G., Lastra A.* // Computer graphics (SIGGRAPH'99). August, 1999. P. 291–298.
5. *Kerofsky L., Xu X.* // J. of the SID. 2011. Vol. 19. P. 645–654.
6. *Кукта М.* // Society of information displays DIGEST. 2008. Vol. 39, Iss. 1. P. 1336–1338.
7. *Сычѐв А.В., Степанов А.А., Смирнов А.Г. и др.* // Докл. БГУИР. 2015. № 3 (89). С. 23–28.
8. *Chen M., Qiu G., Zhang W. et. al.* // A novel method for digital image enhancement, IDW'09. 2009. P. 495–498.
9. *Drago F., Myszkowski K., Annen T. et. al.* // The journal of computer graphics forum. 2003. Vol. 22, № 3. P. 419–426.
10. *Ding X., Wang X., Xiao Q.* // IEEE international conference on image analysis and signal processing (IASP). 2010. P. 79–82.
11. *Mantiuk R., Daly S., Kerofsky L.* // ACM Transactions on Graphics (Proc. SIGGRAPH). 2008. Vol. 27 (3). 68.1–68.10.

УДК 004.272.43+004.272.32

МОДЕЛИРОВАНИЕ АРХИТЕКТУРЫ ГРАФОДИНАМИЧЕСКОЙ МАШИНЫ НА БАЗЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО КЛАСТЕРА

М.М. ТАТУР

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 28 апреля 2015

Разработана модель параллельной архитектуры проблемно-ориентированного процессора. С целью верификации полученных технических решений проведено моделирование архитектуры на тестовых примерах на базе кластера GPU с использованием технологии CUDA. В результате модель позволила симитировать отдельные блоки и исследовать вычислительные процессы, которые протекают в исследуемой архитектуре.

Ключевые слова: ассоциативный поиск, семантическая сеть, граф, параллельные вычисления.

Введение

Интеллектуальная обработка информации неразрывно связана с такими научными областями, как обработка сигналов и изображений, распознавание образов, семантическая обработка знаний (методы искусственного интеллекта). Границы этих областей достаточно условны и стираются при создании конкретных прикладных информационных систем. Становится все более очевидным, что интеллектуальный анализ информации в каждом конкретном случае представляет собой последовательность различных, порой достаточно сложных, процедур обработки. Возможно, поэтому ни один отдельно взятый математический аппарат (математическая статистика, нейронные сети, нечеткие множества, семантические сети и др.) не в состоянии эффективно решать все многообразие интеллектуальных задач.

Более того, алгоритмы интеллектуальных вычислений носят переборный или комбинаторный характер, т.е. сложность и время вычисления задач возрастает нелинейно с ростом числа переменных. Подобные алгоритмы нередко включают в контуры управляющих систем реального времени, к которым предъявляются особо высокие требования по производительности. Как следствие, становится актуальной проблема эффективного распараллеливания вычислений и их реализации на суперЭВМ, вычислительных кластерах или проблемно-ориентированных компьютерах с оригинальными архитектурами, т.е. создания эффективных высокопроизводительных специальных средств вычислений.

С одной стороны, мы имеем прикладную задачу, а со второй стороны – некоторую аппаратную платформу, на которой эта задача может быть решена. Процесс проектирования программно-аппаратной интеллектуальной системы состоит в выборе как самой аппаратной платформы, так и разработке всего комплекса моделей, алгоритмов и, в конечном счете, программ для данной аппаратной платформы. Очевидно, что процесс проектирования неформален и содержит неограниченное число возможных технических реализаций, отличающихся технико-экономическими, конструктивными параметрами и эффективностью.

Современные унифицированные параллельные компьютеры (GPU, суперЭВМ и вычислительные кластеры, облачные вычислительные сети) не дают принципиального решения проблемы, т.к. не указывают пути распараллеливания сложного когнитивного вычислительного процесса на относительно простую регулярную параллельную архитектуру. Практика

свидетельствует о том, что прикладная задача на кластере или другом параллельном компьютере чаще всего получает экстенсивное ускорение вычислений. Еще хуже обстоит дело со специализированными вычислителями, время и стоимость создания которых велики, а унификация в решении прикладных интеллектуальных задач стремится к нулю. В этом контексте надо осторожно относиться к оценке «перспективности» современных нейронных, семантических и ассоциативных компьютеров. Зачастую они имеют либо урезанный вариант SIMD-архитектуры и не гарантируют эффективности решения прикладной задачи, либо представляют собой узкоспециализированный спецпроцессор.

Ниже приведены результаты архитектурного проектирования и модельной верификации. Сформулированы объективные ограничения и некоторые закономерности распараллеливания алгоритмов обработки графов.

Архитектура моделируемого процессора

В ходе предварительных исследований была предложена архитектура параллельного процессора (рис. 1), проблемно-ориентированного на класс задач обработки графов (графодинамическая машина) [1–3]. Архитектура процессора относится к SIMD-типу и представляет собой независимый блок ассоциативной памяти большого объема с соответствующим интерфейсом доступа. Система команд процессора содержит команды чтения и записи данных с адресацией ячеек по их содержимому. В качестве тэга (поискового признака) может быть использован любой набор бит данных, настройка выполняется посредством самой команды чтения/записи. Операция записи может выполняться одновременно в любое количество ячеек памяти (от нуля до всего объема памяти в зависимости от поискового запроса), считывание возможно только последовательно по одной ячейке за одну операцию (основное узкое место архитектуры).

Основными отличительными характеристиками архитектуры являются простота наращивания числа процессорных элементов (ПЭ) и объема памяти процессора. Логическая схема ПЭ чрезвычайно простая, что позволяет реализовать огромное их количество на одном кристалле, в соответствии с чем снижается стоимость одной ячейки памяти.

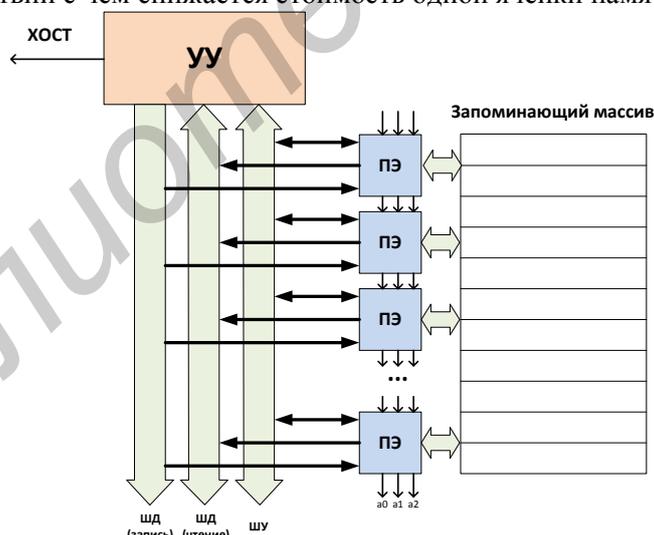


Рис. 1. Архитектура графодинамической машины

В ходе исследования данная архитектура была реализована в виде программной модели на базе вычислительного кластера и технологий (NVIDIA CUDA). Это позволило провести модельные эксперименты для верификации разработанной архитектуры процессора, системы команд процессора и предложенной схемы обработки информации в целом.

Постановка модельных экспериментов и их обсуждение

Программная модель реализована на базе вычислительного кластера, состоящего из управляющего узла и 7 вычислительных узлов. Характеристики узлов представлены в табл. 1.

Таблица 1. Аппаратные ресурсы кластера, используемого для моделирования параллельной архитектуры

Управляющий узел	Вычислительный узел (x7)
Blade: GPU SuperBlade SBI-7127RG 2 x CPU Intel Xeon E5606 24 Gb RAM 2x SSD 80Gb 4x HDD 300Gb InfiniBand 4x QDR (40Gbps) Network 2x Gigabit Ethernet	Blade: GPU SuperBlade SBI-7127RG 2 x CPU Intel Xeon E5-2650 32 Gb RAM 2x Tesla M2075 6 Gb RAM InfiniBand 4x QDR (40Gbps) Network 2x Gigabit Ethernet

Для обмена данными между вычислительными узлами используется MPICH2 (стандарт интерфейса обмена данными MPI, Message Passing Interface). Планирование задач и общее управление ресурсами вычислительного кластера осуществляется посредством TORQUE Resource Manager. Основной рабочий проект реализован на C++, сборка проекта на тестовых машинах осуществляется в MVS 2010, на кластере – посредством Makefile. Проект находится в открытом доступе на github.

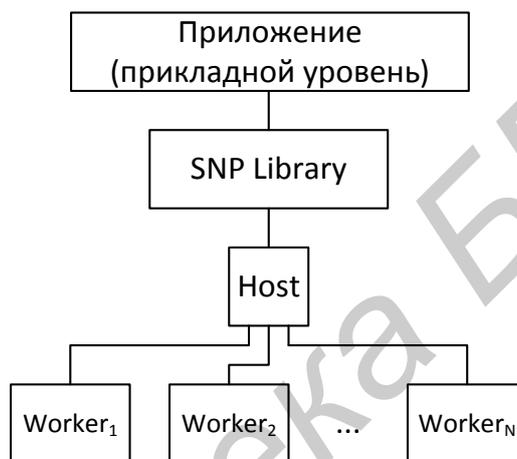


Рис. 2. Структура проекта

Структура программного обеспечения представляет собой несколько логически независимых модулей.

1. Собственно приложение. Как правило, прикладная программа с удобным графическим пользовательским интерфейсом и возможностью работы в интерактивном режиме.

2. SNP Library – разработанная в рамках проекта библиотека для интеграции в произвольные прикладные проекты. Предоставляет пользователю интерфейс, имитирующий систему команд процессора и скрывает все взаимодействие с вычислительным кластером. Модуль интегрируется в приложение на стадии сборки исполняемого файла, вся необходимая внешняя настройка осуществляется посредством конфигурационного файла: задается IP-адрес и порт, по которому идет общение с кластером, авторизационные данные. Общение с вычислительным кластером (в частности хост-процессом) происходит по сети Ethernet.

Для запуска вычислительной системы SNP Library с помощью внешних скриптов формирует на управляющем узле кластера служебные файлы с конфигурацией системы (необходимое количество вычислительных узлов, требуемый размер свободной памяти на винчестере и т.п.) и передает управление TORQUE. В свою очередь, TORQUE запускает на вычислительных узлах необходимые служебные процессы (Host, Worker).

3. Host – служебный процесс, запущенный на одном из вычислительных узлов кластера, который берет на себя ответственность за взаимодействие с SNP Library по сети Ethernet. Принимает и обрабатывает пакеты с командами процессору, рассылает команду всем рабочим процессам (Worker), ожидает ее исполнения, собирает, агрегирует и отправляет результат обратно головному процессу (SNP Library).

4. Worker – служебный процесс, запущенный по одному экземпляру на каждом из вычислительных узлов кластера. Принимает команды от хост-процесса (посредством MPI),

исполняет их на имеющихся графических процессорах (посредством NVidia CUDA), обрабатывает и отправляет результат обратно хост-процессу.

Порядок проведения эксперимента.

Тестовая задача включает в себя следующую последовательность действий.

1. Параллельная запись во все ячейки памяти фиксированного числового значения.
2. Поисковый запрос по тому же числовому значению.
3. Дальнейшая последовательная вычитка результата запроса (соответствует всему объему памяти процессора).

Тесты были выполнены для различных конфигураций процессора согласно табл. 2.

Таблица 2. Данные конфигураций процессора при проведении экспериментов: [A] (C; M; N), где A – количество вычислительных узлов, C – размер ячейки памяти (Бт), M – количество ячеек в одном ПЭ (размер локальной памяти ПЭ), N – количество ПЭ

Тест 1. Переменное число вычислительных узлов	Тест 2. Переменное число ПЭ	Тест 3. Переменное число ячеек в одном ПЭ
[1] (4; 1; 28627)	[3] (4; 1; 86016)	[3] (4; 1; 86016)
[2] (4; 1; 57344)	[3] (4; 1; 172032)	[3] (4; 2; 86016)
[3] (4; 1; 86016)	[3] (4; 1; 258048)	[3] (4; 4; 86016)
[4] (4; 1; 114688)	[3] (4; 1; 344064)	[3] (4; 8; 86016)
[5] (4; 1; 143360)	[3] (4; 1; 430080)	[3] (4; 16; 86016)
[6] (4; 1; 172032)	[3] (4; 1; 516096)	

В ходе экспериментов было измерено среднее время выполнения инструкции, а также распределение временных затрат между операциями чтения, записи и временем простоя. Некоторые результаты исследований, а также пример прикладной задачи, опубликованы в [4].

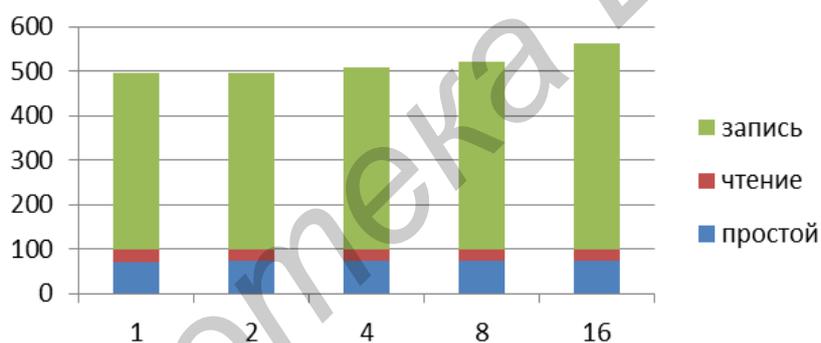


Рис. 3. Среднее время выполнения инструкции (тест 3)

Заключение

Разработанная программная модель позволяет верифицировать работоспособность предложенной архитектуры процессора и схемы семантической обработки данных в целом. Тем не менее, для практического применения необходимо выполнить ряд работ по совершенствованию ПО. В дальнейшем планируется:

- оптимизировать логику работы рабочего процесса (Worker): добавить многопоточную работу с графическими процессорами, улучшить алгоритм распределения данных между узлами и графическими процессорами, провести поиск узких моментов в работе с NVidia CUDA и т.п.;
- уменьшить долю времени выполнения, затрачиваемую на передачу данных по сети;
- улучшить (упростить) процесс разворачивания вычислительной системы;
- разработать пользовательский интерфейс для взаимодействия с моделью в интерактивном режиме;
- реализовать (согласно схеме на рис. 2) программную модель процессора в нотации «ключ-значение» для проведения сравнительных экспериментов;
- реализовать типовые задачи на новом API (интерфейсе SNP Library), провести модельные финальные эксперименты.

MODELING OF THE GRAF-DYNAMIC MACHINE ARCHITECTURE WITH COMPUTING CLUSTER

M.M. TATUR

Abstract

The model of the parallel architecture of problem-oriented processor has been developed. For the purpose of verification of delivered technical solutions the simulation of the architecture on the test cases with cluster GPU using CUDA technology has been provided. As a result, the model allowed to simulate of individual units and to explore the computational processes that occur in the studied architecture.

Список литературы

1. *Голенков В.А., Гулякина Н.А.* / Матер. 2-й Междунар. науч. техн. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем» Минск, 2012. С. 23–52.
2. *Verenik N., Girel A., Seitkulov Y. et. al.* // Proc. of 10-th Int. Conf. on Digital Technologies. Slovakia, 2014. P. 367–371.
3. *Verenik N., Seitkulov Y., Girel A. et. al.* // Eurasian journal of mathematical and computer application. 2014. Vol. 2, Iss. 2. P. 92–101.
4. *Ивашенко В.П., Вереник Н.Л., Гирель А.И. и др.* // Матер. 5-й Междунар. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем». Минск, 2015. С.133–140.

УДК 681.5

СИНТЕЗ КОМПЕНСАТОРА ВОЗМУЩЕНИЯ В КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ С ПИД-РЕГУЛЯТОРОМ В ЦЕПИ ОСНОВНОГО КАНАЛА

М.Х. ШЕЙХ ЭЛЬ НАЖЖАРИН, *А.Г. СЕНЬКОВ, Н.Н. ГУРСКИЙ

*Белорусский национальный технический университет
Независимости, 65, Минск, 220013, Беларусь*

**Белорусский государственный аграрный технический университет
Независимости, 99, Минск, 220023, Беларусь*

Поступила в редакцию 27 марта 2015

Предложена структурная схема комбинированной системы автоматического регулирования аperiodического объекта 1-го порядка с ПИД-законом регулирования по основному каналу и цепью компенсации изменения возмущающего воздействия, реализованной на основе двух дополнительных ПИД-регуляторов.

Ключевые слова: автоматическое регулирование, ПИД-регулятор.

Введение

Комбинированные системы автоматического регулирования (САР) часто используются в теплоэнергетике и сочетают принцип регулирования по отклонению и компенсации измеряемого возмущения. Синтез комбинированной САР включает в себя два этапа: синтез основной САР по отклонению и синтез передаточной функции компенсатора измеряемого возмущения. При этом необходимо учитывать требования, предъявляемые к устойчивости и качеству регулирования САР, а также необходимое условие физической реализуемости САР, что возможно не всегда при попытке добиться абсолютной инвариантности САР к изменениям возмущающего воздействия.

В данной работе на примере системы регулирования температуры в климатической камере показана возможность синтеза комбинированной САР, инвариантной к изменениям возмущающего воздействия, с использованием ПИД-регулятора в качестве компенсатора измеряемого возмущения. Путем численного моделирования выполнен анализ качества регулирования предлагаемой схемы САР.

Основная часть

Структурная схема комбинированной односвязной САР температуры воздуха в помещении показана на рис. 1. Как следует из приведенной на рис. 1 структурной схемы САР, передаточная функция САР по возмущающему воздействию равна:

$$W^f(s) = \frac{\theta(s)}{\theta^f(s)} = \frac{W_{obj}^f - W_d^f \cdot W_{reg}^f \cdot W_{iu} \cdot W_{obj}^u}{1 + W_d \cdot W_{reg} \cdot W_{iu} \cdot W_{obj}^u}. \quad (1)$$

Условие инвариантности САР относительно изменений возмущающего воздействия сводится к уравнению:

$$W_{obj}^f - W_d^f \cdot W_{reg}^f \cdot W_{iu} \cdot W_{obj}^u = 0. \quad (2)$$

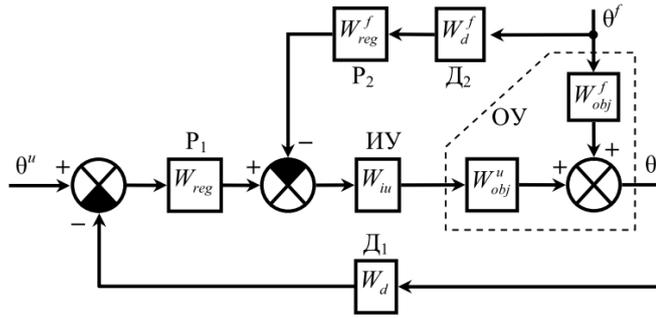


Рис. 1. Структурная схема комбинированной САР температуры в климатической камере; ОУ – объект управления – климатическая камера; θ , °С – изменение температуры воздуха в камере (управляемая величина); θ^u , °С – изменение требуемого значения температуры (задающее воздействие); θ^f , °С – изменение наружной температуры (возмущающее воздействие); ИУ – исполнительное устройство; D_1 , D_2 – датчики температуры; P_1 , P_2 – регуляторы

Отсюда получается следующее выражение для передаточной функции регулятора P_2 (компенсатора измеряемого возмущения):

$$W_{reg}^f = \frac{W_{obj}^f}{W_d^f \cdot W_{iu} \cdot W_{obj}^u}. \quad (3)$$

Передаточная функция W_{reg}^f регулятора P_2 , таким образом, не зависит от передаточной функции W_{reg} регулятора P_1 , а определяется динамическими характеристиками самого объекта управления, а также датчика температуры и исполнительного устройства. В то же время, знаменатель в выражении (1), являющийся характеристическим полиномом САР, не зависит от характеристик элементов D_2 , P_2 цепи компенсации возмущающего воздействия. Поэтому значения корней характеристического уравнения САР, а, следовательно, такие показатели качества регулирования, как устойчивость, запас устойчивости, колебательность, будут определяться характеристиками элементов, входящих в основную цепь регулирования (по отклонению).

В качестве регулятора P_1 , таким образом, может использоваться ПИД-регулятор. Настройка значений его параметров K_p , K_i , K_d может быть выполнена методами компьютерного моделирования по переходной функции САР по задающему воздействию. Для этого можно использовать, например, компьютерный пакет динамического моделирования Simulink и входящий в его состав компонент NCD Outport, реализующий графический интерфейс для настройки параметров динамических систем [1].

Приближенное математическое описание статических и динамических характеристик элементов систем кондиционирования воздуха основано на применении методов идентификации [2]. Анализ приводимых в различных литературных источниках данных [3, 4], позволяет использовать инерционное звено 1-го порядка для математического описания датчиков температуры, исполнительного устройства и объекта управления рассматриваемой САР.

Выражения для передаточных функций климатической камеры, соответственно, по управляющему и возмущающему воздействиям, таким образом, имеют вид:

$$W_{obj}^u = \frac{K^u}{T \cdot s + 1}, \quad (4)$$

$$W_{obj}^f = \frac{K^f}{T \cdot s + 1}, \quad (5)$$

где K^u , K^f – коэффициенты преобразования (усиления); T , s – постоянная времени объекта управления.

Коэффициент K^f , как следует из схемы на рис. 1, является безразмерной величиной, так как связывает изменение наружной температуры с изменением температуры внутри камеры. Размерность коэффициента K^u будет зависеть от типа исполнительного устройства.

Исполнительное устройство как динамическое звено также может быть представлено инерционным звеном 1-го порядка:

$$W_{iu} = \frac{K_{iu}}{T_{iu} \cdot s + 1}, \quad (6)$$

где K_{iu} – коэффициент преобразования (усиления); T_{iu}, c – постоянная времени исполнительного устройства.

Данные, приведенные в [3, 4], говорят о возможности такого приближения как для электронагревателей, так и для поверхностных теплообменных аппаратов.

Передаточные функции обоих датчиков температуры имеют вид [3]:

$$W_d(s) = W_d^f(s) = \frac{1}{T_d \cdot s + 1}, \quad (7)$$

где T_d, c – постоянная времени датчика.

Подставляя (4) – (7) в выражение (3), получим:

$$W_{reg}^f = \frac{K^f \cdot (T_d \cdot s + 1)(T_{iu} \cdot s + 1)}{K_{iu} \cdot K^u}. \quad (8)$$

Передаточная функция (8) может быть реализована путем последовательного соединения двух ПИД-регуляторов:

$$W_{reg}^f = \left(K_{p1}^f + K_{i1}^f \cdot \frac{1}{s} + K_{d1}^f \cdot s \right) \cdot \left(K_{p2}^f + K_{i2}^f \cdot \frac{1}{s} + K_{d2}^f \cdot s \right), \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} K_{i1}^f &= K_{i2}^f = 0; \\ K_{p1}^f &= K^f / K^u; \\ K_{p2}^f &= 1 / K_{iu}; \\ K_{d1}^f &= K^f \cdot T_d / K^u; \\ K_{d2}^f &= T_{iu} / K_{iu}. \end{aligned} \quad (10)$$

Проверка реализуемости предложенной схемы САР, а также оценка качества регулирования выполнялись методом компьютерного моделирования с использованием компьютерного пакета динамического моделирования Simulink [1]. В качестве объекта управления рассматривался лабораторный учебный сушильный шкаф «ШСУ», имеющий объем сушильной камеры 10 л. Значения параметров передаточных функций (4), (5) компьютерной модели объекта были определены экспериментально в результате процедуры идентификации. Изображение компьютерной динамической модели САР показано на рис. 2, а значения параметров передаточных функций элементов САР приведены в таблице.

На первом этапе исследования САР с помощью реализованного в Simulink компонента NCD Outport был выполнен синтез ПИД-регулятора P_1 по основному каналу. Настройка коэффициентов ПИД-регулятора P_1 производилась по задающему ступенчатому воздействию на переходный процесс с 20%-м перерегулированием. Полученные значения коэффициентов K_p , K_i , K_d приведены в таблице. Далее по формулам (10) были рассчитаны значения коэффициентов ПИД-регуляторов $P_2(1)$ и $P_2(2)$. В качестве регуляторов P_1 , $P_2(1)$, $P_2(2)$ использовались компьютерные модели реального ПИД-регулятора [1] (компонент PID(2) Controller), в которых дифференцирующая составляющая аппроксимируется звеном вида $s/(s/N+1)$.

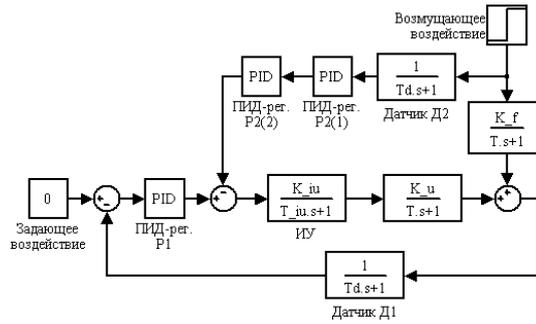


Рис. 2. Динамическая компьютерная Simulink-модель САР температуры в климатической камере

Значения параметров передаточных функций элементов моделируемой САР

Звено	Параметр	Значение	Единица измерения
Объект управления	K^u	0,23	$^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$
	K^f	1	
	T	800	с
Датчики температуры	T_d	20	с
Исполнительное устройство – электронагреватель	K_{iu}	1	$\text{Вт}/\text{В}$
	T_{iu}	50	с
ПИД-регулятор P_1 (по отклонению)	K_p	17,28	$\text{В}/^{\circ}\text{C}$
	K_i	0,02	$\text{В}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{с})$
	K_d	0,32	$(\text{В}\cdot\text{с})/^{\circ}\text{C}$
ПИД-регулятор $P_2(1)$	K_{p1}^f	4,35	$\text{В}/^{\circ}\text{C}$
	K_{d1}^f	86,96	$(\text{В}\cdot\text{с})/^{\circ}\text{C}$
ПИД-регулятор $P_2(2)$	K_{p2}^f	1	$\text{В}/^{\circ}\text{C}$
	K_{d2}^f	50	$(\text{В}\cdot\text{с})/^{\circ}\text{C}$

На рис. 3 (кривая 1) показана полученная методом компьютерного моделирования переходная функция рассматриваемой САР по возмущающему воздействию. Так как в качестве исполнительного устройства предполагалось использование электронагревателя с максимальной мощностью 100 Вт, то на моделируемый переходный процесс было наложено соответствующее ограничение, при котором максимальное по модулю изменение выделяемой электронагревателем мощности не должно было превышать 50 Вт.

Для сравнения на рис. 3 (кривая 2) показана переходная функция по возмущающему воздействию для САР без цепи компенсации измеряемого возмущения, т.е. с регулированием только по отклонению.

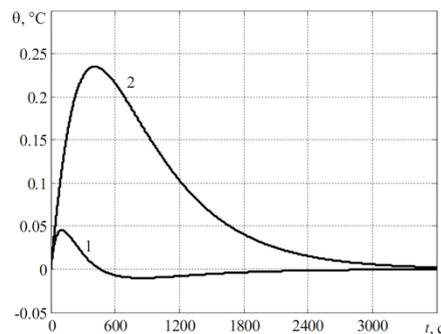


Рис. 3. Переходные функции по возмущающему воздействию для САР с комбинированным регулированием (кривая 1) и с регулированием по отклонению (кривая 2)

Таким образом, как видно из рис. 3, использование комбинированного управления позволяет улучшить качество регулирования системы при изменении возмущающего воздействия. Предложенный в данной работе способ компенсации возмущений на основе ПИД-регуляторов облегчает возможность его практической реализации.

SYNTHESIS OF FEEDFORWARD COMPENSATOR IN THE COMBINED SYSTEM OF AUTOMATIC CONTROL WITH PID-REGULATION ON THE MAIN CHANNEL CIRCUIT

M.H. CHEIKH EL NAJJARINE , A.G. SENKOV, N.N. HURSKI

Abstract

An automatic control system for the 1st order aperiodic object is suggested. The structural scheme includes main control circuit with a PID-regulator in it and a disturbance compensation circuit realized by two additional PID-regulators.

Список литературы

1. *Оценков А.Ю.* Системы автоматического управления: теория, применение, моделирование в MATLAB. СПб, 2013.
2. *Балакирев В.С., Дудников Е.Г., Цирлин А.М.* Экспериментальное определение динамических характеристик объектов управления. М., 1967.
3. *Сотников А.Г.* Автоматизация систем кондиционирования воздуха и вентиляции. Л., 1984.
4. Автоматизация систем вентиляции и кондиционирования воздуха / Под общ. ред. Е.С. Бондаря. Киев, 2005.

УДК 620.22 – 026.61

ПОГЛОТИТЕЛИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНОГО ТОРФА В ПОЛИМЕРНОМ СВЯЗУЮЩЕМ ИЗ ГИДРОГЕЛЯ

Д.В. СТОЛЕР, Т.А. ПУЛКО, Н.В. НАСОНОВА, Ю.В. СМИРНОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6 Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 14 апреля 2015

Исследовано влияние типа и объемного содержания порошкообразного торфонаполнителя в составе композиционных материалов на характеристики экранирования электромагнитного излучения в диапазоне частот 8...12 ГГц. Показано, что коэффициенты передачи и отражения ЭМИ незначительно изменяются для различных видов торфяного сырья и в основном определяются объемным содержанием компонентов и толщиной слоя. Коэффициент передачи исследованных материалов изменяется в пределах $-4,5...-2,1$ дБ и коэффициент отражения в пределах $-12,2...-8,2$ дБ.

Ключевые слова: поглотители электромагнитного излучения, торфяное сырье, полимерное связующее.

Введение

Многообразие свойств торфяного сырья предопределяет различные направления его использования. В современных условиях отсутствует необходимость проведения глубокой конверсии материала, что позволяет избежать дополнительных капитальных вложений и научно-исследовательских работ. Торфяное сырье находит широкое применение в качестве химико-технологического сырья в сельском хозяйстве, медицине, строительстве, радиэкологии. Актуально использование композитов на основе порошкообразного торфа в качестве радиопоглощающего, теплоизолирующего, звукопоглощающего и маскирующего материала. Применение торфа позволит снизить массу, повысить прочность и получить экологически чистые универсальные конструкции, обладающие защитными свойствами против воздействий различной физической природы [1, 2]. При производстве композиционных строительных материалов торф может выступать как в качестве основного, так и в качестве вспомогательного материала [3].

Целью данной работы является исследование экранирующих электромагнитное излучение характеристик и эксплуатационных свойств композиционных материалов на основе торфяного наполнителя в полимерном связующем.

Обоснование проведения исследования

Торф представляет собой натуральный природный материал, который характеризуется содержанием в своем составе разнообразных органических и неорганических соединений. В зависимости от происхождения торф бывает трех типов: верховой – его образуют растения, получающие атмосферное питание; переходный – его образуют остатки олиготрофных растений (перепревшие остатки); низинный – его также образуют перепревшие остатки и растения (торфообразователи), питающиеся грунтовыми водами [4]. Торф является сложной многокомпонентной полидисперсной системой, совмещающей три фазы агрегатного состояния: твердую, жидкую и газообразную. Структурный элемент торфа – это твердая компонента, состоящая из неразложившихся растительных остатков с сохранившимся клеточным строением, гумуса и минеральных веществ. В строении твердой компоненты принимают участие частицы

размером от нескольких сантиметров до долей микрона. Основными химическими элементами органической части являются углерод (С), водород (Н), кислород (О), азот (N) и сера (S). Указанные элементы содержатся в торфе в пределах 48...65 % С; 4,7...7,3 % Н; 24,7...45,2% О; 0,5...4 % N; 0,02...1,2 % S. Основными группами химических соединений, входящих в состав органического вещества торфа, являются битумы, водорастворимые и легкогидролизуемые, гуминовые вещества, целлюлоза и лигнин. Химические элементы неорганической части в торфе находятся в виде ионов, солей или комплексных соединений [5, 6].

Высокое содержание углерода в составе торфа обуславливает перспективность его применения в качестве компонента экрана ЭМИ. Для улучшения адгезионных свойств торфонаполнителя в качестве связующего для формирования композиционного материала предлагается использование полиэлектролитного гидрогеля [7]. Гидрогелевые материалы характеризуются системой пор размерами в десятки и более микрон и представляют собой нерастворимую сеть гидрофильных полимеров, способную поглощать воду и биологические жидкости. Пространственная структура гидрогелей является результатом поперечной сшивки полимеров, формирующих нерастворимую структуру в окружающем растворе [8]. Гидрогель относится к классу высокогигроскопических веществ, способных поглощать и удерживать в набухшем состоянии огромные количества (200...400 мл на 1 г сухого вещества) влаги в зависимости от условий окружающей среды. При этом в указанном масштабе набухания влага не изменяет своих свойств, кроме физической подвижности. Это имеет существенное значение при создании водосодержащих экранирующих материалов со стабильными свойствами.

Методика проведения эксперимента

Исследовались образцы композиционных материалов на основе торфяного сырья с различным процентным содержанием полимерного связующего. Использовался торф двух типов: низинный и верховой, отличающиеся физико-химическими свойствами, а также торфогрунт, изготовленный из верхового торфа, минеральных удобрений (азот, фосфор, калий), микроэлементов и структурирующих компонентов (табл. 1). В качестве полимерного связующего использовался полиэлектролитный гидрогель, синтезированный на основе водно-солевого раствора гидролизата полиакрилонитрильного волокна. Используемый полимер обладает хорошей адгезией к разным типам подложек, заполняя поры и неровности материала, с образованием межмолекулярных связей между контактирующими молекулами полимера и используемым торфяным сырьем. Формировались образцы однородной структуры одинаковой толщины с последующей объемной полимеризацией поверхности при комнатной температуре в течение 48 ч. Коэффициент влагосодержания образцов определялся в соответствии с формулой:

$$Вл_{\text{сод}} = \frac{m_{\text{пр}} - m_{\text{с}}}{m_{\text{пр}}} = \frac{m_{\text{жидк}}}{m_{\text{пр}}},$$

где $m_{\text{с}}$, $m_{\text{пр}}$ – масса сухого и пропитанного образца торфяного сырья соответственно, г.

Описание образцов композиционных материалов с различной объемной долей содержания торфяного сырья и полимерного связующего представлены в таблице.

Таблица 1. Описание образцов композиционных материалов на основе торфяного сырья и полимерного связующего

№ образца	Тип торфа	Физико-химические свойства		Толщина слоя, мм	Объемная доля компонентов, %		Влаго содержание, %
		Рабочая влажность, %	Зольность, %		торфа	полимера	
1	Низинный I	58	15	1,54	20	80	8
2	Низинный I	58	15	1,66	30	70	10
3	Низинный I	58	15	2,80	40	60	17
4	Низинный II	45	30	1,72	20	80	10
5	Низинный II	45	30	2,2	30	70	14
6	Низинный II	45	30	2,55	40	60	19
7	Верховой	25	23	1,63	20	80	13
8	Верховой	25	23	2,53	30	70	16
9	Верховой	25	23	3,2	40	60	18
10	Торфогрунт	53	10	1,33	20	80	8
11	Торфогрунт	53	10	1,58	30	70	12
12	Торфогрунт	53	10	2,13	40	60	19

На рис. 1 приведен внешний вид образца композиционного материала на основе торфяного сырья и полимерного связующего, а также электронно-микроскопический снимок поверхности образца при увеличении 50 мкм.

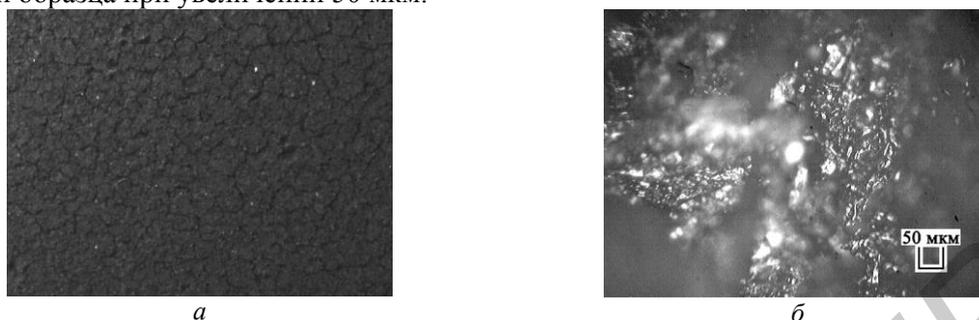


Рис. 1. Образцы композиционных материалов на основе торфяного сырья и полимерного связующего: а – внешний вид образца; б – электронно-микроскопический снимок композитного образца (20 масс. % торфяного сырья, 80 масс. % полиэлектролитного гидрогеля)

Исследование экранирующих характеристик образцов композитных материалов проводилось с использованием панорамного измерителя ослабления и КСВН Я2Р-67 с ГКЧ-61 и волноводным трактом, которые обеспечивают выделение и детектирование уровней падающей и отраженной волн электромагнитного излучения от образца в диапазоне частот 8...12 ГГц. Калибровка оборудования перед началом измерений экранирующих характеристик производилась по стандартной методике [9].

Обсуждение результатов

Частотные зависимости коэффициентов передачи для исследуемых образцов композиционных материалов с различной объемной долей низинного (первого/второго типов) и верхового торфа приведены на рис. 2.

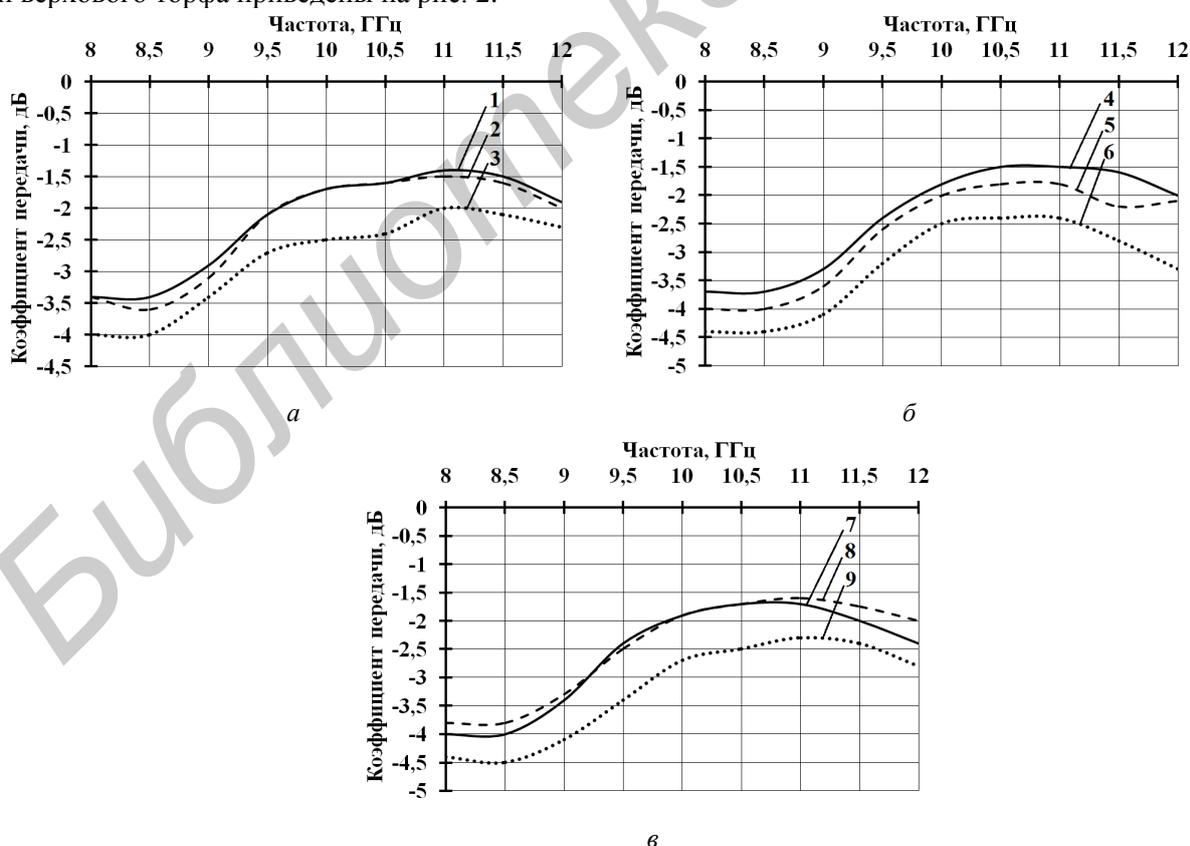


Рис. 2 Частотные зависимости коэффициентов передачи образцов композиционных материалов в частотном диапазоне 8...12 ГГц: а – низинный торф первого типа; б – низинный торф второго типа; в – верховой торф

На основании полученных зависимостей коэффициента передачи ЭМИ от частоты (рис. 2) было установлено, что образцы с объемным содержанием порошкообразного торфа в 20 % и 30 % характеризуются значениями коэффициента передачи в пределах от $-1,4$ дБ до $-3,5$ дБ. При увеличении объемного содержания наполнителя до 40 % независимо от используемого вида торфяного сырья наблюдается характерное изменение значений коэффициента передачи в пределах от -2 дБ до $-4,5$ дБ. При этом с ростом частоты для всех образцов характерно увеличение коэффициента передачи ЭМИ до -2 дБ.

Из полученных графиков зависимостей коэффициента отражения ЭМИ от частоты (рис. 3) следует, что в зависимости от типа и объемного содержания торфяного сырья в составе образцов композиционных материалов полученные значения находятся в пределах $-8 \dots -12,5$ дБ.

Размещение металлической подложки за исследуемыми образцами позволяет значительно увеличить значения коэффициентов отражения ЭМИ независимо от типа используемого торфяного сырья и его объемного содержания в составе образцов. Использование низинного и верхового торфа в объеме 20 % и 30 % позволяет получить значения коэффициентов отражения ЭМИ в пределах $-1,8 \dots -5$ дБ. Увеличение объема торфяного сырья до 40 % приводит к снижению значений коэффициента отражения ЭМИ до $-6 \dots -7,9$ дБ в зависимости от типа используемого торфа, что объясняется увеличением концентрации углерода и уровня влагосодержания в составе образцов композиционных материалов.

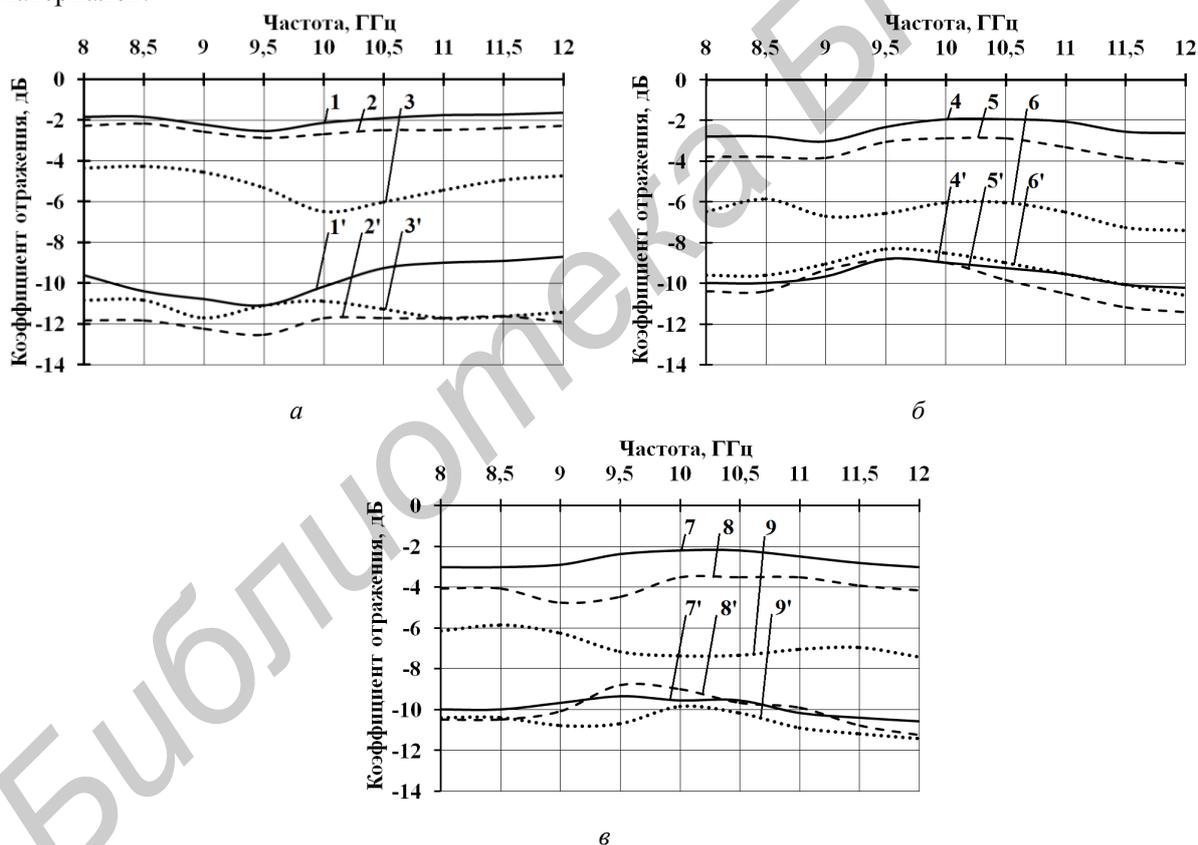


Рис. 3 Частотные зависимости коэффициентов отражения ЭМИ образцов композиционных материалов в частотном диапазоне 8...12 ГГц при использовании металлического отражателя (образцы 1–9) и без использования металлического отражателя (образцы 1'–9'): *а* – низинный торф первого типа; *б* – низинный торф второго типа; *в* – верховой торф

Для образцов композиционных материалов на основе торфогрунта (рис. 4, в) можно наблюдать характерное снижение коэффициента передачи ЭМИ с $-2,1 \dots -3,75$ дБ до $-2,65 \dots -4$ дБ, что связано с увеличением объемного содержания органического наполнителя и уровня влагосодержания исследуемых образцов.

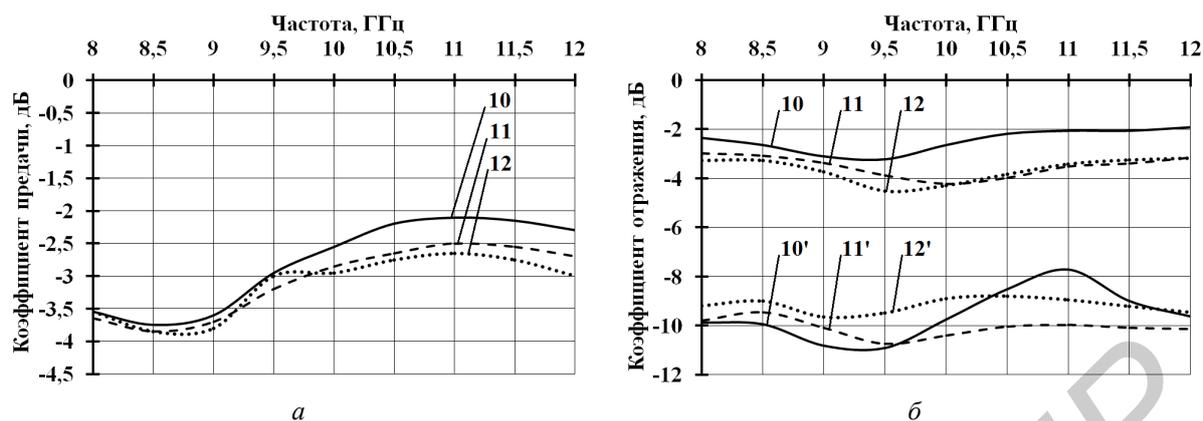


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициентов передачи и отражения образцов композитных материалов на основе торфогрунта в частотном диапазоне 8...12 ГГц при использовании металлического отражателя (образцы 10–12) и без использования металлического отражателя (образцы 10'–12')

Частотные зависимости коэффициентов отражения ЭМИ образцов композитных материалов на основе торфогрунта характеризуются увеличением значений в пределах $-7,8...-11$ дБ по мере увеличения объемного содержания торфяного сырья и уровня влагосодержания образцов. При использовании металлической подложки наблюдается характерное увеличение значений коэффициентов отражения ЭМИ. При наличии металлической подложки наименьшими значениями коэффициента отражения, изменяющимися в пределах $-3,1...-4,7$ дБ, обладает образец композитного материала с 40 % объемным содержанием торфогрунта.

Заключение

На основании результатов исследований можно сделать выводы о том, что полученные композитные материалы с увеличением объемного содержания порошкообразного наполнителя характеризуются улучшением экранирующих свойств, соответствующих понижению коэффициента передачи и отражения в рассматриваемом диапазоне частот. Увеличение толщины слоя приводит к снижению коэффициента отражения ЭМИ.

ELECTROMAGNETIC RADIATION ABSORBERS BASED ON POWDERED PEAT IN POLYMER HYDROGEL BINDER

D.V. STOLER, T.A. PULKO, N.V. NASONOVA, Yu.V. SMIRNOV

Abstract

The influence of the type and volume content of powdered peat on the shielding characteristics of composite materials was investigated in the frequency range of 8...12 GHz. It was shown, that the transmission and reflection coefficients slightly differ for various types of peat components and mainly depend on the volume content and the layer thickness. The transmission coefficient for the studied materials varies in the range of $-4.5...-2.1$ dB and the reflection coefficient – in the range of $-12.2...-8.2$ dB.

Список литературы

1. Колбун Н.В., Хай Нгуен Ван, Фан Н. Занг и др. // Докл. БГУИР. 2007. № 1. С. 88–93.
2. Алябад Х.М., Пулко Т.А., Насонова Н.В. и др. Пассивные технические средства обеспечения информационной безопасности от утечки по электромагнитному, оптическому и акустическому каналам. Минск, 2010.
3. Хританков В.Ф. Лёгкие бетоны с гранулированным органическим заполнителем, направленно изменяемой структурой и микроармирующими минеральными добавками: Автореф. дисс. ... докт. техн. наук. Новосибирск, 2009.

4. «Восточно-европейский институт торфяного дела». [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.instorf.ru/index.php?option=com_content&view=article&id=80&Itemid=56. – Дата доступа: 26.04.2015.
5. *Лиштвак И.И., Базин Е.Т., Гамаюнов Н.И.* Физика и химия торфа. Москва. 1989.
6. Биогрунт. Доставка грунта и торфа. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://bio-grunt.ru/index.php/torf.html>. – Дата доступа: 08.09.2013.
7. *Аль-Адеми Я.Т.А., Смирнов Ю.В., Пулко Т.А. и др.* // Докл. БГУИР. 2014. №4. С. 93–98.
8. *Harrison K.* Biomedical polymers. United Kingdom, 2007.
9. *Богущ В.А., Борботько Т.В., Гусинский А.В.* Электромагнитные излучения. Методы и средства защиты. Минск, 2003.

УДК 621.315.5/7

МЕТОДИКА ФОРМИРОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ КОМПОЗИЦИОННОГО ПОГЛОТИТЕЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ ДИОКСИДА ТИТАНА

М.О. МОЛОДЕЧКИН, В.А. БОГУШ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 5 мая 2015

Приведено обоснование выбора материала для изготовления поглотителя электромагнитного излучения. Дано описание конструкции многослойного композиционного поглотителя. Представлены результаты исследования характеристик отражения и передачи многослойного композиционного поглотителя электромагнитного излучения на основе порошка диоксида титана в диапазоне частот 0,7–17 ГГц. Даны рекомендации по использованию предложенного композиционного материала в качестве поглотителя электромагнитного излучения.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, металлосодержащие композиты, диоксид титана, резистивный сплав, эффективность экранирования, поглотитель электромагнитного излучения.

Введение

Проблема обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) радиоэлектронных средств возникла почти одновременно с первыми радиоэлектронными приборами. Первые задачи обеспечения ЭМС были связаны с ослаблением влияния непреднамеренных электромагнитных помех. По мере развития и функционального усложнения радиоэлектронной аппаратуры, с появлением новых видов радиосредств, освоением новых высокочастотных диапазонов задачи стали более сложными, подчас требующими компромиссных решений. В настоящее время проблема обеспечения ЭМС является не менее актуальной, чем обеспечение аппаратурной надежности или миниатюризации. Она решается путем реализации комплекса организационных или технических мероприятий (схемного и конструктивно-технологического характера). Технические мероприятия связаны с ослаблением или подавлением помех в источниках их возникновения, а также с разработкой устройств защиты. Технически это реализуется путем разработки и применения фильтров, экранов, использованием рационального монтажа аппаратуры, заземления [1]. В процессе создания экранов необходимо учитывать, что эффективность их работы связана с явлениями поглощения и отражения электромагнитной энергии, при этом часть энергии затухает в толще материала. В случае обеспечения ЭМС радиоэлектронных устройств важно, чтобы большая часть энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) поглощалась, а не переотражалась на соседние устройства или в окружающее пространство.

Проектирование и разработка экранов ЭМИ связаны с аналитическими расчетами, экспериментальными исследованиями, моделированием свойств с применением прикладных пакетов программ. При этом самыми сложными являются вопросы обеспечения возможно меньшего коэффициента отражения в заданном диапазоне частот в сочетании с высоким ослаблением ЭМИ, при обеспечении минимальных массогабаритных характеристиках [2].

Одним из вариантов снижения уровня ЭМИ является использование поглотителей электромагнитного излучения, которые предназначены для следующих целей: избирательное подавление нежелательных видов колебаний, полное поглощение сигнала, снижение уровня отраженного сигнала. Создание хорошо поглощающих электромагнитное излучение

широкодиапазонных структур имеет большое практическое значение. Вот только некоторые примеры использования поглотителей ЭМИ: предупреждение несанкционированного съема информации по электромагнитному каналу, обеспечение электромагнитной совместимости радиоэлектронных устройств, маскировка военной техники от обнаружения с помощью радиолокаторов, защита проживающего населения и работающего персонала от вредного воздействия электромагнитных волн различного частотного диапазона (лаборатории, медицинские центры, компьютерные клубы) [3–5].

Среди большого разнообразия поглотителей ЭМИ наиболее перспективны объемные. Они являются одним из наиболее важных функциональных элементов электронных и измерительных приборов. Известны и широко применяются в качестве поглотителей такие материалы, как науглероженная пористая керамика, карбид кремния, составы «Альсифер», «Альфер» и другие [6]. Разработке подобных изделий ученые в последние годы уделяют достаточно много внимания. Поглотители СВЧ-энергии продолжают совершенствоваться по составу, свойствам, конструкции, технологическим процессам изготовления, для обеспечения повторяемости и стабильности эксплуатационных свойств.

При разработке эффективного широкополосного поглотителя ЭМИ необходимо решить задачи по выбору материала, обоснованию конструкции. Материалы, применяющиеся для изготовления поглотителей ЭМИ, должны кроме высокой эффективности поглощения в рабочем диапазоне частот, иметь большую теплопроводность (для отвода поглощенной энергии), высокую механическую прочность, стойкость к окислению при нагреве на воздухе, обеспечивать минимальное влияние на экранируемый объект, минимальные массогабаритные характеристики, высокую технологичность конструкции, повышенные рабочие температуры и т.д. [7] Использование одного вида материала не всегда позволяет добиться комплекса необходимых эксплуатационных свойств. Поэтому чаще используют композиционные материалы, так как незначительное изменение в их составе и количестве исходных компонентов приводит к существенным изменениям эксплуатационных характеристик поглотителя. Наиболее перспективны композиционные керамико-металлические поглощающие материалы – керметы. Их отличают высокие значения параметров: механическая прочность, уровень удельной поглощаемой мощности на единицу массы, рабочая температура. Основным условием эффективного поглощения керметами СВЧ-энергии является изолированность и равномерность расположения металлических частиц в объеме материала, размер которых близок к величине скин-слоя на данной частоте [2]. Разработка широкодиапазонного поглотителя ЭМИ требует учета различных механизмов его работы и, соответственно, сочетания в конструкции материалов с различающимися электрофизическими свойствами.

Недостаток большинства применяющихся материалов заключается в том, что они содержат компоненты, способные поглощать только электрическую или магнитную составляющие электромагнитного излучения. Кроме того, структура материала не предполагает проявления квантовых эффектов. В результате это приводит к снижению поглощающих свойств материала. Поэтому актуальной задачей синтеза композита является повышение радиопоглощающих свойств материала как по электрической, так и по магнитной составляющей электромагнитного излучения.

В практике экранирования применяют композиционные материалы, которые могут содержать наполнители различных форм: мелкодисперсные порошки, проводящие волокна, сеточные, тканые или фольгированные материалы. Выбор тех или иных электропроводящих наполнителей зависит от решаемой задачи. При правильном выборе проводящих добавок и подходящего метода смешения компонентов можно добиться высокой степени экранирования. Использование добавок в виде волокон и чешуек обеспечивает лучший контакт между частицами при небольшом наполнении, что приводит к увеличению проводимости при более низкой стоимости и при меньшей плотности поглотителя [8].

Экспериментальная часть

Цель исследования – определение состава композиционного материала и разработка конструкции поглотителя электромагнитной энергии в диапазоне СВЧ. Для изучения экранирующих характеристик композиционного материала были изготовлены образцы, содержащие в составе порошок TiO_2 , резистивный сплав, кермет.

Резистивный сплав РС 3710 (ЕТО021.034ТУ) имеет следующий состав: 37,9 % Cr, 9,4 % Ni, 52,7 % Si, удельное сопротивление достигает величины 3000 Ом/□. Кермет К-50С (ЕТО 021.033 ТУ) содержит до 25,2 % Cr, удельное сопротивление от 3 до 10 Ом/□. Порошок диоксида титана модификации рутил был приготовлен по методике [9]. Все компоненты исследуемого материала были равномерно распределены в связующем.

Образцы изготавливали методом печати на полуавтоматическом устройстве трафаретной печати SP002 В (Швейцария). При выборе метода формирования исходили из анализа известных способов: нанесение через сито, при помощи скребка, прокатка через вальцы [7]. Выбранный метод трафаретной печати обеспечивает высокую равномерность нанесения пасты и точность поддержания толщины слоя, при этом достаточно прост в реализации.

Все слои поглотителя формировались из паст, приготовленных на основе одинакового связующего – целлюлозы, что обеспечивает высокую адгезию слоев между собой и увеличивает механическую прочность конструкции поглотителя. При этом композиция хорошо формуется, имеет высокую пластичность. Материал выбранной связки, этилцеллюлоза, обеспечивает минимальный вес, стабильность рабочих характеристик экрана при повышенных рабочих температурах, защищает металлические наполнители от коррозии. Для приготовления пасты использовали растворитель типа толуол (возможно использование скипидара).

Для проведения исследований были изготовлены образцы, имеющие разный состав и количество слоев (таблица). Формирование образцов проводили последовательным нанесением нужного количества слоев. Были исследованы образцы, имеющие градиент основных компонентов по толщине.

Состав исследуемых образцов

Номер образца	Состав 1-го слоя, соотношение компонентов	Состав 2-го слоя, соотношение компонентов
1	РС-3710 + TiO ₂ (2,65:1)	–
2	РС-3710 + TiO ₂ (2,65:1)	РС-3710 + TiO ₂ (2,65:1)
3	РС-3710 + TiO ₂ (5,3:1)	–
4	РС-3710 + TiO ₂ (5,3:1)	РС-3710 + TiO ₂ (5,3:1)

Измерение экранирующих характеристик в диапазоне 8...12 ГГц выполняли на панорамном измерителе ослабления и коэффициента стоячей волны (КСВН) Я2Р-67 с ГКЧ-61. Экранирующие характеристики оценивались через коэффициенты передачи и отражения измерительного тракта с образцом. Коэффициент передачи показывает долю мощности электромагнитной энергии, пошедшей через образец, коэффициент отражения – долю мощности ЭМИ, отраженную от образца.

Поскольку однослойные экраны не всегда отвечают всему комплексу эксплуатационных требований, был изготовлен многослойный комбинированный экран, состоящий из магнитных и немагнитных слоев. Задача, поставленная при разработке многослойного композиционного поглотителя ЭМИ, заключалась в повышении механической прочности конструкции, увеличении адгезии слоев между собой, снижении коэффициента отражения ЭМИ без применения сложной технологии изготовления.

Указанная задача решалась путем разработки конструкции поглотителя и подбором состава композиционного материала. Поглотитель ЭМИ представляет собой многослойную конструкцию, содержащую согласующий, поглощающий и отражающий слои (рис. 1).

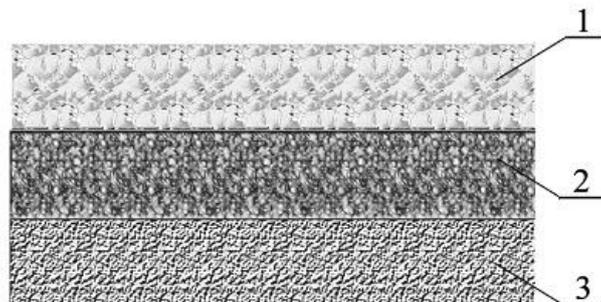


Рис. 1. Конструкция поглотителя электромагнитного излучения:
1 – согласующий слой, 2 – поглощающий слой, 3 – отражающий слой

Требуемая толщина поглотителя каждого конструктивного слоя достигалась путем многократного нанесения пасты соответствующего состава.

В качестве первого, согласующего, слоя использовали целлюлозу с распределенным в ней функциональным наполнителем. Слой 1 должен обладать удельным электрическим сопротивлением, близким к среде распространения, и, следовательно, низким коэффициентом отражения ЭМИ. Согласующий слой выполнен из целлюлозы с распределенной в ней борной кислотой. Второй, поглощающий слой, представляет собой смесь порошков кермета и диоксида титана, равномерно распределенную в целлюлозном связующем. Этот слой имеет более высокую электропроводность, высокую диэлектрическую проницаемость и эффективнее подавляет ЭМИ. Для повышения коэффициента ослабления ЭМИ в конструкции используется третий, отражающий, слой, который представляет собой целлюлозу с равномерно распределенными в ней чешуйками, либо опилками проводящего наполнителя (опилки железа, алюминия).

Измерение экранирующих характеристик проводилось на автоматизированном измерителе модуля коэффициентов передачи и отражения SNA 0.01–18, волноводного тракта с рупорными антеннами 6П-23М, в раскрыве рупора антенны, в диапазоне частот 2...17 ГГц (рис. 2). Ослабление, вносимое исследуемым образцом, определяется отношением напряженностей волн, падающей и прошедшей через образец, выделяемых блоками А и В. Коэффициент отражения R характеризует долю падающей энергии ЭМИ, отраженную от образца. Напряженности поля волн измеряются блоками А и В, затем блок обработки сигналов производит вычисление отношений. Коэффициент отражения ЭМИ измерялся в режимах согласованной нагрузки и тракта, нагруженного на металлическую отражающую пластину (КЗ).

$$A = 20 \log \left(\sqrt{\frac{E_{\text{пад}}}{E_{\text{прош}}}} \right), \text{дБ}; R = 20 \log \left(\sqrt{\frac{E_{\text{отр}}}{E_{\text{пад}}}} \right), \text{дБ} \quad (1)$$

где $E_{\text{отр}}$, $E_{\text{пад}}$ – напряженность поля, выделенного детектором отраженной и падающей волн А/В; $E_{\text{прош}}$ – напряженность поля волны, прошедшей через образец, выделенная блоком В.

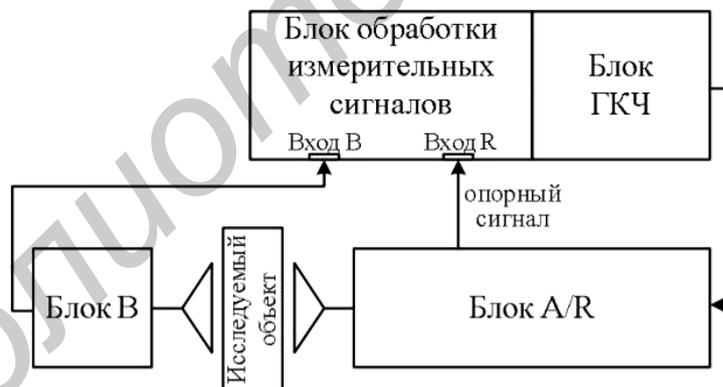


Рис. 2. Схема установки в режиме измерения ослабления ЭМИ

Результаты и обсуждение

Результаты измерения коэффициента передачи образцов № 1 и № 3, отличающихся количеством функциональных наполнителей, представлены на рис. 3. Увеличение массовой доли резистивного сплава в составе композита (5,3:1 для образца № 3 и 2,65:1 для образца № 1) обеспечивает уменьшение коэффициента передачи за счет увеличения электропроводящих свойств композита. Нанесение второго слоя того же состава (образец № 2) приводит к увеличению толщины образца и, как следствие, к уменьшению коэффициента передачи. Причем, в образце № 4, имеющем большее относительное содержание резистивного сплава РС 3710, коэффициент передачи уменьшился на большую величину.

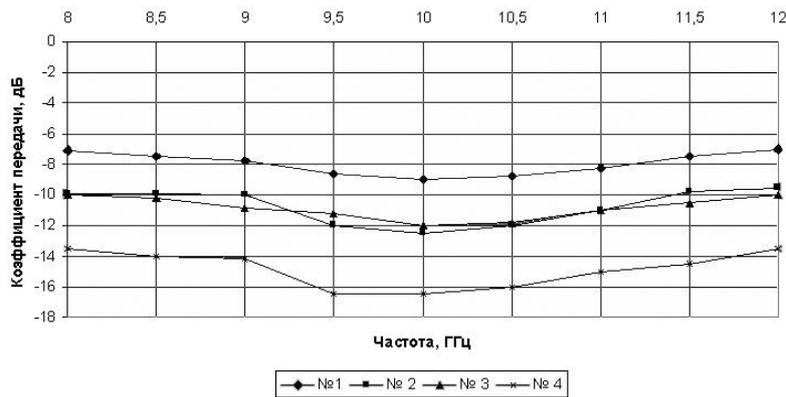


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициента передачи электромагнитной энергии образцов

Измерение коэффициента отражения проводили с обеих сторон образцов (рис. 4). Размещая образец № 1 рабочей (1.2) и обратной (1.1) стороной к излучателю, установили, что рабочая сторона обеспечивает меньшее значение коэффициента отражения, что можно объяснить состоянием поверхности образца. Обратная поверхность после отделения от основы (электротехнический картон), используемой при формировании, имеет некоторую шероховатость. Образец № 2, имеющий градиент концентрации компонентов по толщине (после нанесения второго слоя с соотношением компонентов 2,65:1), имеет больший разброс в значениях коэффициента отражения. Сравнение коэффициента отражения с рабочей стороны для образцов № 1 и № 2 (1.2 и 2.2, соответственно) показало: меньшее значение получено для образца № 2, поскольку содержание резистивного сплава в нем меньше, а диоксида титана больше, что и понижает долю отраженной энергии за счет более высокой диэлектрической проницаемости слоя.

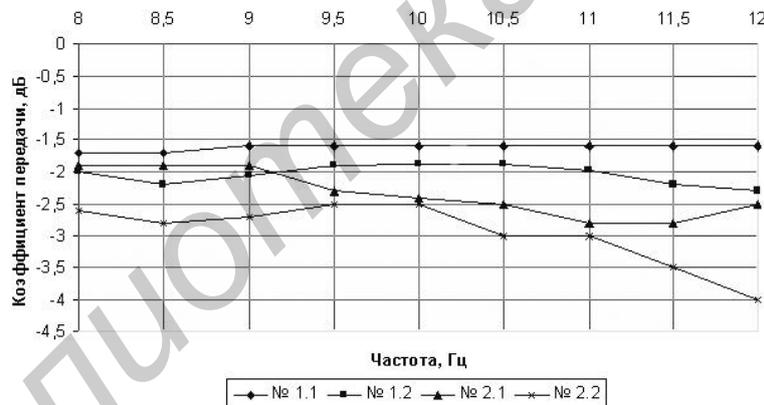


Рис. 4. Частотная зависимость коэффициента отражения электромагнитной энергии образцов на основе диоксида титана и резистивного сплава, при установленной за образцами согласованной нагрузке

Были измерены экранирующие характеристики многослойного поглотителя. Результаты представлены на рис. 5–8.

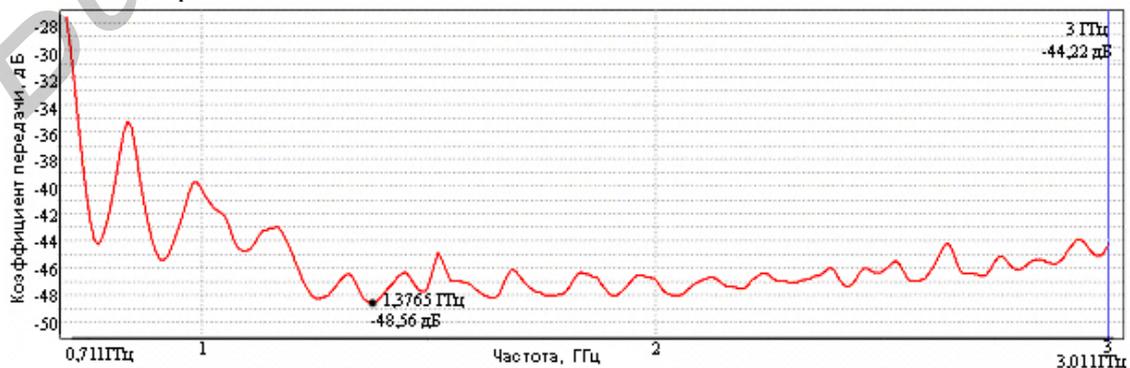


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи ЭМИ многослойного поглотителя в диапазоне от 0,7 до 3 ГГц

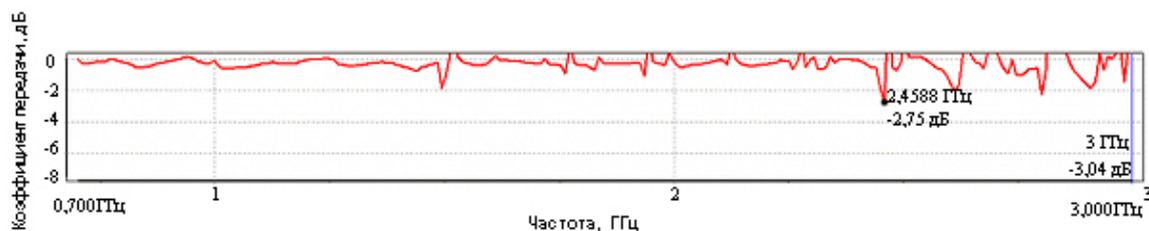


Рис. 6. Зависимость коэффициента отражения многослойного поглотителя в диапазоне от 0,7 до 3 ГГц

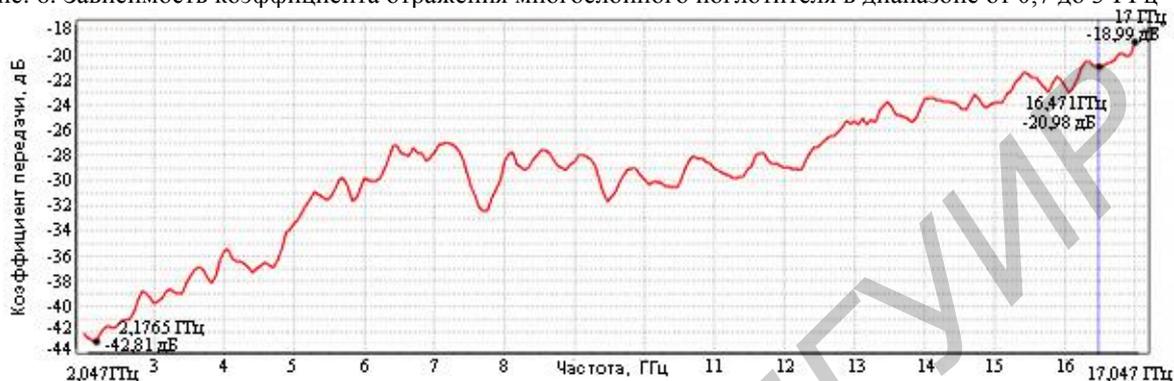


Рис. 7. Зависимость коэффициента передачи ЭМИ многослойного поглотителя в диапазоне от 2 до 17 ГГц

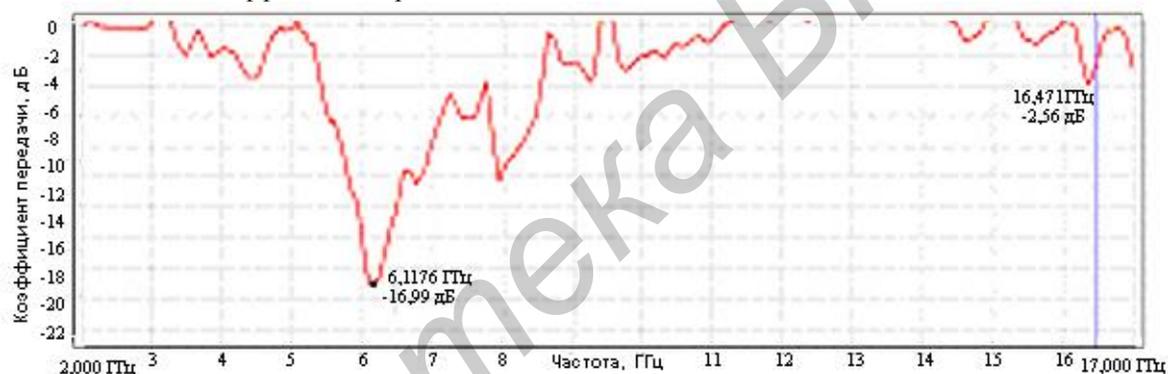


Рис. 8. Зависимость коэффициента отражения многослойного поглотителя в диапазоне от 2 до 17 ГГц

Выбирая количество и вид порошковых наполнителей, исходили из следующих соображений. Для эффективного поглощения ЭМИ в диапазоне СВЧ необходимо обеспечить высокие значения электропроводности, диэлектрической проницаемости, магнитной проницаемости материала. Поскольку матрица материала поглотителя (целлюлоза) является непроводящей, необходимую величину можно достичь, вводя добавки проводящих материалов, причем результирующая проводимость будет функцией содержания этой добавки. Проводимость материала не будет линейно увеличиваться при повышении содержания добавки, а достигнет необходимой величины, как только возникнут условия для образования проводящих мостиков в матрице материала. Дальнейшее увеличение количества проводящей добавки не изменит существенно электропроводность материала-матрицы [10]. В результате проведения экспериментов добавляли порошки диоксида титана разных размеров, кристаллографических модификаций (рутил, анатаз). При этом установили, что при использовании добавок, состоящих из крупных частиц, имеющих широкое распределение по размерам, необходимый уровень ослабления ЭМИ достигался при более низком содержании проводящей добавки.

Принцип действия поглотителя следующий. Падающая электромагнитная волна (ЭМВ) частично отражается от поверхности согласующего слоя 1 и частично рассеивается ею. Снижение доли отраженной энергии обеспечивается согласованием волновых сопротивлений поглотителя и среды распространения ЭМВ. Поглощение энергии ЭМВ происходит в слое 2 за счет его высокой диэлектрической проницаемости, что обусловлено распределенным в слое целлюлозы наполнителем (диоксид титана), и потерь на проводимость, что обеспечивается низким удельным сопротивлением слоя, содержащего порошок резистивного сплава (кермета).

Отражающий слой возвращает прошедшее через два слоя поглотителя излучение в обратном направлении. При этом отраженная от последнего слоя энергия дополнительно поглощается в поглощающем и согласующем слоях. Использование в отражающем слое добавок в виде чешуек или опилок проводящего материала обеспечивает лучший контакт между частицами при небольшом наполнении, что приводит к увеличению проводимости при более низкой стоимости и при меньшей плотности поглотителя.

Методика измерения характеристик поглотителя и используемое оборудование позволяют анализировать результаты по двум поддиапазонам 0,7÷3 ГГц и 2÷17 ГГц. Из анализа частотных зависимостей коэффициентов передачи и отражения поглотителя в первом поддиапазоне следует, что максимальное ослабление ЭМИ наблюдается на частоте 1,37 ГГц и составляет – 49 дБ. При этом коэффициент отражения находится в пределах –3 дБ. Во втором поддиапазоне разработанный поглотитель обеспечивает коэффициент отражения –16,99 дБ на частоте 6,1176 ГГц, минимальное значение коэффициента передачи, равное –42,81 дБ, достигается на частоте 2,1765 ГГц.

С увеличением частоты ЭМИ уровень отраженной энергии у многослойного поглотителя снижается. Это обусловлено тем, что с ростом частоты геометрические размеры поглотителя по толщине становятся соизмеримыми и кратными длине волны излучения.

Выводы

1. Многослойный экран на основе композиции диоксида титана и кермета (резистивного сплава) является эффективным преобразователем электромагнитного излучения в широком частотном диапазоне.

2. Разработанный поглотитель ЭМИ обладает комплексом необходимых технических свойств: механической прочностью, технологичностью, стабильностью электрических характеристик.

FORMING METHOD AND CHARACTERISTICS OF COMPOSITE ABSORBER OF UHF RANGE ELECTROMAGNETIC RADIATION ON THE BASIS OF TITANIUM DIOXIDE

M.O. MOLODECHKIN, V.A. BOGUSH

Abstract

The reasoning of the material choosing for electromagnetic radiation absorber manufacture is made. The description of the multilayer composite absorber construction is show. The study results of reflection and transmission characteristics in the frequency range 0.7–17 GHz of multilayer composite electromagnetic radiation absorber based on powdered titanium dioxide is shown. Recommendations for the use of the designed composite material as an absorber of electromagnetic radiation are proposed.

Список литературы

1. Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи / Под ред. В.И. Кравченко. М., 1987.
2. Павлова М.А., Рыбкин В.Н., Немогай И.К. // Электронная техника. Сер. 1, СВЧ-техника. 2009. Вып. 4 (503). С. 42–47.
3. Бойправ О.В., Махмуд М.Ш., Немах М.Р. // Докл. БГУИР. 2011. № 3. С. 5–10.
4. Белоусова Е.С., Махмуд М.Ш., Лыньков Л.М. и др. // Нанотехнологии в строительстве. 2013. № 2 (24). С. 56–67.
5. Белоусова Е.С. // Веснік сувязі. 2013. № 3 (119). С. 47–51.
6. Ляпин Л., Павлова М., Семенюк С. // Компоненты и технологии. 2009. № 11. С. 126–128.
7. Конструирование экранов и СВЧ-устройств / Под ред. А.М. Чернушенко. М., 1990.
8. Горшенев В.Н., Бибииков С.Б., Куликовский Э.И., Новиков Ю.Н. Композиционный материал для экранирования ЭМИ и способ его получения / Патент РФ 2243980.
9. Молодечкин М.О. // Вест. ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. 2014. Т. 1, № 3. С. 67–73.
10. Гуккерт В., Шпиккерманн В., Бутц Х., Дуквитц Ш., Эльтинг Д. Строительный материал на основе гипса с повышенной теплопроводностью и ослаблением при экранировании / Патент РФ 2405750.

УДК 536.425:538.91

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ ФАЗОВЫХ ПРЕВРАЩЕНИЙ ПРИ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ МАТЕРИАЛА СОСТАВА $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ ИЗ ПРЕКУРСОРОВН.А. КАЛАНДА¹, С.А. КОВАЛЕВА², Л.С. ЛОБАНОВСКИЙ¹, Л.И. ГУРСКИЙ³,
М.В. ЯРМОЛИЧ¹¹ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению»
П. Бровка, 19, Минск, 220072, Беларусь²ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси»
Академическая, 12, Минск, 220072, Беларусь³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь

Поступила в редакцию 28 апреля 2015

Исследована последовательность фазовых превращений в процессе кристаллизации материала состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ твердофазным методом из стехиометрической смеси прекурсоров SrFeO_{3-x} и SrMoO_4 . Установлено, что синтез материала состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ протекает через ряд последовательно-параллельных стадий. Причем на начальном этапе взаимодействия образующийся материал состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ обогащен железом и его состав в ходе реакции изменяется в сторону увеличения содержания молибдена. Показано, что использование прекурсоров способствует уменьшению температуры отжига.

Ключевые слова: материал состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, прекурсоры, однофазность, степень превращения, фазовые переходы.

Введение

В последнее время интерес специалистов в области перспективных спинтронных материалов вызывает материал со структурой двойного перовскита состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$. Этот материал характеризуется химической стабильностью в восстановительной атмосфере, большими значениями температуры Кюри, $T_c = (400-420)$ К, высокой степенью спиновой поляризации электронов проводимости, достигающей $\sim 100\%$ при достаточно низких значениях магнитных полей $B < 0,5$ Тл, в условиях обязательного сверхструктурного упорядочения катионов железа и молибдена [1–3]. Обладая важными и, по некоторым аспектам, уникальными для практического применения магнитными и магнитотранспортными свойствами, этот материал по ряду параметров превосходит известные системы на основе манганитов. Анализ полученных ранее данных свидетельствует о неповторяемости и, даже, противоречивости результатов магнитных и электрофизических измерений [4, 5]. Это объясняется тем, что не учитывалась сложность процесса кристаллизации материала состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, обусловленная многостадийностью фазовых превращений, низкой кинетикой фазообразования и слабой подвижностью катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} [6]. В этих исследованиях практически отсутствуют строгие корреляции, связывающие функциональные характеристики материала с условиями его получения.

На основе вышесказанного становится очевидным, что получение однофазного материала состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с воспроизводимыми физико-химическими свойствами невозможно без детального анализа фазовых превращений на всех стадиях синтеза с обязательным изучением кинетики и степени превращения при кристаллизации. В связи с этим,

в настоящей работе с использованием рентгеноструктурного, термогравиметрического и дифференциально термического анализов, оптической и электронной микроскопии проведен анализ последовательности фазовых превращений и определен состав промежуточных кристаллических фаз в процессе синтеза материала состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ из прекурсоров. Кроме того, установлены корреляционные зависимости между скоростью и степенью фазовых превращений в этом материале. Учет корреляционных зависимостей позволил обеспечить эффективное применение кинетических параметров, характеризующих скорость протекания химических процессов в материалах состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$. Материалы состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ синтезировались экспериментальным путем без использования существующих модельных представлений. Приведенные результаты позволяют определять динамику фазовых превращений и осуществлять направленное изменение фазового состава и катионного упорядочения катионов Fe^{3+} и Mo^{5+} и оптимизировать процесс получения ферромолибдата стронция с использованием комбинированных многоступенчатых режимов термообработки для его использования в электронной промышленности.

Методика эксперимента

Для изучения последовательности фазовых превращений в соединениях переменного состава $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в качестве исходных реагентов использовались прекурсоры SrFeO_{3-x} , SrMoO_4 . При получении прекурсоров SrFeO_{3-x} и SrMoO_4 предварительный отжиг осуществлялся на воздухе при $T = 970$ К и $T = 1070$ К в течение $t = 20$ ч и $t = 30$ ч соответственно. Для повышения гомогенизации шихты использовался вторичный помол в шаровой вибромельнице в течение 1 ч в спирту. Окончательный синтез при получении прекурсоров осуществлялся при $T = 1170$ К в течение $t = 30$ ч в непрерывном потоке Ar для SrFeO_{3-x} и при $T = 1270$ К в течение $t = 40$ ч на воздухе для SrMoO_4 с последующим их охлаждением в режиме выключенной термоустановки. Субмикронный размер зерен прекурсоров ($d_{\text{ср}} \sim 800$ нм) достигался путем их длительного ($t \sim 2$ ч) вибропомола на планетарной шаровой мельнице в спирту. Отжиги проводились в политермическом режиме при скорости нагрева $v = 2$ град/мин в интервале температур $T = (300-1470)$ К в вакуумированных кварцевых ампулах в присутствии геттера (Fe) с последующей их закалкой на комнатную температуру (рис. 1).

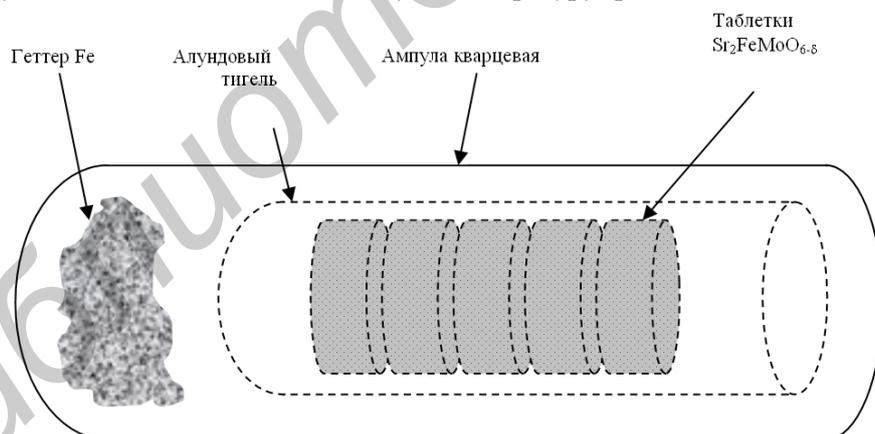


Рис. 1. Схематическое изображение устройства для синтеза однофазного соединения $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ с контролируемым содержанием кислорода

Масса геттера определялась по соотношению:

$$m_{\text{Fe}} = \mu_{\text{Fe}} \times m_{\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}} / \mu_{\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}}, \quad (1)$$

где m_{Fe} , μ_{Fe} – масса и молярная масса Fe соответственно, $m_{\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}}$, $\mu_{\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}}$ – масса и молярная масса $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ соответственно.

Дифференциально-термический (ДТА) и термогравиметрический (ТГА) анализы образцов проводились на установке Setaram Labsys TG–DSC16 в интервале температур $T = (300-1470)$ К при их нагреве со скоростью $v = 2$ град/мин в потоке газовой смеси 5 % H_2/Ar .

Степень превращения (α) или доля прореагировавшего вещества, параметры кристаллической решетки, степень сверхструктурного упорядочения исследовались с использованием программного обеспечения PowderCell, FullProf методом Ритвельда с использованием данных рентгеновской дифракции, полученных на установке ДРОН-3 в $\text{CuK}\alpha$ -излучении при комнатной температуре со скоростью съемки 60 град/ч.

Результаты и их обсуждение

На первой стадии эксперимента в процессе синтеза ферромолибдата стронция методами ДТА и ТГА были изучены как тепловые эффекты, так и процессы десорбции газообразных продуктов химических реакций в интервале температур $T = (300\text{--}1420)$ К в условиях нагрева исходной шихты из прекурсоров SrFeO_{3-x} , SrMoO_4 . Исходя из того, что кристаллизация двойного перовскита протекает через ряд последовательно-параллельных реакций, идущими одновременно с образованием различных продуктов химических реакций, то скорости протекания процессов определяются более медленной стадией. Можно предположить, что в качестве лимитирующей стадии при кристаллизации $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ является объемная диффузия реагентов, через слой продукта реакции, приводящая к большим величинам длины диффузии реагентов. Поэтому для повышения скорости протекания химических реакций необходимо уменьшение диффузионного пути движения исходных реагентов в реакционную зону за счет устранения промежуточных продуктов реакций при кристаллизации ферромолибдата стронция. Согласно ранее полученным данным [6, 7], при формировании $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ первоначально образуются прекурсоры феррит стронция и молибдат стронция. Следовательно, для их взаимодействия и ускорения протекания процессов зарождения и роста $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ в качестве исходных реагентов использовали соединения SrFeO_{3-x} , SrMoO_4 .

При анализе тепловых процессов в интервале температур $T = (300\text{--}1470)$ К в условиях нагрева исходной шихты состава $\text{SrFeO}_{3-x} + \text{SrMoO}_4$, установлено наличие ярко выраженного экстремума с эндотермическим эффектом (рис. 2).

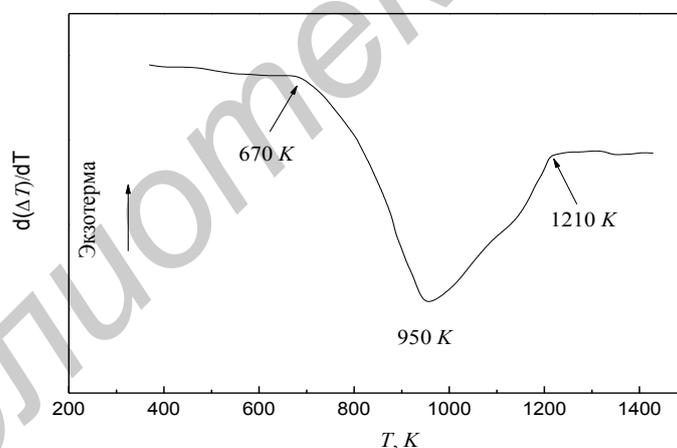
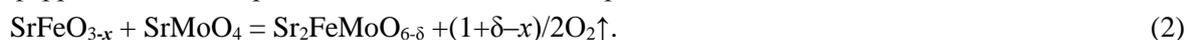


Рис. 2. Температурная зависимость тепловых эффектов в стехиометрической смеси исходных реагентов $\text{SrFeO}_{3-x} + \text{SrMoO}_4$ при скорости нагрева смеси $v = 2$ град/мин в потоке смеси инертных газов 5 % H_2/Ar

Установлено, что при нагреве до $T = 670$ К практически не происходит никаких реакций в исходной смеси. Эндотермический эффект, проявляющийся при $T \sim 670$ К, достигающий минимума при $T \sim 1020$ К и заканчивающийся в области $T \sim 1210$ К обусловлен образованием и последующим ростом соединения $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, что подтверждается данными рентгенофазового анализа (рис. 3).

Одновременно, по данным термогравиметрического анализа в интервале температур $T \sim (820\text{--}1270)$ К имеет место уменьшение массы образца ($\Delta m/m_0 \sim 4\%$), указывающее на протекание химических реакций с выделением газообразных продуктов (рис. 4). В связи с этим эндотермический и термогравиметрические эффекты обусловлены кристаллизацией ферромолибдата стронция с выделением кислорода:



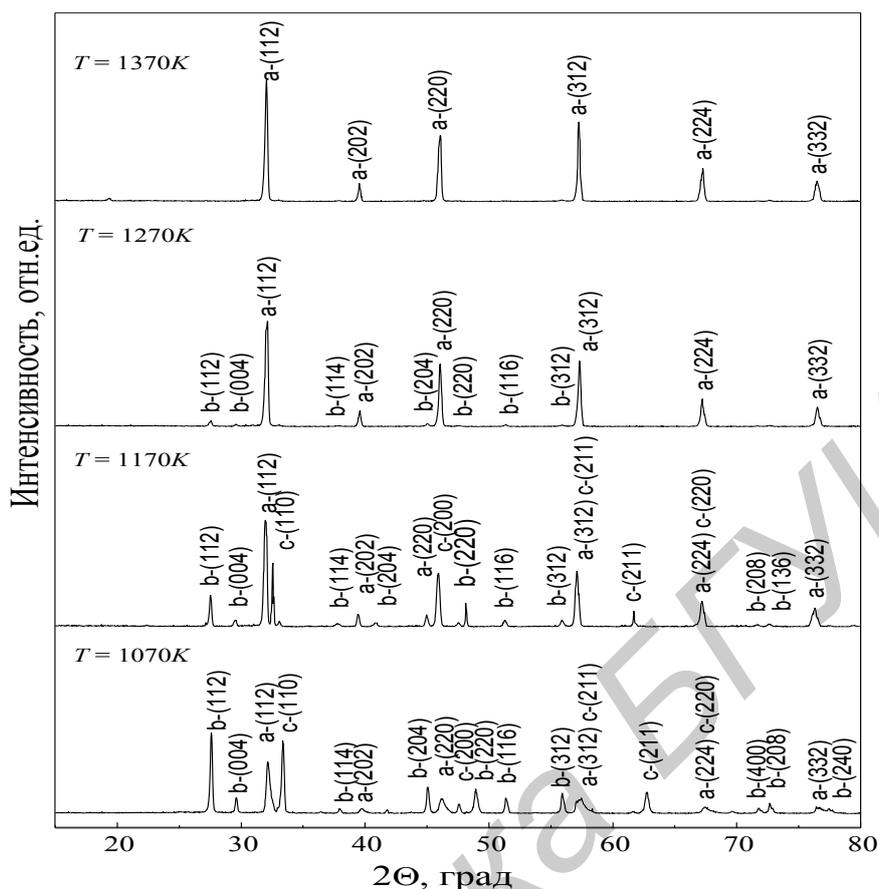


Рис. 3. Рентгеновские спектры закаленных при различных температурах образцов, синтезированных из прекурсоров SrFeO_{3-x} и SrMoO_4

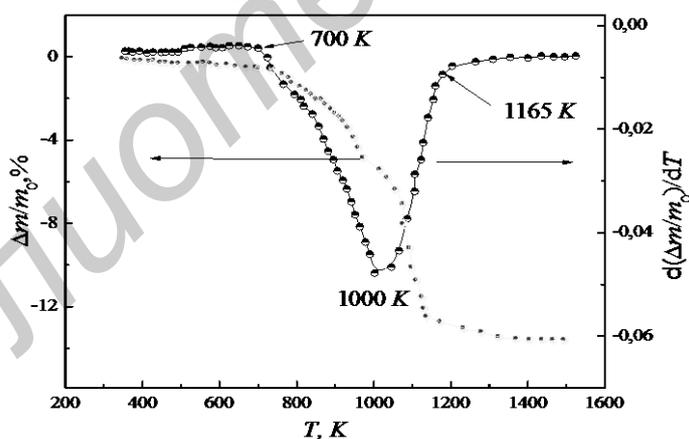


Рис. 4. Температурная зависимость изменения производной нормированной массы смеси порошка $\text{SrFeO}_{3-x} + \text{SrMoO}_4$, отожженного в непрерывном потоке смеси инертных газов 5 % H_2/Ar при скорости нагрева смеси $v = 2$ град/мин

Согласно данным рентгенофазового анализа закаленных образцов, первоначально состоящих из стехиометрической смеси исходных реагентов (SrFeO_{3-x} и SrMoO_4), отожженных при скорости нагрева $v = 2$ град/мин в интервале температур $T = (300-1370)$ К, установлена следующая последовательность фазовых превращений: $\{\text{SrMoO}_4, \text{SrFeO}_{3-x}\}$ (770 К) \rightarrow $\{\text{SrMoO}_4, \text{SrFeO}_{3-x}, \text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (следы) $\}$ (870 К) \rightarrow $\{\text{SrMoO}_4, \text{SrFeO}_{3-x}$ (следы), $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (1170 К) \rightarrow $\{\text{SrMoO}_4$ (следы), $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ (1270 К) \rightarrow $\{\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}\}$ (1370 К) (рис. 3). В этом случае механизм формирования $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ можно рассматривать, как реакцию между SrFeO_{3-x} и SrMoO_4 .

Отметим, что при увеличении температуры в интервале $T = (770-970)$ К значения углов дифракционных максимумов фазы SrFeO_{3-x} смещаются в сторону более низких значений (рис. 5). Согласно [6–8] можно предположить, что смещение связано с растворением части катионов Mo^{5+} в кристаллической решетке SrFeO_{3-x} , приводящем к увеличению ее объема и, соответственно, смещению рентгеновских рефлексов. Но с таким объяснением трудно согласиться, и вот почему. Известно, что соединение SrFeO_{3-x} характеризуется широкой областью изменения содержания кислорода ($2,5 < 3-x < 3,0$), в пределах которой могут существовать три кристаллоструктурных модификаций – орторомбическая (при $2,50 < 3-x < 2,75$), тетрагональная (при $2,75 < 3-x < 2,87$) и кубическая (при $2,87 < 3-x < 3,0$). При анализе образцов SrFeO_{3-x} , отожженных в политермическом режиме со скоростью нагрева $v = 2$ град/мин и закаленных при различных температурах, установлено смещение рентгеновских рефлексов на $\varphi = (1-2)$ град, что обусловлено появлением кислородных вакансий, приводящих к увеличению объема элементарной ячейки кристаллической решетки (рис. 5).

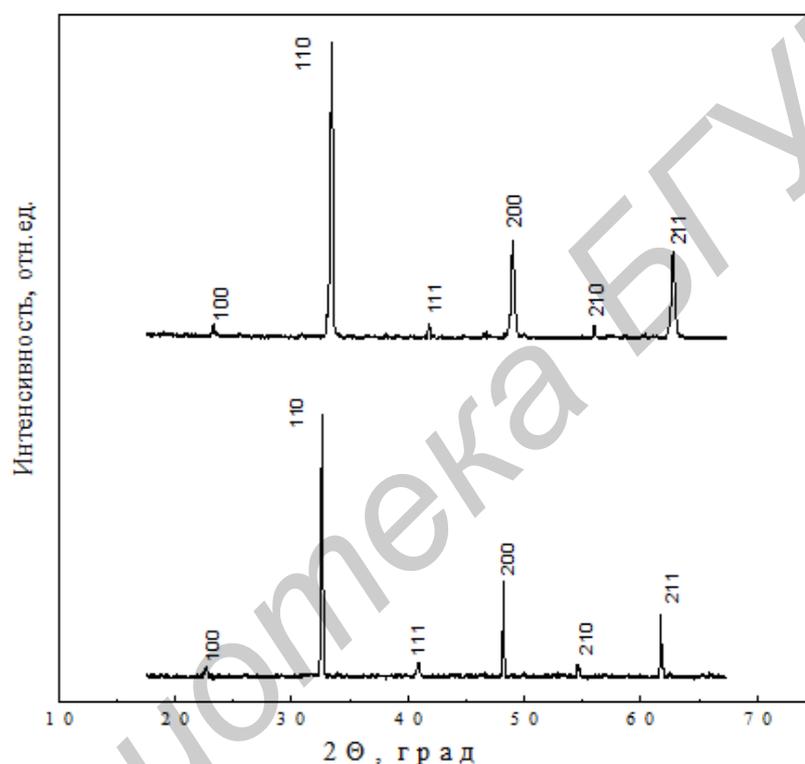


Рис. 5. Рентгеновские спектры образцов SrFeO_{3-x} : температура закалки $T = 770$ К (сверху), температура закалки $T = 970$ К (снизу)

На начальном этапе взаимодействия образующийся ферромолибдат стронция обогащен железом и его состав в ходе реакции изменяется в сторону увеличения содержания молибдена (рис. 6). Железо, находящееся в составе сложного оксида SrFeO_{3-x} , реагирует с образованием $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ уже при $T = 870$ К. Установленный факт более быстрого вступления железа, находящегося в составе сложного оксида SrFeO_{3-x} при более низких температурах, возможно, связан с увеличением кристаллообразующей поверхности при образовании и росте ферромолибдата стронция. В качестве активных центров для появления зародышей новой фазы $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ являются поверхности стронциевого феррита, на которых реализуется процесс диссоциации, сопровождающийся разложением SrFeO_{3-x} во время роста $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$. Начиная с зародышей новой фазы, граница раздела твердых фаз перемещается вглубь области формирования материнской фазы SrFeO_{3-x} , что приводит к уменьшению скорости роста $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$. Если образовавшийся слой продукта обладает низкой подвижностью катионов и анионов, то гетерогенная реакция из адсорбционно-химического режима переходит в диффузионный режим, на что указывают выше приведенные результаты.

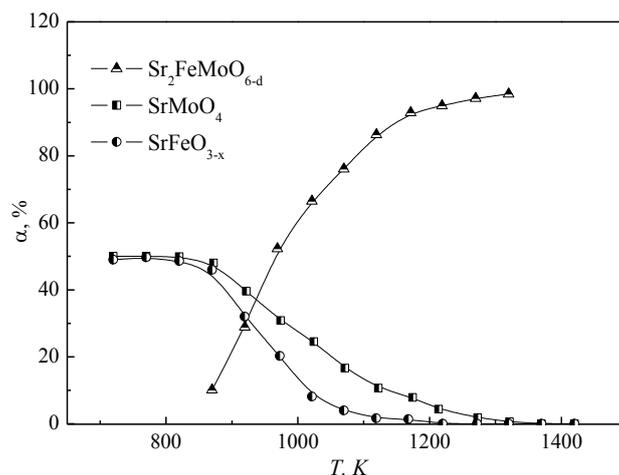


Рис. 6. Температурные зависимости степени превращения соединений $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$, SrMoO_4 и SrFeO_{3-x} в образцах, синтезированных в политермических условиях из стехиометрической смеси $\text{SrMoO}_4 + \text{SrFeO}_{3-x}$

Заключение

На основании изучения последовательности фазовых превращений при кристаллизации $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ установлено, что синтез ферромolibдата стронция протекает через ряд последовательно-параллельных стадий. На начальном этапе взаимодействия образующийся ферромolibдат стронция обогащен железом и его состав в ходе реакции изменяется в сторону увеличения содержания молибдена. Железо, входящее в состав сложного оксида SrFeO_{3-x} в стехиометрической смеси $\text{SrMoO}_4 + \text{SrFeO}_{3-x}$, является более реакционно-активным компонентом и реагирует с образованием $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ уже при $T = 870$ К. В этом случае использование прекурсоров SrMoO_4 и SrFeO_{3-x} способствует уменьшению температуры с $T = 1420$ К до $T = 1370$ К при синтезе однофазного соединения $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$.

THE SEQUENCE OF PHASE TRANSFORMATIONS DURING THE CRYSTALLIZATION MATERIAL WITH COMPOSITION $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ FROM PRECURSORS

N.A. KALANDA, S.A. KOVALEVA, L.S. LOBANOVSKIY, L.I. HURSKI, M.V. YARMOLICH

Abstract

The sequence of phase transformations during $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ crystallization by solid phase method was studied for powders synthesized from the stoichiometric mixture of SrFeO_{3-x} and SrMoO_4 precursors. It was found that the synthesis of strontium ferromolybdate solid solution proceeds through a series of parallel chemical reactions. Reveals that at the beginning stage of interaction the initially formed $\text{Sr}_2\text{FeMoO}_{6-\delta}$ powder is enriched with iron. During the annealing process, the composition of strontium ferromolybdate changes and the molybdenum content increases upon further heating. It was found that the use of precursors reduces the annealing temperature.

Список литературы

1. Serrate D., De Teresa J. M., Ibarra M.R. // J. Phys.: Condens. Matter. 2007. Vol.19. P. 1–86.
2. Huang Y., Yamauchi H., Karppinen M. // Appl. Phys. Lett. 2005. Vol. 86. P. 0725101–0725103.
3. Yuan C.L., Zhu Y., Ong P.P. // App. Phys. Lett. 2003. Vol. 82. Iss. 6. P. 934.
4. Kalanda M., Suchaneck G., Saad A. M. et al. // Mater. Sci. Forum. 2010. Vol. 636-637. P 338–343.
5. Kalanda N., Демьянов С., Masselink W. et al. // Cryst. Res. Technol. 2011. Vol.6. №5. P. 463–469.
6. Fang T.-T., Lin J.-C. // J. Mater. Sci. 2005. Vol. 40. P. 683–686.
7. Topwal D., Sarma D. D., Kato H. et al. // Phys. Rev. B. 2006. Vol. 73. P. 0944191–0944195.
8. Каланда Н.А., Демьянов С.Е., Крупа Н.Н и др. // ФТВД. 2010. Том 20. № 2. С. 52–62.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ ЖУРНАЛА «ДОКЛАДЫ БГУИР»

1. К публикации принимаются статьи, отражающие результаты **оригинальных научно-технических исследований и разработок, не опубликованные и не предназначенные для публикации в других изданиях**. Тематика представляемой статьи должна соответствовать рубрикам журнала (электроника, радиофизика, радиотехника, информатика).

2. Статьи должны быть написаны в сжатой и ясной форме и содержать соответствующий индекс УДК; название на русском и английском языках; инициалы и фамилии авторов на русском и английском языках; полное название учреждений, в которых выполнялось исследование (с указанием адреса); ключевые слова (до 10 слов) на русском языке; аннотацию на русском и английском языках (3–5 предложений). Рекомендуется стандартизировать текст статьи, используя подзаголовки **введение, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и их обсуждение, заключение, список литературы**.

3. Статья представляется в двух экземплярах, распечатанных на листах формата А4, и в электронном варианте в виде файла формата MS Word (расширение – *.doc). Также необходимо представить *акт экспертизы* о возможности опубликования статьи в открытой печати.

Количество страниц и иллюстраций:

- для оригинальной статьи – не более 7 страниц и 8 иллюстраций;
- для краткого сообщения – не более 3 страниц и 2 иллюстраций.

4. При наборе текста используется гарнитура Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Устанавливаемый размер бумаги – А4 (210×297 мм). Поля слева, справа, сверху и снизу – по 25 мм. Межстрочный интервал – 1,0. Абзацный отступ – 1,25 см. *Запрещается* при наборе текста использовать гиперссылки, маркированные списки и ручные переносы слов.

5. **Формульные выражения** выполняются только в редакторе формул MathType, стиль – «Математика» («Math»), гарнитура – Times New Roman и Symbol, кегль – 11 pt. Как в тексте статьи, так и в формульных выражениях, математические функции, цифры, буквы греческого и русского алфавитов набираются прямым начертанием, латинские буквы – курсивом. Нумеровать рекомендуется те формульные выражения, на которые имеются ссылки в последующем тексте, заключая при этом номер в круглые скобки.

6. Рисунки выполняются в соответствии со следующими требованиями:

- размер рисунка – не более 15×20 см, разрешение – не менее 300 dpi;
- рисунок должен быть оформлен как графический объект;
- подрисуночные подписи обязательно должны включать в себя номер и название рисунка;
- словесных обозначений на рисунках рекомендуется избегать, используя при этом цифровые либо буквенные обозначения, пояснения к которым следует давать в тексте статьи либо подрисуночных подписях;
- цифровые и буквенные обозначения на рисунках по начертанию и размеру должны соответствовать обозначениям в тексте статьи либо подрисуночных подписях.

7. Наименования, обозначения, определения и правила применения единиц физических величин, употребляемых в статье, должны соответствовать ГОСТ 8.417–2002.

8. Ссылки на литературные источники нумеруются в порядке их цитирования в тексте. Номера ссылок заключаются в квадратные скобки.

9. Набор статьи рекомендуется производить в шаблоне, доступном для скачивания на сайте БГУИР (www.bsuir.by → «Журнал "Доклады БГУИР"» → раздел «Авторам»).

10. Адрес для пересылки статей в электронном варианте и переписки с редакцией: doklady@bsuir.by.

***Ответственность за оригинальность и достоверность
материалов, поданных в печать, несут авторы.***