

с е т е в о й   н а у ч н ы й   ж у р н а л

# НАУЧНЫЙ РЕЗУЛЬТАТ

RESEARCH RESULT

Том 1 | № 1  
Volume 1 |

ИНФОРМАЦИОННЫЕ  
ТЕХНОЛОГИИ

INFORMATION  
TECHNOLOGY

ISSN 2518-1092

сетевой научный рецензируемый журнал  
online scholarly peer-reviewed journal

Сайт журнала:  
[www.research-result.ru](http://www.research-result.ru)



Журнал зарегистрирован в Федеральной службе по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)  
Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл. № ФС77-55674 от 28 октября 2013 г.

The journal has been registered at the Federal service for supervision of communications information technology and mass media (Roskomnadzor)  
Mass media registration certificate El. № FS 77-55674 of October 28, 2013



Том 1, №1. 2016

СЕТЕВОЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Издается с 2016 г.

ISSN 2518-1092



Volume 1, № 1. 2016

ONLINE SCHOLARLY PEER-REVIEWED JOURNAL

First published online: 2016

ISSN 2518-1092

**РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:**

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР: **Жиликов Е.Г.**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета.

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА: **Черноморец А.А.**, кандидат технических наук, профессор кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета.

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ: **Болгова Е.В.**, ассистент кафедры прикладной информатики и информационных технологий Белгородского государственного национального исследовательского университета.

РЕДАКТОР АНГЛИЙСКИХ ТЕКСТОВ СЕРИИ: **Ляшенко И.В.**, кандидат филологических наук, доцент

**ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:**

**Ломакин В.В.**, кандидат технических наук, заведующий кафедрой прикладной информатики и информационных технологий НИУ «БелГУ»

**Гахова Н.Н.**, кандидат технических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий НИУ «БелГУ»

**РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ:**

**Волчков В.П.**, доктор технических наук, профессор (Московский технический университет связи и информатики, г. Москва)

**Дмитриенко В.Д.**, доктор технических наук, профессор (Харьковский национальный технический университет «ХПИ», г. Харьков, Украина)

**Капалин В.И.**, доктор технических наук, профессор (Московский государственный институт электроники и математики (технический университет), г. Москва)

**Корсунов Н.И.**, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

**Маторин С.И.**, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

**Рубанов В.Г.**, заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород)

**Белов С.П.**, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

**Магергут В.З.**, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, г. Белгород)

**Коськин А.В.**, доктор технических наук, профессор (Приокский государственный университет, г. Орел)

**Иващук О.А.**, доктор технических наук, профессор (Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород)

**EDITORIAL TEAM:**

EDITOR-IN-CHIEF: **Evgeniy G. Zhilyakov**, Doctor of Technical Sciences, Professor, Belgorod State National Research University

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF: **Andrey A. Chernomorets**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belgorod State National Research University

EXECUTIVE SECRETARY: **Evgeniya V. Bolgova**, assistant, Belgorod State National Research University

ENGLISH TEXT EDITOR: **Igor V. Lyashenko**, Ph.D. in Philology, Associate Professor

**EDITORIAL BOARD:**

**Vladimir V. Lomakin**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Belgorod State National Research University

**Nina N. Gahova**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Belgorod State National Research University

**CONSULTING EDITORS:**

**Valery P. Volchkov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Valery D. Dmitrienko**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Ukraine)

**Vladimir I. Kapalin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Nikolay I. Korsunov**, Honoured Science Worker of Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Sergey I. Matorin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Vasily G. Rubanov**, Honoured Science Worker of Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Sergey P. Belov**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Valery Z. Magergut**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Alexander V. Koskin**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

**Olga A. Ivaschuk**, Doctor of Technical Sciences, Professor (Russia)

Учредитель: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Белгородский государственный национальный исследовательский университет»  
Издатель: НИУ «БелГУ». Адрес издателя: 308015 г. Белгород, ул. Победы, 85.  
Журнал выходит 4 раза в год

Founder: Federal state autonomous educational establishment of higher professional education «Belgorod State National Research University»

Publisher: Belgorod State National Research University  
Address of publisher: 85 Pobeda St., Belgorod, 308015, Russia  
Publication frequency: 4 / year

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

### COMPUTER SIMULATION HISTORY

<b>Заковоротный А.Ю.</b> Новые архитектуры и алгоритмы обучения нейронных сетей адаптивной резонансной теории	<b>4</b>	<b>Zakovorotniy A.Yu.</b> New architectures and algorithms of training the adaptive resonance theory to neural networks	<b>4</b>
<b>Пигнастый О.М.</b> Разработка методов решения задач континуального линейного программирования с использованием полиномов Лежандра	<b>12</b>	<b>Pihnastyi O.M.</b> Development of methods for solving the tasks of the continuum linear programming using Legendre polynomials	<b>12</b>

### СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ

### SYSTEM ANALYSIS AND PROCESSING OF KNOWLEDGE

<b>Звягинцева А.В.</b> О создании рейтинговой web-системы открытого доступа для оценки развития стран и городов мира	<b>18</b>	<b>Zvyagintseva A.V.</b> Establishing an open access rating web-system for assessing the development of cities and countries around the world	<b>18</b>
<b>Привалов А.Н., Богатырева Ю.И.</b> Моделирование процессов в информационно-образовательной среде вуза с применением агрегативных моделей	<b>24</b>	<b>Privalov A.N., Bogatyreva Yu. I.</b> Modelling the processes in the information and educational environment of the university with application of aggregate models	<b>24</b>
<b>Журавков М.А., Таранчук В.Б.</b> Возможности и примеры использования системы Mathematica при преподавании дисциплин и изучении разделов по основам компьютерного моделирования в механике	<b>30</b>	<b>Zhuravkov M.A., Taranchuk V.B.</b> Performance capabilities and examples of usage of the <i>Mathematica</i> system in teaching disciplines and study of sections dedicated to the basics of computer modelling in mechanics	<b>30</b>
<b>Путивцева Н.П., Игрунова С.В., Бекетова Е.Ю., Капитан С.А.</b> Разработка иерархической многокритериальной процедуры оценки качества экспертов	<b>39</b>	<b>Putivtseva N.P., Igrunova S.V., Beketova E.Yu., Capitan S.A.</b> Implementation of the hierarchical multicriteria procedure of the evaluation of experts' quality	<b>39</b>

### ИНФОРМАЦИОННО- ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

### SYSTEM ANALYSIS AND PROCESSING OF KNOWLEDGE

<b>Васильев Р.А., Николаев Д.Б.</b> Анализ возможностей применения голосовой идентификации в системах разграничения доступа к информации	<b>48</b>	<b>Vasiliev R.A., Nikolaev D.B.</b> Analyzing the possible use of voice identification in the systems of access to information	<b>48</b>
<b>Жиляков Е.Г., Черноморец А.А., Болгова Е.В., Голощанова В.А.</b> О методе оптимальной субполосной фильтрации	<b>58</b>	<b>Zhilyakov E.G., Chernomorets A.A., Bolgova E.V., Goloschapova V.A.</b> On the method of optimal subband filtration	<b>58</b>

---

<b>Ушакова Н.Н., Винтаев В.Н.</b> Верификация результатов деконволюции космического изображения высокого разрешения методом малых возмущений оператора деконволюции	<b>65</b>	<b>Ushakova N.N., Vintaev V.N.</b> Verification of results of deconvolution of space high-resolution images with the method of small indignations of a deconvolution operator	<b>65</b>
<b>Винтаев В.Н., Жиленев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н.</b> Техника формирования и коррекции резкости космических изображений высокого разрешения	<b>72</b>	<b>Vintaev V.N., Zhilenev M.Ju., Matorin S.I., Ushakova N.N.</b> The technique of formation and correction of high resolution space images	<b>72</b>

---

## КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ COMPUTER SIMULATION HISTORY

УДК 681.513:620.1

DOI

**Заковоротный А. Ю. | НОВЫЕ АРХИТЕКТУРЫ И АЛГОРИТМЫ ОБУЧЕНИЯ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ АДАПТИВНОЙ РЕЗОНАНСНОЙ ТЕОРИИ**

доцент кафедры вычислительной техники и программирования факультета компьютерных и информационных технологий, кандидат технических наук, доцент. Национальный технический университет «Харьковский Политехнический институт», ул. Фрунзе, 21, г. Харьков, 61002, Украина. *e-mail: Arcade@i.ua*

### Аннотация

Проанализированы достоинства и недостатки архитектур и алгоритмов обучения дискретных нейронных сетей адаптивной резонансной теории (АРТ). Предложены новые архитектуры нейронных сетей АРТ и алгоритмы обучения сетей АРТ без адаптации весов связей распределенных распознающих нейронов.

**Ключевые слова:** дискретные нейронные сети адаптивной резонансной теории; алгоритмы обучения.

Zakovorotniy A.Yu.

**NEW ARCHITECTURES AND ALGORITHMS OF TRAINING THE ADAPTIVE RESONANCE THEORY TO NEURAL NETWORKS**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor. Department of Computer Engineering and Programming, Faculty of Computer and Information Technologies. National Technical University «Kharkov Polytechnic Institute» 21 Frunze St., Kharkov, 308015, Ukraine. *e-mail: Arcade@i.ua*

### Abstract

The article analyzes the advantages and disadvantages of architectures and algorithms of training the Adaptive Resonance Theory (ART) to discrete neural networks. The authors propose some new architectures of ART neural networks and training algorithms of these networks without adaptation of link weights of distributed recognizing neurons.

**Keywords:** adaptive resonance theory of discrete neural networks; training algorithms

### Постановка проблемы исследований

Системы управления, распознавания, классификации, прогнозирования, идентификации на основе искусственных нейронных сетей (НС) многими авторами рассматриваются как альтернатива классическим системам. В настоящее время известен целый ряд возможных архитектур для построения нейросетевых систем управления, а также систем управления, где нейрорегуляторы работают параллельно обычным регуляторам [1–4]. Большой интерес к нейросетевым системам управления связан с тем, что они имеют ряд полезных свойств, которых трудно добиться с помощью других методов. В частности, речь идет о робастности систем управления, об

определении управлений в условиях, когда неточно известна модель объекта, более гибком реагировании на изменяющиеся внешние условия, возможности обработки данных различной природы. Можно также отметить, что для нейросетевых моделей не существует ограничений, связанных с нелинейностью системы, ее порядком или видом применяемого функционала.

Известен и целый ряд НС, пригодных для разработки высокоэффективных систем распознавания, классификации, прогнозирования, идентификации [3–6]. Большой интерес к нейросетевым системам распознавания, классификации и т.д. связан с тем, что они имеют ряд полезных свойств, которых часто трудно

добиться с помощью других методов. В частности, речь идет об их универсальности, о возможности построения НС под задачу, о возможности обучения на примерах, о самообучении и обобщении, распознавании новой информации, об использовании ассоциаций, о распознавании и классификации зашумленных изображений, возможности обработки данных различной природы и т.д. [5–7]. В тоже время существуют и определенные проблемы при разработке систем на основе НС.

Для идентификации и управления в реальном времени динамическими объектами, содержащими в своих структурах "черные" и "серые" ящики применяются нейронные сети, основанные на аппроксимации нелинейностей, например, рядами Вольтера, Винера, полиномами Колмогорова-Габора, нелинейными разностными уравнениями. Однако в тех случаях, когда управление "черным" или "серым" ящиком должно осуществляться на распознавании ситуаций, которые определяются некоторым множеством динамических процессов, несмотря на большое число работ в этой области, до сих пор удовлетворительных систем управления разработать не удалось. Это связано с особенностью обучения НС, которая, как правило, требует наличия всей исходной информации, поскольку обучение новому образу методом обратного распространения ошибки или генетическими алгоритмами, или другими методами требует, как правило, полного переобучения сети. Этот же недостаток характерен и для других систем на основе НС: распознавания, классификации, прогнозирования и т.д. Все это требует совершенствования известных и разработки новых НС, позволяющих расширить область эффективного применения искусственных нейронных сетей.

#### **Анализ последних исследований и публикаций**

Невозможность с помощью уже известных НС [1 – 6] решить проблему восприятия новой информации при сохранении уже имеющейся (т.е. решить проблему стабильности–пластичности) привело к разработке принципиально новых конфигураций НС – сетей адаптивной резонансной теории (АРТ). Эти сети в определенной степени решают противоречивые задачи чувствительности (пластичности) к новым данным и сохранения полученной ранее информации (стабильности). Поэтому проблемы распознавания конкретных режимов

динамических объектов и адаптация системы в процессе эксплуатации могут решаться на основе НС АРТ [5–9]. Однако известные дискретные нейронные сети АРТ имеют и существенные недостатки, если требуется запоминать сотни или тысячи реализаций одного и того же динамического процесса, поскольку матрица весов связей между  $S$ - и  $Y$ -нейронами размерностью  $n \times m$  ( $n$  – число  $S$ -нейронов входного слоя;  $m$  – число распознающих  $Y$ -нейронов) хранит только одно изображение, полученное в результате пересечения запоминаемых динамических процессов. При малых значениях параметра сходства [7–11] в режиме распознавания память нейронной сети АРТ не имеет необходимого объема информации (наборов фрагментов изображений) для принятия обоснованных решений, а при больших значениях параметра аналогичные изображения, отличающиеся небольшим числом второстепенных деталей, запоминаются как прототипы разных классов изображений с помощью разных  $Y$ -нейронов. Это делает практическое использование этих НС сомнительным из-за чрезмерно большого числа  $Y$ -элементов распознающего слоя.

Другой недостаток сетей АРТ – связан с наличием только одного способа обучения НС путем адаптации весов связей распознающих нейронов, что может приводить к искажению или потере, хранящейся в памяти сети информации, нерациональной классификации входной информации. Еще одним недостатком сети АРТ-1 является отсутствие режимов обучения сети с учителем. Минусом НС АРТ является и невозможность получения нескольких решений, а также наличие только одного поля обрабатываемых нейронов.

**Целью статьи** является разработка новых архитектур и алгоритмов обучения дискретных нейронных сетей АРТ, позволяющих устранить существующие недостатки этих сетей и расширить область их эффективного применения.

#### **Архитектура и алгоритмы функционирования сети АРТ-1**

Архитектура нейронной сети АРТ-1 приведена на рис. 1 в прямоугольнике, нарисованном пунктирной линией. Эта сеть относит предъявленное изображение к одному из запомненных классов только в случае, если оно достаточно похоже на прототип этого класса, то есть на изображение, хранящееся в весах связей

нейронной сети. Если такое свойство, установленное с помощью специального параметра сходства между двумя изображениями [7–11], имеет место в режиме обучения, то найденный прототип модифицируется, чтобы стать более похожим на предъявленное сети входное изображение. При отсутствии достаточного сходства между предъявленным изображением и прототипами всех имеющихся классов, оно запоминается сетью как прототип нового класса. Это возможно благодаря тому, что информация об изображениях-прототипах хранится локально, только в весах связей одного распознающего нейрона, и сеть имеет значительное число неиспользуемых распознающих нейронов, избыток которых уменьшается по мере поступления новой входной информации. Наличие избыточных распознающих нейронов является принципиальной особенностью НС АРТ, поскольку при их отсутствии новые входные изображения просто теряются. Таким образом, локальное хранение информации и наличие избыточных распознающих нейронов позволяет запоминать новую информацию (новые образы), не искажая или теряя уже имеющуюся [7–10].

Основу архитектуры нейронной сети составляют три слоя нейронов: слой чувствительных  $S$ -нейронов, воспринимающих входную информацию в виде черно-белых изображений или бинарных входных векторов; слой бинарных интерфейсных  $Z$ -нейронов; слой распознающих  $Y$ -нейронов.  $Z$ - и  $S$ -элементы объединяются в поле  $F_1$  входных обрабатывающих нейронов. Кроме этого, имеются еще три управляющих нейрона:  $R$ ,  $G_1$  и  $G_2$ .

Выход каждого бинарного нейрона  $S_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) входного слоя связан одной однонаправленной связью с единичным весовым коэффициентом с бинарным нейроном  $Z_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) интерфейсного слоя. Выходные сигналы всех чувствительных элементов поступают также по связям с единичными весовыми коэффициентами на входы управляющих нейронов  $R$ ,  $G_1$  и  $G_2$ . Каждый интерфейсный нейрон  $Z_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ) связан со всеми элементами  $Y_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ) распознающего слоя и с управляющим нейроном  $R$ . Связи с весовыми коэффициентами  $W_{ij}^1$  ( $i = \overline{1, n}$ ;  $j = \overline{1, m}$ ),

$0 \leq W_{ij}^1 \leq 1$  передают сигналы с выхода каждого  $Z$ -элемента на входы каждого  $Y$ -нейрона. Бинарные связи с весовыми коэффициентами  $W_{ji}^2$  ( $j = \overline{1, m}$ ;  $i = \overline{1, n}$ ) связывают выход каждого распознающего нейрона с входом каждого интерфейсного нейрона. На входы каждого  $Z$ -элемента по связям с единичными весовыми коэффициентами поступает также сигнал с выхода бинарного управляющего нейрона  $G_1$ . Сигналы с выходов всех  $Z$ -элементов по связям с единичными весовыми коэффициентами поступают на входы управляющего нейрона  $R$ . Такими же связями выходы всех распознающих нейронов соединены со входами нейрона  $G_1$ , а их входы – с выходами управляющих нейронов  $G_2$  и  $R$ . В любой момент времени нейроны  $S_i$  и  $Z_i$  ( $i = \overline{1, n}$ ),  $G_1$  и  $G_2$  находятся в одном из двух состояний: 0 или 1.

Нейроны  $Y$ -слоя с помощью дополнительной нейронной сети, на рис. 1 не показанной, образуют слой конкурирующих нейронов. Каждый элемент  $Y_j$  ( $j = \overline{1, m}$ ) распознающего слоя может находиться в одном из четырех состояний:

- активен, сеть АРТ-1 функционирует в режиме определения выходных сигналов нейронов распознающего слоя, выходной сигнал  $U_{\text{вых}Y_j}$  удовлетворяет условию  $0 \leq U_{\text{вых}Y_j} \leq 2$  и определяется выходными сигналами  $Z$ -элементов:

$$U_{\text{вых}Y_j} = U_{\text{вх}Y_j} = \sum_{i=1}^n W_{ij}^1 U_{\text{вх}Z_i};$$

- активен,  $U_{\text{вых}Y_j} = 1$ , нейрон  $Y_j$  является победителем при текущем предъявлении входного изображения;

- неактивен,  $U_{\text{вых}Y_j} = 0$ , нейрон установлен в начальное состояние или проиграл соревнование с другими нейронами при текущем предъявлении входного изображения;

- заторможен,  $U_{\text{вых}Y_j} = -1$ , информация, хранящаяся в весах связей нейрона, не удовлетворяет текущему входному изображению по величине параметра сходства, поэтому нейрон исключен из соревнования.

Все связи нейронной сети АРТ-1 являются возбуждающими, за исключением связей от  $Y$ -элементов к нейрону  $G_1$  и от интерфейсных  $Z$ -элементов к нейрону  $R$ , которые передают тормозящие сигналы.

Z- и Y-нейроны получают сигналы из трех источников: Z-нейроны – от управляющего нейрона  $G_1$  и от нейронов слоев S и Y; Y-нейроны – от управляющих нейронов  $G_2$ , R и от Z-нейронов. Z- и Y-элементы переходят в активное состояние по правилу "два из трех", то есть только при наличии сигналов из двух различных источников. Например, если Y-нейрон получает только  $n$  единичных сигналов с выходов всех Z-элементов, но нет возбуждающего сигнала от управляющего нейрона  $G_2$ , то перейти в активное состояние он не может.

Для обучения дискретных нейронных сетей АРТ-1 обычно используется метод быстрого обучения, при котором равновесные веса связей нейронов определяются за одно предъявление входного изображения [8–11].

#### **Недостатки нейронной сети АРТ-1**

Поясим один из недостатков сети АРТ-1 с помощью следующего примера.

*Пример 1.* Пусть требуется с помощью сети разделить на два класса следующее множество векторов:

$$\begin{aligned} S^1 &= (1,1,1,1,0,0,0,0), & S^2 &= (0,1,1,1,0,0,0,0), \\ S^3 &= (1,0,1,1,0,0,0,0), \\ S^4 &= (1,1,0,1,0,0,0,0), \\ S^5 &= (1,1,1,0,0,0,0,0), \\ S^6 &= (0,0,0,0,1,1,1,1), \\ S^7 &= (0,0,0,0,0,1,1,1), \\ S^8 &= (0,0,0,0,1,0,1,1), \\ S^9 &= (0,0,0,0,1,1,0,1), \\ S^{10} &= (0,0,0,0,1,1,1,0). \end{aligned}$$

Классификация приведенных векторов может быть выполнена многими способами. Один из наиболее напрашивающихся – отнести к первому классу вектора  $S^1, S^2, \dots, S^5$ , а ко второму классу – вектора  $S^6, S^7, \dots, S^{10}$ , то есть сформировать классы векторов, отличающиеся от векторов  $S^1$  и  $S^6$  не более, чем одним компонентом.

Возьмем сеть со следующими параметрами:  $m = 6$  – число Y-нейронов в распознающем слое сети;  $n = 8$  – число нейронов во входном слое сети;  $p = 0,5$  – параметр сходства; выбирается такое числовое значения исходя из того, что векторы  $S^1, S^2, \dots, S^5$  и  $S^6, S^7, \dots, S^{10}$  в

каждом классе отличаются друг от друга не более, чем двумя компонентами;  $W_{ij}^1 = 1/(1+n) = 1/(1+8) = 0,111$  – начальные значения весов связей  $W_{ij}^1$  ( $i = \overline{1, 8}; j = \overline{1, 6}$ );  $W_{ji}^2 = 1$  – начальные значения весов связей  $W_{ji}^2$  ( $i = \overline{1, 8}; j = \overline{1, 6}$ );  $L = 2$  – константа, для коррекции весов связей  $W_{ij}^1$  ( $i = \overline{1, 8}; j = \overline{1, 6}$ ) в процессе обучения;  $q=10$  – число классифицируемых входных бинарных векторов.

Нетрудно проверить, что в процессе обучения нейронной сети исходное множество векторов будет разбито на классы:  $\{S^1, S^2, S^3\}, \{S^4, S^5\}, \{S^6, S^7, S^8\}, \{S^9, S^{10}\}$ , если вектора будут подаваться на вход сети в порядке возрастания их номеров. Дополнительный анализ показывает, что разбиение векторов  $S^1, S^2, \dots, S^{10}$  на классы при заданной величине параметра сходства зависит и от порядка их предъявления в обучающей последовательности. Например, нетрудно получить следующие классификации  $K^r$  векторов  $S^1, S^2, \dots, S^5$ :  $K^1 = \{\{S^1, S^2, S^3\}, \{S^4, S^5\}\}$  (получена выше);  $K^2 = \{\{S^1, S^2, S^4\}, \{S^3, S^5\}\}$ ;  $K^3 = \{\{S^1, S^2, S^5\}, \{S^3, S^4\}\}$ ;  $K^4 = \{\{S^1, S^3, S^5\}, \{S^2, S^4\}\}$  и т.д.

Неудача с решением задачи классификации указанного множества векторов связана с особенностями архитектуры и алгоритма функционирования нейронной сети АРТ-1. Во-первых, сеть в весах связей распознающего нейрона запоминает пересечение бинарных входных векторов. Во-вторых, близость бинарных векторов определяется с помощью параметра сходства, учитывающего только единичные элементы сравниваемых векторов. В анализируемом примере пересечением бинарных векторов  $S^1, S^2, \dots, S^5$  (а также векторов  $S^6, S^7, \dots, S^{10}$ ) является вектор со всеми нулевыми компонента:  $S^0 = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ .

Таким образом, при пересечении рассматриваемых множеств векторов полностью утеряна информация об единичных компонентах бинарных векторов. Запоминание информации в нейронной сети в виде пересечения входных векторов или изображений всегда приводит к

потере информации. При малых значениях параметра сходства может теряться основная часть информации по классифицируемым или распознаваемым изображениям.

При запоминании множеств реализаций одного и того же динамического процесса, когда каждая реализация вносит что-то новое по сравнению с другими реализациями и когда запомнить каждую реализацию практически невозможно из-за их слишком большого числа, в памяти сети необходимо хранить не пересечения обучающих изображений, а комплексные изображения, полученные из исходных с помощью логической операции "ИЛИ", других математических операций, эвристик или комбинации указанных способов формирования обучающих изображений [11]. Частным случаем является запоминание информации в виде объединения, а не пересечения бинарных изображений или векторов. В рассматриваемом примере имеем  $S^1 \cup S^2 \cup S^3 \cup S^4 \cup S^5 = S^1$ . Запоминание единственного вектора  $S^1$  приводит к получению матриц весов связей  $W^1, W^2$ , с помощью которых могли бы правильно классифицироваться первые пять входных векторов, если бы после предъявления входных векторов не было, при наступлении резонанса, адаптации весов связей, меняющей память сети.

Обучение нейронной сети без адаптации весов связей распределенных распознающих  $Y$ -нейронов при наступлении резонанса, когда первыми во входной последовательности предъявляются вектора  $S^1, S^6$ , приводит к разбиению векторов  $S^1, S^2, \dots, S^{10}$  на два естественных класса  $\{S^1, S^2, S^3, S^4, S^5\}, \{S^6, S^7, S^8, S^9, S^{10}\}$ .

Обобщая рассмотренный пример, можно предложить общий метод обучения НС АРТ-1 без адаптации весов связей при наступлении резонанса последовательностью входных изображений:  $S^k, S^{k+1}, S^{k+2}, \dots, S^{q-1}, S^q$ , упорядоченных по убыванию величины нормы входного изображения, то есть  $\|S^k\| \geq \|S^{k+1}\| \geq \|S^{k+2}\| \geq \dots \geq \|S^{q-1}\| \geq \|S^q\|$ . Такой метод обучения разбивает исходное множество обучающих изображений на минимальное число классов.

При упорядочивании предъявляемых изображений по возрастанию величины нормы входного изображения, то есть

$\|S^k\| \leq \|S^{k+1}\| \leq \|S^{k+2}\| \leq \dots \leq \|S^{q-1}\| \leq \|S^q\|$ , число классов изображений, как правило, возрастает. Если в рассматриваемом примере входные вектора предъявлять сети в порядке  $S^2, S^3, S^4, S^5, S^7, S^8, S^9, S^{10}, S^1, S^6$ , то в результате обучения сети при параметре сходства, равном 0,5, будет получено шесть классов:  $\{S^2, S^3\}, \{S^4, S^5\}, \{S^7, S^8\}, \{S^9, S^{10}\}, \{S^1\}, \{S^6\}$ .

Успешное функционирование предложенных алгоритмов обучения нейронной сети указывает на возможность алгоритмов обучения последовательностями изображений, упорядоченных учителем по величине их нормы, причем в обучающей последовательности могут использоваться подпоследовательности как с возрастанием, так и с убыванием нормы входных изображений. Возможно также использование во входной последовательности комплексных изображений, полученных учителем в результате применения к изображениям входной последовательности некоторых математических операций, эвристик или комбинации указанных способов формирования обучающих изображений. При решении реальных задач эффективно также запрещение адаптации весов связей при наступлении резонанса только части распознающих нейронов, которые могут быть выделены в отдельный слой [11].

### **Дискретные нейронные сети АРТ, определяющие множества равноценных решений**

Еще один недостаток систем распознавания на основе нейронных сетей АРТ – получение единственного решения даже в тех случаях, когда имеется два или более равноценных решения. Поясним это с помощью следующего примера.

Пусть  $n = 8$ , параметр сходства  $p$  изображений равен 0,8 и в весах связей нейронов  $Y_1$  и  $Y_2$  после режима быстрого обучения хранятся изображения  $S^1 = (1,1,1,1,0,0,0,1)$ ,  $S^2 = (0,1,1,1,1,0,1,0)$ , а веса связей сети имеют следующие значения:  $W_{ij}^1 = 1/(1+n) = 0,111$  ( $i = \overline{1,8}; j = \overline{3,m}$ );  $W_{i1}^1 = 0,333$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 8$ );  $W_{i1}^1 = 0$  ( $i = 5, 6, 7$ );  $W_{i2}^1 = 0,333$  ( $i = 2, 3, 4, 5, 7$ );  $W_{i2}^1 = 0$  ( $i = 1, 6, 8$ );  $W_{li}^2 = 1$  ( $i = 1, 2, 3, 4, 8$ );  $W_{li}^2 = 0$

$(i=5,6,7); W_{2i}^2 = 1 \quad (i=2,3,4,5,7); W_{2i}^2 = 0$   
 $(i=1,6,8).$

При подаче на вход сети изображения  $S^3 = (1,1,1,1,0,0,1,0)$  на входах распознающих нейронов будут следующие сигналы:  
 $U_{вхY_1} = U_{вхY_2} = 0,333 \cdot 5 = 1,665,$

$U_{вхY_3} = U_{вхY_4} = \dots = U_{вхY_m} = 0,111 \cdot 5 = 0,555.$

В силу алгоритма функционирования сети победителем станет нейрон  $Y_1$ , при этом параметр сходства  $p$  будет иметь значение  $p = \|U_{вхYZ}\| / \|S^3\| = 4/5 = 0,8,$  где  $\|U_{вхYZ}\|$  – норма вектора выходных сигналов нейронов слоя  $Z$ ;  $\|S^3\|$  – норма вектора  $S^3$ . Но точно такой же параметр сходства был бы получен и в случае, если бы нейроном-победителем стал распознающий элемент  $Y_2$ .

Таким образом, при предъявлении входного изображения сеть относит это изображение к первому близкому изображению, хранящемуся в весах связей распознающих  $Y$ -нейронов, и тем самым определяет принадлежность входного изображения к одному из классов. Остальные возможные варианты решения задачи распознавания теряются. Для расширения возможностей дискретной нейронной сети АРТ и получения всех возможных вариантов решения задачи распознавания добавим к базовой архитектуре АРТ-1 еще один управляющий нейрон  $R^1$ , инвертирующий выходные сигналы

нейрона  $R$  (рис. 1), и слой регистрирующих нейронов  $Y_j^1 \quad (j=1, m)$ . Каждый нейрон  $Y_j^1$  связан однонаправленной бинарной связью с соответствующим нейроном  $Y_j$ . Перед началом режима распознавания нейроны  $Y_j^1 \quad (j=1, m)$ , как и другие нейроны сети, переводятся в пассивное состояние по цепям связей, на рисунке не показанным. Нейроны  $Y_j^1 \quad (j=1, m)$  переходят в активное состояние по правилу "два из трех" – при наличии единичных сигналов на выходе нейронов  $Y_j$  и управляющего нейрона  $R^1$ . Единичный сигнал с выхода нейрона  $Y_j^1$  по цепи обратной связи фиксирует единичный выходной сигнал элемента  $Y_j^1$  и затормаживает нейрон-победитель  $Y_j$ . После этого в сети начинается поиск нового нейрона-победителя. Процесс поиска продолжается до тех пор, пока все распознающие распределенные нейроны не окажутся заторможенными. При этом на выходах нейронов слоя  $Y^1$  может не оказаться ни одного единичного сигнала, так как входное изображение не похоже ни на одно из изображений, хранящихся в весах связей сети, либо на выходах  $Y^1$ -нейронов может быть один или несколько единичных сигналов, указывающих на принадлежность входного изображения к одному или нескольким классам изображений.

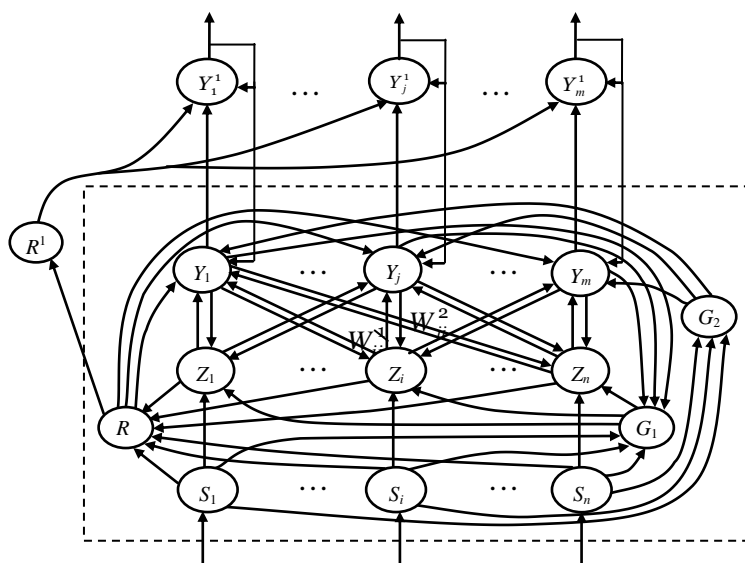


Рис. 1. Архитектура дискретной нейронной сети АРТ  
Fig. 1. The architecture of the discrete neural network of ART

еще один недостаток дискретных НС АРТ-1 – наличие только одного поля обрабатывающих нейронов, поскольку это не позволяет применять эти сети для разработки систем распознавания, где необходимо использовать разнородную информацию о процессах, существенно отличающуюся значениями параметра сходства [11]. Для распознавания сложных динамических режимов необходима нейронная сеть с несколькими полями чувствительных элементов и соответствующих им полей Z-нейронов. Эта сеть должна как воспринимать и распознавать отдельные компоненты входной информации, так и корректировать веса связей распознающих

нейронов при условии, что все распознанные компоненты с заданными значениями параметров сходства согласовываются в одном комплексном изображении. На рис. 2 приведена архитектура сети АРТ с  $d$  параллельно работающими полями чувствительных и интерфейсных нейронов. Сеть имеет также и  $d$  групп управляющих нейронов:  $R^1, G_1^1, G_2^1, \dots, R^d, G_1^d, G_2^d$ . Входы управляющих нейронов  $G_2, R$  связаны с выходами соответственно нейронов  $G_2^q (q = \overline{1, d})$  и  $R^q (q = \overline{1, d})$ .

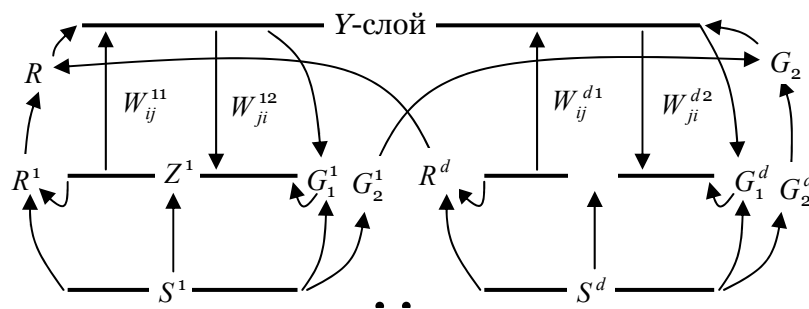


Рис. 2. Дискретная нейронная сеть АРТ с  $d$  параллельно работающими полями обрабатывающих нейронов  
Fig. 2. Discrete neural network in parallel with ART  $d$  working fields of processing neurons

Нейрон  $G_2$  переходит в активное состояние, обеспечивая работу распознающих нейронов по правилу "два из трех", только при активном состоянии всех управляющих нейронов  $G_2^q (q = \overline{1, d})$ . При определении нейрона-победителя в распознающем слое R-элемент не выдает запрещающего единичного сигнала нейрону-победителю только случае, когда на его вход не поступает ни одного единичного сигнала с выхода нейронов  $R^q (q = \overline{1, d})$ . Это возможно только при соответствии всех компонент входного изображения компонентам изображения, хранящегося в памяти нейронной сети.

Любое поле  $F_1^q (q = \overline{1, d})$  нейронной сети с параллельно функционирующими полями обрабатывающих нейронов выполняет функции, аналогичные функциям поля  $F_1$  сети АРТ-1 [11].

Каждый распознающий Y-нейрон этой сети, как и сети АРТ-1, связан со всеми интерфейсными нейронами двумя видами связей, передающих информацию как от интерфейсных нейронов к распознающим, так и наоборот. Алгоритмы функционирования нейронной сети с параллельно работающими полями

чувствительных и интерфейсных нейронов нетрудно восстановить, если известен алгоритм работы сети АРТ-1.

Принципиальное отличие и преимущество дискретной нейронной сети АРТ с параллельно функционирующими полями обрабатывающих нейронов по сравнению с сетью АРТ-1 состоит в том, что сложное изображение может быть разделено на нужное число фрагментов, и каждый фрагмент может распознаваться независимо со своим параметром сходства.

Метод, разработанный для обучения дискретной нейронной сети АРТ с одним полем чувствительных элементов и все алгоритмы, из него вытекающие, могут использоваться и в рассматриваемой нейронной сети. Однако число конкретных алгоритмов здесь существенно возрастает, поскольку в каждом поле может использоваться свой алгоритм определения весов связей распознающих нейронов.

### Выводы

Таким образом, разработан новый метод обучения дискретных нейронных сетей АРТ без адаптации в процессе обучения весов связей распределенных распознающих нейронов и на его основе предложен ряд новых алгоритмов

Таким образом, разработан новый метод обучения дискретных нейронных сетей АРТ без адаптации в процессе обучения весов связей распределенных распознающих нейронов и на его основе предложен ряд новых алгоритмов функционирования дискретных НС АРТ в режиме обучения как с учителем, так и без него. Эти алгоритмы открывают возможности компактного хранения больших объемов информации и расширяют возможности использования дискретных сетей АРТ для решения задач классификации и распознавания.

Разработана новая архитектура и алгоритмы функционирования дискретной НС АРТ, позволяющие определять два или более равноценных решения (если они существуют) в задачах распознавания. Предложена новая дискретная НС АРТ с параллельно работающими полями обрабатывающих нейронов. Принципиальное отличие и преимущество этой сети по сравнению с сетью АРТ-1 состоит в том, что сложное изображение может быть разделено на нужное число фрагментов, и каждый фрагмент может распознаваться независимо со своим параметром сходства.

Перспективой дальнейших исследований является разработка непрерывных НС АРТ, позволяющих определять два или более равноценных решения в задачах распознавания или классификации и работающих с несколькими полями чувствительных нейронов.

#### Список литературы

1. Комашинский В.И. Нейронные сети и их применение в системах управления и связи / В.И. Комашинский, Д.А. Смирнов. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 94 с.
2. Neural networks for control / Edited by W. Thomas Miller III, Richard S. Sutton, and Paul J. Werbos, – Cambridge, Massachusetts, London: MIT Press, 1996. – 524 P.
3. Барский А.Б. Нейронные сети: распознавание, управление, принятие решений / А.Б. Барский. – М.: Финансы и статистика, 2004. – 176 с.
4. Галушкин А.И. Нейрокомпьютеры и их применение на рубеже тысячелетий в Китае. В 2-х томах. Том 2 / А.И. Галушкин. – М.: Горячая линия – Телеком, 2004. – 464 с.
5. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.
6. Комарцова Л.Г. Нейрокомпьютеры: Учеб. пособие для вузов / Л.Г. Комарцова Л.Г., А.В. Максимов. – М.: Изд-во им. Н.Э. Баумана, 2002. – 320 с.

7. Grossberg S. Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance // Cognitive Science – 1987. – Vol. 11. – P. 23 – 63.

8. Carpenter G.A., Grossberg S. A massively parallel architecture for selforganizing neural pattern recognition machine // Computing, Vision, Graphics and Image Processing. – 1987. – Vol. 37. – P. 54 – 115.

9. Дмитриенко В.Д., Корсунов Н.И. Основы теории нейронных сетей / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов. – Белгород: БИИММАП, 2001. – 159 с.

10. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications. – New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. – 461 p.

11. Носков В.И. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / Носков В.И., Дмитриенко В.Д., Заполовский Н.И., Леонов С.Ю. – Х.: ХФИ Транспорт Украины, 2003. – 248 с.

#### References

1. Komashinskiy V.I. Neural Networks and their Application in the Systems of Management and Communication. Moscow: Goryachaja liniya – Telekom. 2002. 94 p.
2. Neural networks for control. Edited by W. Thomas Miller III, Richard S. Sutton, and Paul J. Werbos. Cambridge, Massachusetts, London: MIT Press, 1996. 524 p.
3. Barskiy A.B. Neural Networks: Identification, Management, Decision Making. Moscow: Finansy i statistika, 2004. 176 p.
4. Galushkin A.I. Neurocomputers and their Application at the Turn of the Millennium in China. In 2 volumes. Vol. 2. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom. 2004. 464 p.
5. Haikin S. Neural Networks: a Complete Course. Moscow: Izdatel'skij dom «Vil'jams», 2006. 1104 p.
6. Komartsova L.G. Neurocomputers: a Manual for Higher Institutions Moscow: Izd-vo im. N.Je. Baumana, 2002. 320 p.
7. Grossberg S. Competitive learning: From interactive activation to adaptive resonance. Cognitive Science. 1987. Vol. 11. P. 23 – 63.
8. Carpenter G.A., Grossberg S. A massively parallel architecture for selforganizing neural pattern recognition machine. Computing, Vision, Graphics and Image Processing. 1987. Vol. 37. Pp. 54-115.
9. Dmitrienko V.D., Korsunov N.I. Theoretical Basics of Neural Networks. Belgorod: БИИММАП, 2001. 159 p.
10. Fausett L. Fundamentals of Neural Networks. Architectures, Algorithms and Applications. New Jersey: Prentice Hall International, Inc., 1994. 461 p.
11. Noskov V.I. Modelling and Optimization of the Command and Control Systems in Locomotives. Kharkiv: HFI Transport Ukrainy, 2003. 248 p.

UDK 658.51.012

DOI

Pihnastyi O.M.

**DEVELOPMENT OF METHODS FOR SOLVING THE TASKS OF THE CONTINUUM LINEAR PROGRAMMING USING LEGENDRE POLYNOMIALS**

Doctor of Engineering, Professor. Department of Computer Monitoring and Logistics, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» 79-2 Pushkinskaya, Kharkov, 61102, Ukraine. *e-mail: pom7@bk.ru*

**Abstract**

The article demonstrates the theoretical foundations of the mathematical apparatus – the continuum of linear programming. It demonstrates a technique for solving problems with the use of orthogonal systems of functions. The article was an exact solution of the problem of variational calculus to linear constraints. The purpose of the work is to develop accurate methods of solving the problem in the class of Legendre polynomials. The study demonstrates an ability to build the exact solution of the problem and the conditions under which the decision is allowed. Based on the properties of Legendre polynomials, an exact solution of the problem of continual linear programming is provided, in which the integrands and functional limitations are presented in rows of finite degree. Analytically, it is proven that the solution obtained is a limiting case of the linear combination of delta functions. It is shown that the parameters of the optimization problem of finding the unknown functions plan contains half of the variables than in the canonical method. Recommendations are given for the construction of the optimization algorithm. There is a possibility of extending the proposed technology solution in the direction of using other systems of orthogonal polynomials.

**Keywords:** continual linear programming; Legendre polynomials; delta function.

Пигнастый О.М.

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ КONTИНУАЛЬНОГО ЛИНЕЙНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛИНОМОВ ЛЕЖАНДРА**

профессор кафедры компьютерного мониторинга и логистики, доктор технических наук, доцент Национальный Технический Университет “ХПИ”, ул. Пушкинская, д. 79-2, г. Харьков, 61102, Украина *e-mail: pom7@bk.ru*

**Аннотация**

В статье представлены теоретические основы математического аппарата континуума линейного программирования. Показанный метод решения задач континуального линейного программирования с использованием ортогональных систем функций. В статье получено точное решение задачи вариационного исчисления при наличии линейных ограничений. Целью работы является разработка точных методов решения задачи в классе полиномов Лежандра. Продемонстрирована возможность построить точное решение задачи и условия, при которых решение существует. Аналитически доказано, что полученное решение следует искать в виде линейной комбинации дельта-функций. Даны рекомендации по построению алгоритма оптимизации. Указано на возможность использовать при решении данных задач других систем ортогональных многочленов.

**Ключевые слова:** континуальное линейное программирование; многочлены Лежандра; дельта-функция.

**Introduction**

The simplest of these tasks can be solved by conventional means, if it is the class of functions in which a decision is based [1, p.25]. It was found that the quality of the solution is higher the more "a delta" has a character of its analytical solution. It is shown that the exact solution of the simplest problem of continual linear programming must be sought in the class of delta functions [1, p.48]. In general, the synthesis problem

can be formulated as follows: Let the input of a linear system with a known frequency response signal is, the spectral power is described by the function. Find a function that maximizes functional:

$$\int_{R_1}^{R_2} C(R)X(R)dR, \quad R \in [R_1, R_2] \quad (1)$$

and satisfying the limits for the spectral power of the

signal system.

$$\int_{R_1}^{R_2} A_i(R)X(R)dR = B_i, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

$$X(t) \geq 0, \quad (3)$$

where  $C(R)$ ,  $A_i(R)$  - are integrated in the  $R$  function. The research in this article is dedicated to the development of exact methods for solving the above problem of continual linear programming (1)-(4).

### 1. The formulation of the problem in the class of Legendre polynomials

Let's introduce the variable  $t$  [1, p.24]:

$$t = \frac{2R - R_2 - R_1}{R_2 - R_1}, \quad R = \frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2} \quad (4)$$

with provision of which, we will get the next presentation of our problem:

$$\int_{R_1}^{R_2} C(R)X(R)dR = \frac{(R_2 - R_1)}{2} \int_{-1}^1 C\left(\frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2}\right) \times X\left(\frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2}\right) dt, \quad (5)$$

$$\int_{R_1}^{R_2} A_i(R)X(R)dR = \frac{(R_2 - R_1)}{2} \int_{-1}^1 A_i\left(\frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2}\right) \times X\left(\frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2}\right) dt, \quad (6)$$

$$X\left(\frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2}\right) > 0. \quad (7)$$

Using the labeling for  $c(t)$ ,  $a_i(t)$ ,  $x(t)$ :

$$c(t) = \frac{(R_2 - R_1)}{2} \cdot C\left(\frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2}\right),$$

$$a_i(t) = \frac{(R_2 - R_1)}{2} \cdot A_i\left(\frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2}\right), \quad (8)$$

$$x(t) = X\left(\frac{t(R_2 - R_1) + R_2 + R_1}{2}\right) \geq 0. \quad (9)$$

Let's present the problem in a canonical form:

$$\int_{-1}^1 c(t)x(t)dt \quad (10)$$

$$\int_{-1}^1 a_i(t)x(t)dt = b_i, \quad i = 1, 2, \dots, m, \quad (11)$$

$$x(t) \geq 0, \quad (12)$$

where  $c(t), a_i(t)$  because of integrability of  $C(R)$ ,  $A_i(R)$  on the interval are the integrable functions on the interval  $t \in [-1; 1]$ .

If the limits of the integration in (1) and (2) are respectively different and equal  $R_{21}, R_{11}$  for (1) and  $R_{22}, R_{12}$  (2) then selecting,  $R_2 = \max\{R_{ij}\}$ ,  $R_1 = \min\{R_{ij}\}$ , ( $i = 1, 2; j = 1, 2$ ) and setting function  $C(R) = 0$  for  $R \notin [R_{11}, R_{21}]$ ,  $A_i(R) = 0$  for  $R \notin [R_{12}, R_{22}]$ , when the problem is reduced to the form (1)-(3).

### 2. Solution of the problem in the class of Legendre polynomials

The solution  $x(t)$  is presented on the interval  $t \in [-1; 1]$  in the form of an expansion in Legendre polynomials  $P_n(t)$  [4, p.64-74]:

$$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n P_n(t), \quad \gamma_n = \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^1 x(t) P_n(t) dt,$$

$$P_n(t) = \frac{1}{2^n n!} \frac{d^n (t^2 - 1)^n}{dt^n}. \quad (13)$$

Representing the specified functions  $c(t), a_i(t)$  (8) in the form of a convergent series,  $i = 1, 2, \dots, m$ :

$$c(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n P_n(t), \quad \sigma_n = \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^1 c(t) P_n(t) dt, \quad (14)$$

$$a_i(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_{i,n} P_n(t), \quad \alpha_{i,n} = \frac{2n+1}{2} \int_{-1}^1 a_i(t) P_n(t) dt, \quad (15)$$

let's comply the integration (10), (11) of the formula [4, p.71]:

$$\int_{-1}^1 c(t)x(t)dt = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n P_n(t) \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k P_k(t) dt =$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n \gamma_n \int_{-1}^1 P_n^2(\tau) d\tau = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n \gamma_n \frac{2}{2n+1}, \quad (16)$$

$$\int_{-1}^1 c(t)x(t)dt = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n P_n(t) \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k P_k(t) dt =$$

$$= \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n \gamma_n \int_{-1}^1 P_n^2(\tau) d\tau = \sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n \gamma_n \frac{2}{2n+1}, \quad (17)$$

and we'll get the statement of the problem, which consists in maximizing function

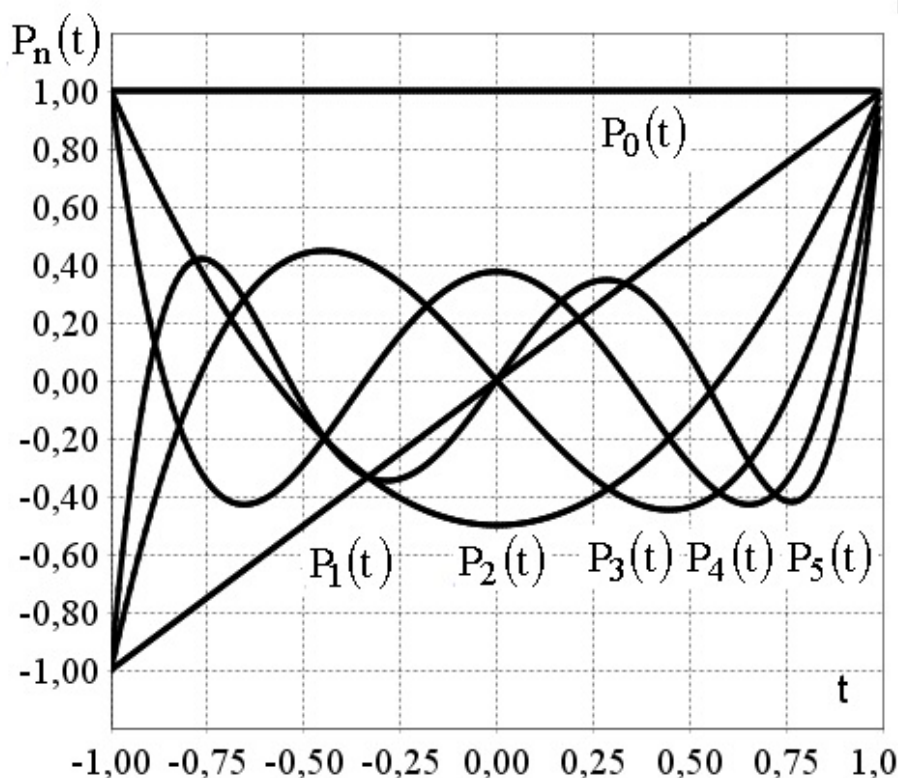


Fig. 1. Legendre's polynomials  $P_n(t)$ ,  $n=0, 1, 2, 3, 4, 5$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \sigma_n \gamma_n \frac{2}{2n+1} \rightarrow \max, \quad (18)$$

satisfying constraints

$$\sum_{n=0}^{\infty} \alpha_{i,n} \gamma_n \frac{2}{2n+1} = b_i, i = 1, 2, \dots, m, \quad (19)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n P_n(t) \geq 0, t \in [-1, 1]. \quad (20)$$

Let's deal with the solution of the problem (10)-(12) for the case when the functions  $C(R)$ ,  $A_i(R)$  are represented by polynomials of degree  $N_1, N_2$ :

$$C(R) = \sum_{n=0}^{N_1} \Pi_n R^n, \quad A_i(R) = \sum_{n=0}^{N_2} W_{i,n} R^n, \quad (21)$$

with coefficients  $\Pi_n$  and  $W_{i,n}$ . These include the problem of the LPC, which limits (2) defines the moment of order  $\int_{R_1}^{R_2} R^i X(R) dR = B_i$  to the range of variation of a random variable  $R \in [R_1, R_2]$ , [1, p.13-17]. The expression  $t^N$  can be represented by the expansion of the form [5, p.79]:

$$t^N = \sum_{n=0}^N \gamma_n P_n(t), \quad \gamma_N = \frac{2^N (N!)^2}{(2N)!}, \quad \gamma_n = 0, \quad (22)$$

when  $(N-n)$  is odd number,

$$\gamma_n = \frac{(2n+1) \cdot 2^n N! \left(\frac{N+n}{2}\right)!}{\left(\frac{N-n}{2}\right)! (N+n+1)!}, \quad (23)$$

when  $(N-n)$  is even integer, which contains the finite number  $N$  Legendre's polynomials  $P_n(t)$ .

### 3. The usage of Legendre polynomials for constructing exact solutions

Let's imagine, that  $C(R)$  and  $A_i(R)$  are polynomials  $R$  degree  $N_1$  and  $N_2$ ,  $N_1 > N_2$ . In the view of the identities (22), (23) with (8) functions  $c(t)$ ,  $a_i(t)$  are polynomials and the degree  $N_1$  and  $N_2$  with the expansion coefficients  $\sigma_n$ ,  $\alpha_{i,n}$ , respectively (14) and (15). We represent the right side of (11) integral with the integrand containing Legendre polynomials,  $i = 1, 2, \dots, m$ :

$$b_i = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^{N_1} \beta_{i,n} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) dt, \quad (24)$$

$$\int_{-1}^1 a_i(t) x(t) dt = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^{N_2} \alpha_{i,n} P_n(t) \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k P_k(t) dt =$$

$$= \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \beta_{i,n} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) dt, \quad (25)$$

and we will get an equation that must be solved for  $\gamma_k, i=1,2,\dots,m$ :

$$\int_{-1}^1 \sum_{n=0}^{N_2} \alpha_{i,n} P_n(t) \sum_{k=0}^{\infty} \gamma_k P_k(t) dt = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \beta_{i,n} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) dt. \quad (26)$$

In the view of orthogonal polynomials  $P_k(t)$  expression (26) can be presented as:

$$\int_{-1}^1 \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{i,k} P_k(t) \gamma_k P_k(t) dt = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \beta_{i,n} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) dt, \quad \alpha_{i,k} = 0, \quad (27)$$

when  $k > N_2$ . The solving for  $\gamma_k$  we will present as next

$$\gamma_k = \sum_{n=0}^N \omega_n \frac{2k+1}{2} P_k(t_n). \quad (28)$$

By substituting (28) into (27) we obtain

$$\int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \omega_n \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{i,k} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) P_k(t) dt = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \beta_{i,n} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) dt. \quad (29)$$

The solving is next:

$$x(t) = \sum_{n=0}^N \omega_n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t), \quad (30)$$

where  $\omega_n$  the constants of integration. The right side of formula (30) can be written as follows:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) = \delta(t-t_n), \quad (31)$$

that allows to present the solution (30) this way:

$$x(t) = \sum_{n=0}^N \omega_n \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_k P_k(t) = \sum_{n=0}^N \omega_n \delta(t-t_n) \quad (32)$$

Indeed, integrating with the left side of (29), taking into account (15) we obtain:

$$\int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \omega_n \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{i,k} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) P_k(t) dt = \sum_{n=0}^N \omega_n \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{i,k} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) \int_{-1}^1 P_k(t) P_k(t) dt =$$

$$= \sum_{n=0}^N \omega_n \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{i,k} P_k(t_n) = \sum_{n=0}^N \omega_n a_i(t_n). \quad (33)$$

On the other hand, using (32), a similar result can be written:

$$\int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \omega_n \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{i,k} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t) P_k(t) dt = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \omega_n \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{i,k} P_k(t) \delta(t-t_n) dt = \int_{-1}^1 \sum_{n=0}^N \omega_n \delta(t-t_n) a_i(t) dt = \sum_{n=0}^N \omega_n a_i(t_n). \quad (34)$$

An important fact is that if the coefficients  $\gamma_n$  of one and quite simply determined by (11), (25),  $i=1,2,\dots,m$ :

$$\int_{-1}^1 a_i(t) x(t) dt = \sum_{n=0}^{N_2} \alpha_{i,n} \gamma_n \frac{2}{2n+1} = b_i. \quad (35)$$

The rest  $(N_1 - N_2)$  of the coefficients  $\gamma_n$  are determined from (18) with the unambiguous representation (28), (31). It should be noted that by virtue of (28) to determine  $\gamma_n$  the condition  $x(t) \geq 0$  will be satisfied when  $N \rightarrow \infty$ . This condition limits the range of acceptable solutions (10)-(12).

#### 4. An algorithm for solving the simplest problem

Consider the exact solution of the problem (1)-(3) for functions  $C(R) = 1 - R^2, A_0(R) = 1$  [1, p.24]:

$$\int_{-1}^1 (1 - R^2) X(R) dR, \int_{-1}^1 X(R) dR = S_0, X(t) \geq 0, R \in [-1;1]. \quad (36)$$

Using (8) and (9) represent the task (36) in the form:

$$\int_{-1}^1 c(t) x(t) dt, c(t) = 1 - t^2, \quad (37)$$

$$\int_{-1}^1 a_0(t) x(t) dt = S_0, a_0(t) = 1, \quad (38)$$

$$x(t) \geq 0, R \in [-1;1] \quad (39)$$

Functions  $c(t)$  (37),  $a_0(t)$  (38) in a series in Legendre polynomials

$$c(t) = P_0(t) - \left( \frac{1}{3} P_0(t) + \frac{2}{3} P_2(t) \right) = \frac{2}{3} P_0(t) - \frac{2}{3} P_2(t), a_0(t) = P_0(t), \quad (40)$$

where  $1 = P_0(t)$ ,  $t^2 = \left(\frac{1}{3}P_0(t) + \frac{2}{3}P_2(t)\right)$ .

This allows you to write the problem (37)-(39) as (18)-(20) as follows:

$$\frac{4}{3}\gamma_0 - \frac{4}{15}\gamma_2 \rightarrow \max, \quad (41)$$

$$2\gamma_0 = S_0 \Rightarrow \gamma_0 = \frac{S_0}{2}, \quad (42)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n P_n(t) \geq 0, t \in [-1; 1]. \quad (43)$$

Since (42)  $a_0(t)$  is represented by one member of the decomposition  $a_0(t) = P_0(t)$  (40), the search  $\gamma_2$  for maximizing the functional (37) use the equation (32),  $N = 1$ , equating the coefficients in different  $k$ :

$$\gamma_0 = \frac{\omega_0}{2}, k = 0, \omega_0 = 2\gamma_0 = S_0, \quad (44)$$

$$\gamma_2 = \omega_0 \frac{5}{2} P_2(t_n), k = 2. \quad (45)$$

Substituting  $\gamma_0$  (42),  $\gamma_2$  (43) to (41), we define  $t_n$  in which the expression (41) takes the maximum value:

$$\begin{aligned} \frac{4}{3}\gamma_0 - \frac{4}{15}\omega_0 \frac{5}{2} P_2(t_n) &= \frac{4}{3}\gamma_0 - \frac{2}{3}\omega_0 P_2(t_n) = \\ &= \frac{4}{3}\gamma_0 (1 - P_2(t_n)) \rightarrow \max \end{aligned} \quad (46)$$

The function has a maximum value of the functional (37) is reached at  $P_2(t_n) \rightarrow \min$ . Where should be

$$P_2(t_n = 0) = -0.5. \text{ Thus:}$$

$$M = \int_{-1}^1 c(t)x(t)dt = \frac{4}{3}\gamma_0 - \frac{4}{15}\gamma_2 \rightarrow \max = S_0, \quad (47)$$

when

$$x(t) = S_0 \sum_{k=0}^{\infty} \frac{2k+1}{2} P_k(t_n) P_k(t). \quad (48)$$

Figure 2 shows the behavior of the functional value of  $M$  (47) depending on the number of polynomials in the solution  $x(t)$  (48) for  $S_0 = 1$ . It can be seen that when  $k > 2$  no functional change its value remains constant. This result is due to the finite number of polynomials  $P_n(t)$  in the expansion of  $c(t)$  (40).

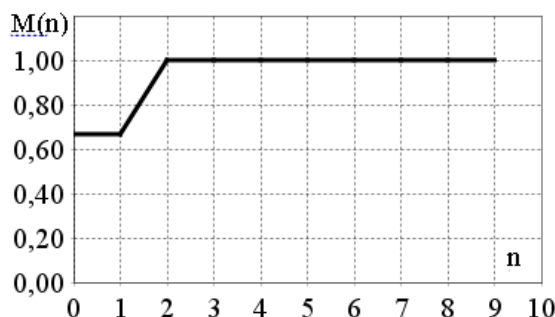


Fig. 2. The dependence of the value of the functional  $M(n)$  (46) on the number  $n$  of the Legendre polynomials  $P_n(t)$  in the solution  $x(t)$  (47) for the case  $S_0 = 1$

The solution (37)-(39) is shown in Figure 3. It can be seen that an increase in terms of expansion solution presented in the form of (32) takes a delta character. Each of the solutions presented provides a

value of the functional (10)  $M=1$  if the constraint for  $S_0 = 1$  (11). However, compliance with the inequality  $x(t) \geq 0$  is satisfied for  $N \rightarrow \infty$ .

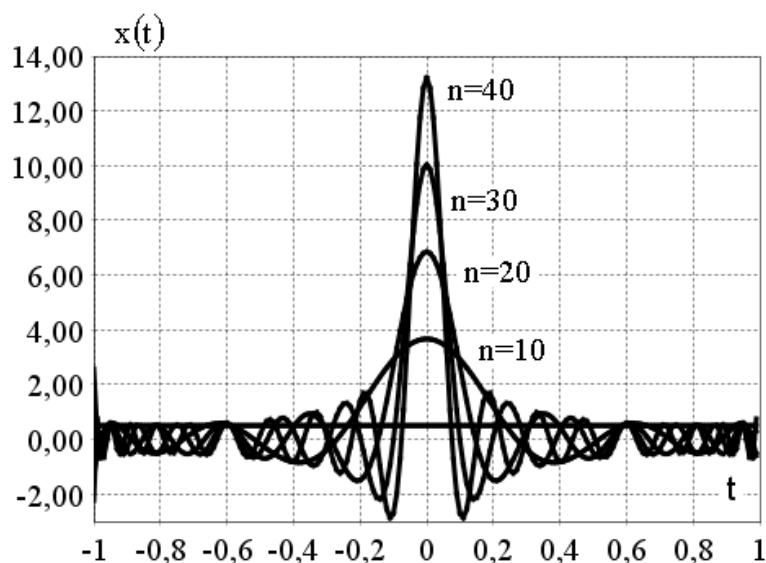


Fig. 3. Accuracy representation  $x(t)$  (47) for the case  $S_0 = 1$  according to the  $n$  in the expansion of Legendre polynomials  $P_n(t)$

### Conclusion

Investigation of properties of solutions of the continuum of linear programming have led to the following conclusions, which are as follows:

1. If the functions  $c(t)$  and  $a_i(t)$  are represented by finite power series of the form (21), the problem (10)-(12) has an exact solution

$x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n P_n(t)$  presented Legendre polynomials (13).

2. For calculating the coefficients  $\gamma_k$  determining the form of the solution  $x(t)$ , we get easy and convenient for practical calculation formula (28).

3. Analytically shown that the solution  $x(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \gamma_n P_n(t)$  degenerates into a superposition of delta functions, which confirms the conclusions drawn in [1, p.126] – the solution (10)-(12) must be sought as a linear combination of delta functions.

4. Usage of the orthogonal system of functions allowed to formulate noniteration ability to exact solution (30) of the problem (10)-(12).

5. If for  $c(t)$  (14) and  $a_i(t)$  (15) do not permit expansion in an orthogonal set of functions in a finite series, then the solution may be found with a given accuracy. Its value is determined by the accuracy of representation of the specified functions  $c(t)$  and  $a_i(t)$  finite power series (14), (15).

### References

1. Raskin L.G., Kirichenko I.O., Seraja O.V. Applied Linear Continual Programming. Kharkiv: Oberig, 2014. 292 p.
2. Lesnik C., Opilski Z., Pustelny T. The Numerical Synthesis of a Radar Signal Based on Iterative Method. Acta Physica Polonica. 2011. №4 (120). Pp. 693-697.
3. Kabakchiev A., Kyovtorov V., Bedzev B., Numerical Analysis of Different Communication Signals. Cybernetics and Information Technologies. 2010. №4 (10). C. 75-90.
4. Dancig D.V. Linear Programming, its Application and Generalisation. Moscow: PROGRESS, 1966. 600 p.
5. Lebedev N.N. Special Functions and their Applications. Moscow-Leningrad: Fizmatgiz, 1963. 360 p.

## СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И УПРАВЛЕНИЕ SYSTEM ANALYSIS AND PROCESSING OF KNOWLEDGE

УДК 303.223: 332.14: 004.632.4

DOI

Звягинцева А.В.

**О СОЗДАНИИ РЕЙТИНГОВОЙ WEB-СИСТЕМЫ ОТКРЫТОГО ДОСТУПА  
ДЛЯ ОЦЕНКИ РАЗВИТИЯ СТРАН И ГОРОДОВ МИРА**

старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории прикладного системного анализа и информационных технологий, кандидат технических наук, доцент, ФГАОУ ВПО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Россия.  
*E-mail: zviagintseva@bsu.edu.ru*

### Аннотация

Проблема комплексной оценки социально-экономического и экологического развития стран, регионов и городов является одной из фундаментальных проблем глобалистики. Сегодня это направление исследований в своей методологии опирается преимущественно на экспертные методы. Существует и другой путь решения данной проблемы, который отличается междисциплинарным характером исследований и связан с использованием при изучении процессов методов интеллектуального анализа данных. Проанализированы различные индексы, используемые при анализе развития стран и городов мира. Установлен перечень индексов, для которых могут быть разработаны альтернативные методики расчета, основанные на вероятностных методах анализа данных. Изучена возможность создания web-ресурса открытого коллективного доступа для информационного обеспечения доступа экспертов и аналитиков. Подобные вычислительные системы могут быть использованы при изучении мировых тенденций развития, сравнительном анализе стран, определении новых индексов и рейтингов по различным аспектам развития.

**Ключевые слова:** международные индексы развития; рейтинги городов и стран; интеллектуальный анализ данных; информационные ресурсы для анализа данных.

Zvyagintseva A.V.

**ESTABLISHING AN OPEN ACCESS RATING  
WEB-SYSTEM FOR ASSESSING THE DEVELOPMENT OF CITIES  
AND COUNTRIES AROUND THE WORLD**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia. *E-mail: zviagintseva@bsu.edu.ru*

### Abstract

The problem of comprehensive assessment of social, economic and environmental development countries, regions and cities is one of the fundamental problems in global studies. Today, this research line is primarily based in its methodology on expert methods. Another way to solve this problem is characterized by an interdisciplinary study and involves the use of data mining. The author analyzed various indicators used in the analysis of development of countries and cities around the world. As a result, there was established an index list which may include some new alternative calculation methods based on probabilistic methods of data analysis. The author studied the possibility of creating an open-access public web-resource to provide information support to experts and analysts. Such computing systems may be used in global trends development studies, in comparative cross-country analysis, in the identification of new indicators and ratings on various aspects of development.

**Keywords:** international development indicators; cities and countries indicators; data mining; information resources for data analysis.

## **Введение**

Проблема комплексной оценки социально-экономического и экологического развития стран, регионов и городов является одной из фундаментальных проблем глобалистики и урбанистики. Сегодня это направление исследований в своей методологии опирается преимущественно на экспертные подходы, которые повсеместно используются в научных и практических целях. Любые экспертные оценки по своей природе являются субъективными, их достоверность зависит от опыта эксперта и его возможностей предвидения при оценке развития ситуаций.

Существует и другой путь решения данной проблемы, который отличается междисциплинарным характером исследований и связан с использованием при изучении социально-экономических и экологических процессов естественнонаучных методов и методов интеллектуального анализа данных. Данное научное направление имеет большое значение, так как позволяет предложить объективные методы исследования общественных систем, качественно отличающиеся от существующих экспертных методов.

Одной из основных задач документа «Об основах стратегического планирования в Российской Федерации» является повышение качества прогнозов и комплексных оценок при планировании развития страны и ее территорий в самых различных аспектах – социальном, экономическом, экологическом, технологическом и т.д. Поэтому создание новых методов и средств комплексной оценки развития городов, регионов и стран, а также их объективное ранжирование по совокупности различных показателей может способствовать решению актуальной проблемы разработки достоверных прогнозов на среднесрочную и долгосрочную перспективу.

Данные исследования в научно-прикладном плане тесно связаны с понятием «рейтинговых войн». Использование новых методов комплексной оценки дает возможность исключить субъективные подходы при формировании рейтингов и частично нейтрализовать вызванные этим негативные последствия путем создания альтернативных индикативных и рейтинговых систем оценки развития городов и стран по самым различным аспектам. Необходимость этого вызвана тем, что многие государства нуждаются в большей объективности оценок международных рейтинговых организаций и агентств. Поэтому

появление альтернативных рейтинговых систем, процедуры которых будут основаны на применении объективной методологии и которые могут использоваться независимыми экспертами, является актуальной задачей стратегического прогнозирования.

## **Постановка задачи исследований**

Цель работы состоит в изучении возможности создания Web-системы открытого доступа для рейтинговых оценок по различным аспектам развития стран, регионов и городов (человеческое развитие, экологическое состояние, уровень глобализации и т.д.) по аналогии с системами международных организаций (Всемирный банк, Программа развития ООН и т.д.) и ведущих университетов мира (Йельский и Колумбийский университеты, Уппсальский университет, Технологический университет Цюриха и т.д.). Методики комплексных оценок будут основаны на использовании методов интеллектуального анализа данных.

В перспективе данное направление позволит развить наукометрическую базу данных и специализированную поисковую систему в области изучения стран мира по показателям и характеристикам различных глобальных общественных процессов.

## **Краткий обзор международных индексов**

Сегодня оценки состояния различных систем тесно связаны с появлением в соответствующих науках многочисленных индексов. Большинство исследователей не ставят перед собой статистических задач, суть которых заключается в изучении возможности введения индексов и свертывании данных в многомерном пространстве переменных до комплексных показателей приемлемой размерности, а вводят индексы априори, применяя не всегда обоснованные допущения.

Сегодня в открытом доступе имеется информация о более чем 30 основных индексах развития и более 20 видах рейтингов развития стран. Наиболее известны среди них: Индекс развития человеческого потенциала (UNDP); Индексы и рейтинги демократии (FreedomHouse); Индекс международной безопасности (International Security Index, iSi); Индекс и рейтинг экологической эффективности стран мира (Environmental Performance Index), Индекс уровня глобализации городов (Global Cities Index), рейтинг «зеленых» городов мира (Green City Index) и др.

Обычно количественная оценка состояния экологических, экономических и социальных систем проводится на основе использования целого ряда стандартизированных и нормируемых индикаторов и показателей [1–6]. В разных методиках при расчете индексов применяется от трех до нескольких десятков индикаторов, позволяющих оценить развитие стран или регионов. Для примера в таблице 1 приведены некоторые международные индексы для оценки развития стран мира, построенные на основе использования различных индикаторов.

В практической деятельности многих международных организаций наиболее распространена методика оценки стран мира,

которая основана на применении индекса развития человеческого потенциала (ИРЧП).

Данный индекс определяется из экспертной зависимости относительно трех индикаторов человеческого развития [7]: продолжительности жизни, образования и дохода (ВВП) с учетом весовых коэффициентов.

Таким же образом строится большинство экспертных методик определения различных индексов. Некоторые из них по сравнению с методикой ИРЧП существенно более сложные. В подобных методиках можно встретить целый спектр различных зависимостей для расчета индексов, при этом эксперты часто обходят стороной вопрос выбора и обоснования тех или иных расчетных уровней.

Таблица 1

**Некоторые международные индексы оценки развития стран и рейтинги России, полученные на их основе**

Table 1

**Some international indicators of assessing the countries development and Russian ratings obtained on their basis**

Индекс	Кол-во стран	Кол-во индикаторов	Рейтинги РФ для 2011(2012) годов
Человеческого развития	187	34	66(55)
Глобальной конкурентоспособности	142	12	66*
Экономической свободы	179	10	143(144)
Экологической эффективности	136	31	106
Качества жизни	192	9	54
Общества, основанного на знаниях	77	15	55
Нестабильности стран	177	12	82(83)
Восприятия коррупции	182	Экспертн. опрос	143(133)
Демократии	167	60	117
Свободы прессы	198	Экспертн. опрос	142
Глобализации	186	24	52
Показатель экологического следа	152(149)	6	40(33)**
Международный индекс счастья	178	3	108***
Готовности к сетевому обществу	138	53	55
Экологических достижений	133	16	32****
Готовности к электронному правительству	190	3	27

Примечание: \* – данные за 2011–2012 гг.; \*\* – данные за 2007(2008) гг.; \*\*\* – данные за 2009 г.; \*\*\*\* – данные за 2005 г.

С точки зрения принципов системного анализа, методики, основанные на применении индексов, имеют много недостатков, тем не менее, они широко применяются при оценках развития систем.

Проведенный анализ показывает, что во многих случаях существуют необходимые для

анализа данные, которые могут быть использованы при оценке экологических процессов и процессов общественного развития городов и стран мира. Некоторые основные индексы и рейтинги приведены в таблице 2.

Таблица 2

**Перечень и краткая характеристика некоторых международных индексов для оценки развития стран**

Table 2

**A list and brief description of some international indicators for assessing the countries' development**

Название	Краткая характеристика	Адрес доступа
Индекс развития человеческого потенциала (UNDP)	Составной индекс, ежегодно определяемый Программой развития ООН	<a href="http://hdr.undp.org/en/data">http://hdr.undp.org/en/data</a>
Индекс восприятия коррупции (Transparency International)	Индекс оценки уровня коррупции на глобальном и региональном уровнях	<a href="http://www.transparency.org/cpi2012/">http://www.transparency.org/cpi2012/</a>
Индекс демократии (Economist Intelligence Unit)	Индекс оценки демократии по 60 сгруппированным в 5 категорий показателям	<a href="http://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=DemocracyIndex2011">http://www.eiu.com/public/topical_report.aspx?campaignid=DemocracyIndex2011</a>
Индекс уровня глобализации городов (Global Cities Index)	Экспертный индекс составляется политологическим журналом Foreign Policy совместно с компанией А. Т. Kearney и институтом The Chicago Council on Global Affairs	<a href="http://www.atkearney.com/research-studies/global-cities-index">http://www.atkearney.com/research-studies/global-cities-index</a>
Индекс Глобализации Швейцарского технологического института Цюриха	Индекс оценивает параметры глобализации 158 стран мира по трем категориям: экономическая, социальная и политическая глобализация	<a href="http://globalization.kof.ethz.ch/">http://globalization.kof.ethz.ch/</a>
Индекс ведения бизнеса Всемирного Банка (Doing Business)	Глобальное исследование Всемирного банка по показателю свободы ведения бизнеса	<a href="http://www.doingbusiness.org/">http://www.doingbusiness.org/</a>
Индекс международной безопасности (International Security Index)	Индекс для оценки глобальной безопасности	<a href="http://pircenter.org/en/static/international-security-index-isi">http://pircenter.org/en/static/international-security-index-isi</a>
Рейтинг городов мира (City Index)	Рейтинги международной консалтинговой компании Mercer Human Resource Consulting и The Blacksmith Institute на основе данных по 39 сгруппированным в 5 категорий показателям (для более 200 городов).	<a href="http://www.siemens.com/cities/">http://www.siemens.com/cities/</a>
Индекс счастья	Отражает благосостояние людей и состояние окружающей среды	<a href="http://www.neweconomics.org/">http://www.neweconomics.org/</a>

Указанные индексы имеют доступные методики и базы данных показателей, которые применяются при их определении.

Для оценки развития стран и городов можно создать открытую рейтинговую систему, как альтернативу для существующих методов и средств, которые применяются международными организациями и университетскими агентствами. Для этого следует разработать Web-ресурс открытого коллективного доступа для информационного обеспечения деятельности экспертов и аналитиков. Это позволит предложить информационные средства для определения 7–10 известных индексов и рейтингов развития стран и городов как альтернативу существующим системам.

#### **Предлагаемые алгоритмы и предложения по созданию Web-ресурсов для оценки индексов развития стран**

В основу разработки новых методов интеллектуального анализа данных положены работы, которые связаны с созданием теории системной динамики и алгоритмических методов анализа статистических данных. Данные методы и алгоритмы основаны на представлении данных в виде гипотетической сплошной информационной среды, а также применении гипотезы существования информационной меры для комплексной оценки совокупности табличных данных в виде поля вероятностей совместных событий, связанных с одновременным наблюдением параметров изучаемых объектов. Данный подход интеллектуального анализа данных (ИАД) изложен в работах [8–12] и основан на создании вероятностных моделей.

В основу таких моделей могут быть положены алгоритмы статистической оценки вероятностей состояний систем. Соответствующие вероятности определяются по массивам данных для сложных событий одновременного наблюдения нескольких показателей, которые индикативно отражают развитие стран или городов. Это могут быть как отдельные характерные события, так и разные сочетания нескольких таких событий, представляющих собой одно сложное событие, например, совместное событие наблюдения трех или четырех показателей развития. Как результат мы приходим к необходимости разработки методов ИАД, которые бы учитывали вероятностные закономерности распределения индикативных данных. Применение подобных

подходов в науках о природе и обществе имеет большое значение, так как позволяет предложить объективные методы исследования систем n-мерной размерности, к которым относятся все общественные, экономические, экологические и глобальные системы.

Предложенные метод и алгоритмы могут быть применены к любой совокупности исходных показателей, однако с увеличением числа показателей свыше 5–7 существенно возрастает время работы алгоритмов ИАД при анализе информации в многомерном пространстве. В целом трудоемкость метода определяется необходимостью построения множества моделей для оценки вероятностей самых разных событий. Соответствующие метод и алгоритмы могут быть реализованы в программных продуктах, связанных с анализом данных. Работа с такой вычислительной системой, эксперты и аналитики могут не только оценивать индексы, но искать закономерности в данных. Подобный программный продукт должен интегрировать несколько приложений для хранения, анализа и обработки данных, а именно:

- базу данных, наполняемую информацией международных организаций (таблица 2);
- приложение, которое обеспечивает ввод и импорт данных, а также преобразование входных данных в собственный формат, удобный для работы (при этом информация должна быть структурирована по общей форме и интегрирована в единый массив данных);
- приложение для анализа данных, которое позволяет осуществить визуализацию данных, их предварительный анализ, провести исследование данных с использованием аналитических алгоритмов, осуществить расчеты индексов и определить рейтинги развития стран и городов;
- интерфейс для взаимодействия сервисов и работы вычислительной системы.

Исходя из сказанного выше видно, что разработка математического обеспечения и программного продукта для вероятностного анализа данных и моделирования различных классов систем вполне реальна и уже стоит на повестке дня.

#### **Выводы**

Предложенные вычислительные системы могут быть использованы при изучении мировых тенденций развития, сравнительном анализе стран, оценке приоритетов развития, установлении закономерностей и особенностей

развития стран, определении новых различных индексов и рейтингов по различным аспектам развития.

Все это позволит привлечь к анализу данных экспертов и аналитиков в области глобалистики, охраны окружающей среды и мирового развития.

#### Список литературы

1. Руководящие указания по применению экологических показателей в странах восточной Европы, Кавказа и Центральной Азии. 2006. Женева. – 105 с.
2. Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies. United Nations, New York, 2001, 294.
3. Environmental Indicators for Agriculture. Vol. 3. Methods and Results. Paris, OECD, 2001, 409.
4. World Development Indicators (issued annually). World Bank. Available at: <http://www.worldbank.org/> (accessed 2 February 2016).
5. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, United Nations, New York, 2007, 93.
6. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies / Prepared by D. Briggs, Occupational and Environmental Health Series. Geneva, WHO, 1999, 119.
7. Human Development Reports (2000–2015). Available at: <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2010/chapters/ru/> (accessed 2 February 2016).
8. Аверин Г.В. Системодинамика. Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с.
9. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Применение методов интеллектуального анализа данных при оценке развития Украины. Геотехническая механика, Выпуск 112. 2013. С. 257–270.
10. Averin G.V., Konstantinov I.S., Zviagintseva A.V. and Tarasova O.A. 2015. The Development of Multi-Dimensional Data Models Based on the Presentation of an Information Space as a Continuum. International Journal of Soft Computing, 10 (6): 458–461.
11. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Konstantinov I.S. and Ivashchuk O.A., 2015. Data Intellectual Analysis Means Use for Condition Indicators Assessment of the Territorial and State Formations. Research Journal of Applied Sciences, 10(8): 411–414.
12. Аверин Г.В., Звягинцева А.В. Некоторые принципы создания феноменологических теорий в

предметных областях // Знания-Онтологии-Теории (ЗОНТ-2015). Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Новосибирск, Институт математики им. С.Л. Соболева. 2015. – С. 8–16.

#### References

1. Guidelines on the Application of Environmental Indicators in Eastern Europe, Caucasus and Central Asia. 2006. Zheneva, 105.
2. Indicators of Sustainable Development: Framework and Methodologies. United Nations, New York, 2001, 294.
3. Environmental Indicators for Agriculture. Vol. 3. Methods and Results. Paris, OECD, 2001, 409.
4. World Development Indicators (issued annually). World Bank. Available at: <http://www.worldbank.org/> (date of access: February 2, 2016).
5. Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies, United Nations, New York, 2007, 93.
6. Environmental Health Indicators: Framework and Methodologies. Prepared by D. Briggs, Occupational and Environmental Health Series. Geneva, WHO, 1999, 119 p.
7. Human Development Reports (2000–2015). Available at: <http://hdr.undp.org/en/reports/global/hdr2010/chapters/ru/> (date of access: February 2, 2016).
8. Averin G.V. 2014. Systemdynamics. Doneck, Donbass, 405 p.
9. Averin G.V., Zvjaginseva A.V. 2013. The Use of Data Mining Techniques in the Assessment of the Development in Ukraine. Geo-Technical Mechanics. 112. Pp. 257-270.
10. Averin G.V., Konstantinov I.S., Zviagintseva A.V. and Tarasova O.A. 2015. The Development of Multi-Dimensional Data Models Based on the Presentation of an Information Space as a Continuum. International Journal of Soft Computing, 10 (6). Pp. 458–461.
11. Averin G.V., Zviagintseva A.V., Konstantinov I.S. and Ivashchuk O.A., 2015. Data Intellectual Analysis Means Use for Condition Indicators Assessment of the Territorial and State Formations. Research Journal of Applied Sciences, 10(8). Pp. 411-414.
12. Averin G.V., Zvjaginseva A.V. 2015. Some principles of Creating Phenomenologic Theories in Subject Areas. Knowledge-Ontologies-Theories (ZONT-2015). Materials of the All-Russian Conference with International Participation. Novosibirsk, Institut matematiki im. S.L. Soboleva. Pp. 8-16.

УДК 519.6

DOI

**Привалов А.Н.  
Богатырева Ю.И.**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ  
В ИНФОРМАЦИОННО-ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ СРЕДЕ ВУЗА  
С ПРИМЕНЕНИЕМ АГРЕГАТИВНЫХ МОДЕЛЕЙ**

1) профессор кафедры информатики и информационных технологий, доктор технических наук, профессор Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, пр-т. Ленина д. 125, г. Тула, 300026, Россия. *e-mail: privalov.61@mail.ru*

2) профессор кафедры информатики и информационных технологий, доктор педагогических наук Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого, пр-т. Ленина д. 125, г. Тула, 300026, Россия. *e-mail: bogatirevadj@yandex.ru*

**Аннотация**

Рассматривается применение агрегативных моделей для моделирования информационных процессов в информационно-образовательной среде вуза, спроектированной на основе систем с распределенной обработкой данных. Приводятся результаты эксперимента.

**Ключевые слова:** агрегативная модель; сеть массового обслуживания; информационные процессы.

**Privalov A.N.  
Bogatyreva Yu.I.**

**MODELLING THE PROCESSES IN THE INFORMATION  
AND EDUCATIONAL ENVIRONMENT OF THE UNIVERSITY  
WITH APPLICATION OF AGGREGATE MODELS**

1) Doctor of Technical Sciences, Professor. Department of Informatics and Information Technologies Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, 125 Lenin Ave., Tula, 300026, Russia  
*e-mail: privalov.61@mail.ru*

2) Doctor of Pedagogical Sciences, Professor. Department of Informatics and Information Technologies, Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy, 125 Lenin Ave., Tula, 300026, Russia  
*e-mail: bogatirevadj@yandex.ru*

**Abstract**

The article discusses the application of aggregate models for modelling the information processes in the information and educational environment of the university, designed on the basis of systems with distributed data processing. The authors provide the results of the experiment.

**Keywords:** aggregate model; queuing network; information processes.

Функционирование любой информационно-образовательной среды (ИОС) вуза, реализованной на аппаратно-программной платформе вычислительной системы с распределенной обработкой данных (СРОД) может быть представлено в виде совокупности взаимодействий пользователей (обучаемых, педагогов, других сотрудников) с системой [1,2]. С формальной точки зрения любое такое взаимодействие можно отобразить в виде последовательности этапов передачи и обработки информации.

Для оценки взаимодействия однородных информационных процессов (ИП) в вычислительной подсистеме ИОС предлагается подход, основанный на агрегативном описании

систем с использованием особенностей их структуры.

Существо подхода заключается в выделении из рассматриваемой системы некоторой подсистемы (агрегата) и последующем ее детальном исследовании; при этом учитывается влияние остальной части системы, которая представляется в виде обобщенной сети массового обслуживания (СМО) с интенсивностью обслуживания, зависящей от числа заявок в ней.

Полагается, что эта СМО ведет себя по отношению к оставшейся подсистеме аналогично той части системы, которую она заменяет.

В общем случае СРОД достаточно сложной структуры может быть разбита на несколько подсетей, которые исследуются отдельно. При

этом объединение отдельных СМО в подсети осуществляется таким образом, чтобы:

- взаимодействия элементов внутри подсети (внутренние взаимодействия) могли быть исследованы без учета;
- взаимодействий между подсетями; взаимодействия между подсетями (внешние взаимодействия) можно было анализировать без учета внутренних взаимодействий.

Указанные условия будут выполняться, если частота внутренних взаимодействий много больше частоты внешних взаимодействий. В этом случае говорят о почти разложимой системе.

Агрегативные модели дают точное решение для сетей, допускающих решение в виде произведения. Так можно показать, что точное решение может быть получено для сетей МО, описываемых моделью Гордона – Ньюэлла [3]. Агрегативный подход часто связывают с замкнутыми сетями, однако он может быть использован и в отношении открытых сетей МО.

Рассмотрим функционирование вычислительного комплекса (ВК) в режиме реального масштаба времени, ограничиваясь анализом ИП на уровне ВК. Пусть на ВК поступает пуассоновский поток заявок интенсивностью  $\lambda$ , а реализуемые информационно-вычислительные работы (ИВР) связаны с выполнением достаточно длинной цепочки переходов: процессор–внешнее устройство– процессор.... Время обслуживания одного запроса на устройство  $j, j = \overline{1, J}$  распределено по экспоненциальному закону со средним  $1/\mu_j$ . Здесь индекс « $j$ » относится к узлу процессора. Вероятность выхода на узел (устройство)  $j, j = \overline{2, J}$ , после обслуживания в узле процессора есть  $\theta_{1j}$ . Наибольший допустимый уровень мультипрограммирования в вычислительном комплексе –  $N$ .

Для исследования ИП в подобной ситуации может быть использован как аппарат открытых, так и замкнутых сетей МО. Однако в первом случае не будет учитываться ограничение на уровень мультипрограммирования, что может привести к существенному завышению оценок пропускной способности вычислительного узла, особенно при большой загрузке системы. Во втором случае получаемые оценки будут занижены, поскольку при расчетах будет приниматься максимальная пропускная способность вычислительного комплекса, соответствующая уровню мультипрограммирования  $N$ , в то время как при числе активных ИП в вычислительном узле, меньшем  $N$ , эта величина может заметно отличаться от ее максимального значения.

В данной ситуации ошибка в расчетах увеличивается с уменьшением загрузки системы. Для преодоления указанных трудностей необходима модель, отражающая реальную зависимость пропускной способности рабочей станции от числа активных ИП. Такая модель получается при использовании агрегативного подхода. В самом деле, интенсивность переходов между состояниями, связанными с занятием отдельных ресурсов (процессоров, ВУ) при реализации активного ИП, значительно больше интенсивности последовательных активизаций ИП. Поэтому можно выделить и рассмотреть отдельно замкнутую подсеть, отображающую процесс реализации в мультипрограммном режиме  $n$  активных ИП,  $n = \overline{1, N}$ .

На рис. 1, а схематически представлена рассматриваемая открытая сеть МО, а на рис. 1, б – образованная из нее подсеть, которую условно можно считать замкнутой.

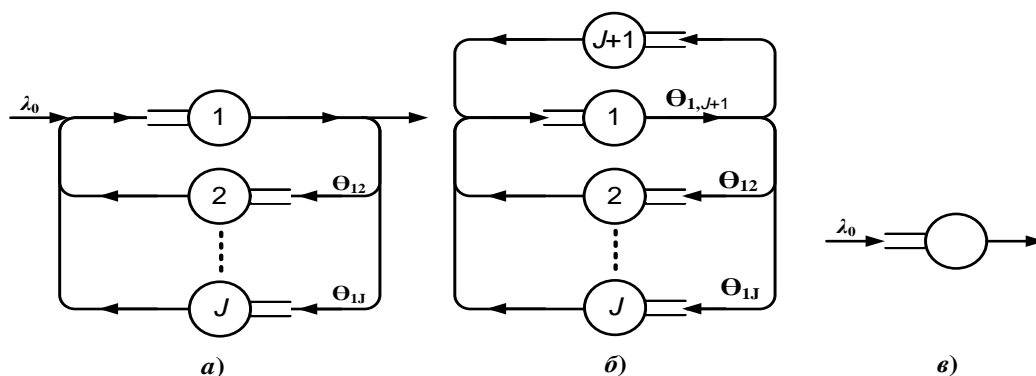


Рис. 1. Агрегирование открытой сети МО  
Fig. 1. Aggregation of an open queuing network

В последнем случае для удобства вычислений введен фиктивный узел  $J+1$ , для которого полагаем  $1/\mu_{J+1}=0$ .

Пропускная способность вычислительного комплекса определяется зависимостью (1)

$$\lambda(n) = e_{J+1} G(n-1) / G(n), n = \overline{1, N}, \quad (1)$$

т.е. является функцией от  $n$ . При этом  $e_{J+1}$  определяется решением системы:

$e_j = \sum_{k=1}^J e_k \theta_{kj}$ , а  $G(K)$  рассчитывается по рекуррентной формуле

$$G_j(k) = G_{j-1}(k) + p_j G_j(k-1), j = \overline{2, J}, k = \overline{1, K}, \quad (2)$$

где  $K$  – число заявок, циркулирующих в сети.

Рассмотренную подсеть заменим эквивалентным обслуживающим прибором, интенсивность обслуживания которым выражается следующим образом:

$$\gamma_i = \lambda(i), i = \overline{1, N}, \gamma_i = \lambda(N), \gamma > N. \quad (3)$$

Допуская теперь, что время обслуживания эквивалентным прибором можно считать распределенным по экспоненциальному закону, рассматриваемую систему представим в виде СМО типа М/М/1 с переменной интенсивностью обслуживания, задаваемой соотношением (3). Решение такой СМО может быть записано в виде:

$$P_i = \begin{cases} \lambda^i P_0 / \prod_{k=1}^i \lambda(k), 1 \leq i \leq N; \\ \lambda^i P_0 / \left\{ [\lambda(N)]^{i-N} \prod_{k=1}^N \lambda(k) \right\}, i > N; \end{cases} \quad (4)$$

$$P_0 = \left\{ 1 + \sum_{i=1}^N \left[ \lambda^i / \prod_{k=1}^i \lambda(k) \right] + \lambda^{N+1} / \left[ \prod_{k=1}^N \lambda(k) (\lambda(N) - \lambda) \right] \right\}^{-1}.$$

Рассчитав стационарные вероятности состояний (4), можно получить требуемые характеристики реализации ИП в системе. Например, среднее число заявок в системе выразится как

$$n_1 = P_0 \left\{ \left[ \sum_{i=1}^N i \lambda^i / \prod_{k=1}^i \lambda(k) \right] + \frac{1}{\prod_{k=1}^N \lambda(k)} \frac{\lambda^{(N+1)}}{\lambda(N) - \lambda} \left[ N + 1 + \frac{\lambda}{\lambda(N) - \lambda} \right] \right\}.$$

Отсюда среднее время реакции рабочей станции определяется на основании формулы Литтла:  $v_1 = n_1 / \lambda$ .

Рассмотрим пример, демонстрирующий основные особенности расчетных схем рассматриваемой модели.

Пусть необходимо оценить пропускную способность ВК, схематически изображенного на рис. 2, где показана его структура: процессор (узел 1) и три внешних запоминающих устройства (ВЗУ) (узлы 2, 3, 4). Каналы обмена данными в ВК не являются узким местом, так что очереди образуются лишь к процессору и ВЗУ. Объем оперативной памяти ВК такой, что возможна одновременная реализация лишь двух ИП (работа в двухпрограммном режиме). Параметры соответствующих ИП заданы; время одного обслуживания любым из устройств можно считать распределенным по экспоненциальному закону с интенсивностями  $\mu_1 = 5, \mu_j = 1, j = \overline{2, 4}$ ; после завершения обслуживания процессором с равной вероятностью 0,3 выдаются запросы на устройства 2, 3, 4 и с вероятностью 0,1 ИП завершается.

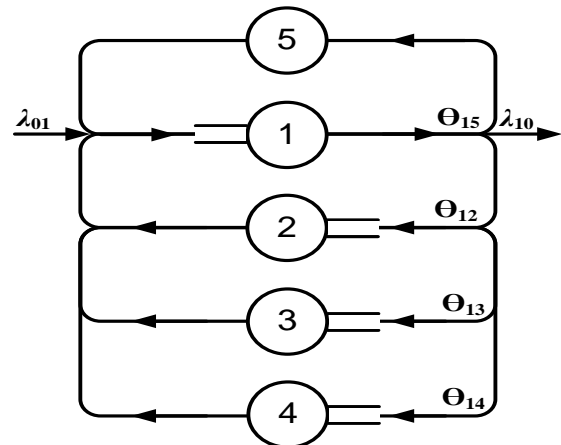


Рис. 2. Пример структуры ВК

Fig. 2. An example of the structure of a computing system

При сравнении оценок основных характеристик реализации, полученных на основе агрегативного подхода, будем полагать, что пропускная способность рабочей станции определяется как  $\lambda(N)$ . Для простоты будем полагать, что предельный уровень мультипрограммирования  $N=2$ . Результаты расчетов представлены в табл. 1, где приведены значения среднего числа ИП в системе ( $N1$ ) и среднего времени реакции рабочей станции ( $v_1$ ).

Таблица 1

Результаты вычислительного эксперимента с различными типами моделей

Table 1

The results of computational experiments with various types of models

$\lambda$	Замкнутая модель		Агрегативная модель		Открытая модель	
	$N_1$	$U_1$	$N_1$	$U_1$	$N_1$	$U_1$
0,05	0,5	10	0,68	13,4	0,65	13
0,1	2,0	20	2,3	23	0,69	6,9
0,14	13	93	14,3	102	2,6	18
0,2	-	-	-	-	4,8	24
0,33	-	-	-	-	299	906

Анализируя эти данные, можно обратить внимание, что при малой загрузке рабочей станции (малых значениях входящего потока заявок на ИВР) результаты расчетов, полученные на основе агрегативного подхода и в результате анализа открытой сети МО, весьма близки. Это вполне естественно, поскольку в данном случае система работает с недогрузкой и ограничение на уровень мультипрограммирования почти не проявляется. При большой загрузке системы ( $\lambda \approx 0,14$ ) оценки, полученные на основе агрегативного подхода, близки к соответствующим оценкам, полученным путем анализа замкнутой сети МО  $[\gamma_i = \lambda(N), i = \overline{1, N}]$ . Этот факт также легко объясняется: в условиях большой загрузки система почти постоянно работает при максимальном уровне мультипрограммирования, что соответствует наивысшей пропускной способности. Таким образом, использование агрегативного подхода в данном случае позволяет наиболее полно отобразить реальные условия функционирования ВК.

Аналогичным образом агрегатирование применимо и при исследовании замкнутых систем. Рассмотрим в качестве примера ВК, обслуживающий некоторое число  $M$  абонентов, каждый из которых обращается к рабочей станции с заявками на ИВР [4].

Время между последовательными обращениями абонента к рабочей станции распределено по экспоненциальному закону с параметром  $\lambda$ . Причем новая заявка может быть сформирована абонентом лишь после получения ответа на предыдущую. Следовательно, при наличии в рабочей станции (на обслуживании и в очереди)  $i$  заявок поток заявок от всех абонентов будет иметь пуассоновский характер с интенсивностью

$$\lambda_i = (M - i)\lambda, i = \overline{0, M}. \quad (5)$$

Пусть наибольший уровень мультипрограммирования для рабочей станции есть  $N$ .

Теперь, рассматривая рабочую станцию как замкнутую сеть МО, можем, как и ранее, определить величины  $\lambda(n)$  в соответствии с (1). Предположим, что при работе рабочей станции с уровнем мультипрограммирования  $i$  поток завершения решений задач является пуассоновским с параметром  $\gamma_i$ , причем  $\gamma_i$  определяется в соответствии с (3).

В этом случае из анализа замкнутой сети с двумя приборами с переменной интенсивностью обслуживания, определяемой выражениями (3) и (5), получаем соотношения для расчета вероятностей  $P_i$  (числа заявок в ВК):

$$P_i = \lambda^i M! P_0 / \left[ (M - i)! \prod_{k=1}^i \gamma_k \right], i = \overline{1, M}; \quad (6)$$

$$P_0 = \left[ 1 + \sum_{r=1}^M \frac{\lambda^r M!}{\prod_{k=1}^r \gamma_k (M - r)!} \right]^{-1}.$$

Отсюда среднее время реакции системы выразится как

$$u_1 = M \left[ \sum_{i=1}^N P_i \lambda(i) + \lambda(N) \sum_{i=N+1}^M P_i \right]^{-1} - 1 / \lambda. \quad (7)$$

Расчеты с использованием (7) показывают, что учет ограничений на уровень мультипрограммирования при применении агрегативного подхода позволяет более точно оценивать основные характеристики функционирования мультипрограммных ВК при конечном числе источников заявок. Особенно это относится к условиям большой загрузки ВК, когда при игнорировании указанных ограничений пропускная способность рабочей станции может быть завышена в несколько раз [1].

В [3] приведена одна из наиболее общих методик реализации агрегативного подхода, основанная на итеративном вычислении характеристик замкнутых сетей МО с общим распределением времени обслуживания заявок в порядке их поступления.

Методика дает точные результаты для сетей, удовлетворяющих условиям локального баланса.

Рассмотрим замкнутую сеть МО, в которой циркулирует  $I$  заявок и имеется  $J$  узлов обслуживания. Время обслуживания в узле  $j, j = \overline{1, J}$  распределено по некоторому закону  $B_j(t)$  со средним  $b_{j1}$ . Заданы вероятности  $\theta_{jk}$  перехода в узел  $k$  после обслуживания в узле  $j$ . Это позволяет рассчитать величины  $e_j$  путем решения системы уравнений вида:

$$e_j = \sum_{k=1}^J e_k \theta_{kj}.$$

Такая сеть именуется сетью  $A$ . В соответствии с методикой [3] строится некоторая последовательность сетей  $A_0, A_1, \dots$  аппроксимирующих сеть  $A$ . При этом сеть  $A_0$  получается из  $A$  путем перехода к экспоненциальному распределению времени обслуживания в узлах с тем же значением среднего времени обслуживания. Сети  $A_r, r=1, 2, \dots$  отличаются от  $A_0$  лишь значением среднего времени обслуживания в узлах  $1/\mu_r(r)$ .

Расчетная процедура методики, определяющая переход от  $A_k$  к  $A_{k+1}$  и условия завершения вычислений, заключается в реализации некоторой последовательности шагов, на первом шаге которой средние значения времени обслуживания в узлах сети  $A_0$  полагаются равными соответствующим величинам в сети  $A$ , а распределение времени обслуживания – экспоненциальным. Далее для каждого узла  $j$  строится подсистема, содержащая все узлы сети, кроме  $j$ . При этом исследуется сеть с двумя узлами, так что выделенная подсистема отображается некоторой СМО, эквивалентной ей в смысле воздействия на узел  $j$  (для простоты анализа производится перенумерация: узел  $j$  нумеруется как 1, а эквивалентный прибор – как 2).

Для сети с двумя узлами известными методами рассчитываются значения среднего числа заявок в узле  $j(n_{j1})$  и среднего числа заявок, обслуживаемых в единицу времени ( $\lambda_j$ ), а также приведенное среднее число заявок, обслуживаемых в узле  $j$  в единицу времени,  $\gamma_j = \lambda_j / e_j$ . После этого осуществляется проверка сходимости величин  $n_{j1}$  и  $\gamma_j$  на основе соотношений

$$\left| I - \sum_{j=1}^J n_{j1} \right| \leq \varepsilon I; \left| \gamma_j - \sum_{k=1}^J \gamma_k / J \right| \leq \varepsilon \gamma_j. \quad (8)$$

Здесь  $\varepsilon$  – малая величина, задающая порядок допустимой ошибки (например,  $\varepsilon=0,01$ ). Выполнение условий (8) на некоторой итерации указывает на приемлемость полученного отображения  $A$  с помощью  $A_0$ . В противном случае осуществляется корректировка средних значений времени обслуживания в узлах с помощью выражений (в зависимости от выполнения того или иного из условий (8) и производится следующая  $(r+1)$ -я итерация.

Описанная методика использовалась для расчета характеристик некоторых замкнутых сетей, а результаты расчетов сравнивались с результатами имитационного моделирования на ряде экспериментов [3]. В одном из этих экспериментов рассматривалась сеть, в которой число узлов варьировалось от 2 до 5, число заявок – также от 2 до 5, а времена обслуживания полагались распределенными по законам: экспоненциальному, Эрланга 2-го порядка и гиперэкспоненциальному. Результаты эксперимента показали, что расхождение в вычислении значения загрузки узлов не превышает 0,05, а в вычислении среднего числа заявок в узле в основном находится в пределах 0,05. В другом эксперименте исследовались сети из 6-7 узлов, число заявок в которых варьировалось от 2 до 12, а времена обслуживания полагались распределенными по законам гиперэкспоненциальному, Эрланга порядка 2, 4 и 6, экспоненциальному, а также считались постоянными. В результате наблюдалось хорошее согласование вычисляемых характеристик (в пределах 0,05 для загрузки узлов и  $0,05J$  для среднего числа заявок в узле). Расчет тех же сетей точными методами в предположении экспоненциального времени обслуживания давал более значительные расхождения в оценке указанных характеристик.

#### Список литературы

1. Привалов, А.Н., Моделирование информационных процессов тренажерных систем: концепция, методология, модели / А.Н. Привалов, Е.В. Ларкин – Саарбрюккен: Изд-во LAP LAMBERT, 2012. – 230 с.
2. Привалов А.Н., Кулешов В.Л. Моделирование информационных процессов в вычислительной подсистеме с применением агрегативных моделей // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. – 2009. – № 15 (70). – Вып. 12/1. – С. 106-111.

3. Бальбердин, В.А., Оптимизация информационных процессов в распределённых системах обработки данных / В.А. Бальбердин, А.М. Белевцев, О.А. Степанов. – М.: Технология, 2002. – 280 с.

4. Клепиков, А.К. Модель распределения ресурсов при «облачных» вычислениях / А.К. Клепиков, А.Н. Привалов // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 3. Тула: Изд-во ТулГУ, 2012. С.151-157.

#### References

1. Privalov A.N., Modelling the Information Processes of Training Systems: the Concept, Methodology, Models. Saarbrücken: Izd-vo LAP LAMBERT, 2012. 230 p.

2. Privalov A.N., Kuleshov V.L. Modelling the Information Processes in a Computer Subsystem with Application of Aggregate Models. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Jekonomika. Informatika. 2009. № 15 (70). Vyp. 12/1. Pp. 106-111.

3. Balyberdin, V.A., Optimization of Information Processes in Distributed Processing Systems. Moscow: Tekhnologija, 2002. 280 p.

4. Klepikov, A.K. The Model of Resources Distribution in «Cloud» Computation. Izvestiya TulGU, Tekhnicheskie nauki, №3. Tula: Izd-vo TulGU, 2012. Pp. 151-157.

УДК 004.94

DOI

Журавков М.А.  
Таранчук В.Б.

**ВОЗМОЖНОСТИ И ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СИСТЕМЫ  
MATHEMATICA ПРИ ПРЕПОДАВАНИИ ДИСЦИПЛИН И ИЗУЧЕНИИ  
РАЗДЕЛОВ ПО ОСНОВАМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В  
МЕХАНИКЕ**

- 1) Министр, заведующий кафедрой теоретической и прикладной механики, доктор физико-математических наук, профессор. Министерство образования РБ, Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь. *e-mail: zhuravkov@bsu.by*
- 2) заведующий кафедрой компьютерных технологий и систем, доктор физико-математических наук, профессор Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, г. Минск, 220030, Республика Беларусь *e-mail: taranchuk@bsu.by*

**Аннотация**

Обсуждаются возможности применения технологий Wolfram Research, методические и технические решения, которые существенно дополняют набор инструментов создания, сопровождения и распространения живого динамического контента, рекомендуемого к использованию в учебном процессе при преподавании дисциплин и изучении разделов по основам компьютерного моделирования в механике. Поясняются обеспечивающие интерактивность электронных ресурсов типовые элементы, ключевые конструкции, функции и опции системы компьютерной алгебры *Mathematica*.

Приведены примеры из практики подготовки учебных материалов дисциплин «Компьютерное моделирование» нескольких специализаций.

**Ключевые слова:** интерактивные образовательные ресурсы; система компьютерной алгебры *Mathematica*; формат вычисляемых документов; компьютерное моделирование.

Zhuravkov M.A.  
Taranchuk V.B.

**PERFORMANCE CAPABILITIES AND EXAMPLES OF USAGE  
OF THE MATHEMATICA SYSTEM IN TEACHING DISCIPLINES  
AND STUDY OF SECTIONS DEDICATED TO THE BASICS  
OF COMPUTER MODELLING IN MECHANICS**

- 1) Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Ministr. Head of Department of Theoretical and Applied Mechanics, The Ministry of Education of Belarus, Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, the Republic of Belarus. *e-mail: zhuravkov@bsu.by*
- 2) Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Head of Department of Computer Technologies and Systems, Belarusian State University, 4 Nezavisimosti Ave., Minsk, 220030, the Republic of Belarus. *e-mail: taranchuk@bsu.by*

**Abstract**

The article discusses the possibilities of using the Wolfram Research technologies, the methodological and technical solutions, which considerably implement a set of tools for creation, maintenance and distribution of the live dynamic content which is recommended for use in the educational process in teaching disciplines and learning sections on the basics of computer modelling in mechanics. The authors explain the typical elements, providing the interactivity of electronic resources, the key constructions, functions and options of the *Mathematica* computer algebra system.

The authors give examples from their practice of preparation of teaching materials of the discipline «Computer Modelling» of several specializations.

**Keywords:** interactive educational resources; *Mathematica* computer algebra system; Computable Document Format; computer graphics.

**Введение**

Повышение эффективности использования

информационных технологий является одним из приоритетных направлений развития

современного образовательного процесса [0, 2]. В настоящее время аппаратное и программное обеспечение компьютеров и разнообразных дополнительных устройств предоставляют широкий диапазон возможностей для создания электронных специальных «документов» с компонентами интеллекта, динамической интерактивности. Такие материалы («документы») имеют ряд преимуществ перед печатными изданиями. Актуальной (особенно при организации дистанционного обучения [3]), является задача определения программных средств, позволяющих решать вопросы создания и сопровождения интерактивных образовательных ресурсов широкому кругу преподавателей, в том числе тем, кто не имеет опыта программирования.

В данной работе дальнейшее развитие получили изложенные в [4] технические решения, включающие применение технологий компании Wolfram Research. В частности, отмечены дополнительные возможности системы компьютерной алгебры *Mathematica* [5], формата вычисляемых документов CDF [6], программных приложений-проектов из каталога Wolfram Demonstrations [7] для создания, сопровождения и свободного распространения интерактивных графических приложений, программных модулей, иллюстрирующих решения классических и современных задач механики сплошных сред. Приведены примеры из практики подготовки учебных материалов дисциплин специализации «Компьютерный сервис вычислительного эксперимента» [8], «Компьютерное моделирование» [9]. Специфика преподавания названных предметов состоит в том, что во многих темах этих дисциплин изучаются теоретические основы со сложной математикой, для понимания требуется сопровождающий графический материал, причем с иллюстрациями динамики процессов. Отдельно отметим, что наглядность представления материала, возможность конструирования воображаемых моделей по их математическим описаниям - одно из необходимых требований для корректного понимания сути моделей и их описаний. В отдельных темах названных дисциплин математическая составляющая не только

достаточно сложная, но и трудоемкая в выкладках, поэтому важно иметь возможность делать упрощения и преобразования, причём в математической нотации, на персональном компьютере. Общие вопросы подготовки и адаптации к конкретным группам пользователей соответствующих интерактивных свободно распространяемых программных модулей приведены в [10], в частности обоснована целесообразность принятия системы *Mathematica* в качестве базовой платформы.

### **Примеры и иллюстрации интерактивных учебных материалов**

Следует отметить, что математический аппарат механики сплошных сред содержится в системе *Mathematica* в объеме, превышающем любой учебник ВУЗа. В системе реализованы все известные аналитические методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений и уравнений с частными производными, решения поясняются примерами, которые пользователь может менять, включать в собственные программные приложения; можно использовать математическую нотацию grad, div, curl, Laplacian (градиент, дивергенция, ротор, лапласиан); реализованы все функции векторного анализа, причём в разных системах координат.

Содержательные аспекты компьютерных моделей, изучаемых студентами в дисциплинах специализации, преподаваемых авторами этой работы, изложены, в частности, в [8, 9]. Ряд представительных примеров интерактивных программных приложений из коллекций [7], используемых в учебном процессе, предоставляемых студентам, адаптированных к изучаемым темам, отмечены ниже. Приёмы настройки и адаптации интерактивных программных модулей изложены в [4, 10].

Первая серия - проекты, используемые при изучении темы «Расчеты напряженно-деформированного состояния конструкций и их элементов». В отобранных программных модулях также поясняются иллюстрациями основные конструкции мостов. Фрагменты копий экрана модулей этой серии даны на рисунках 1 и 2.

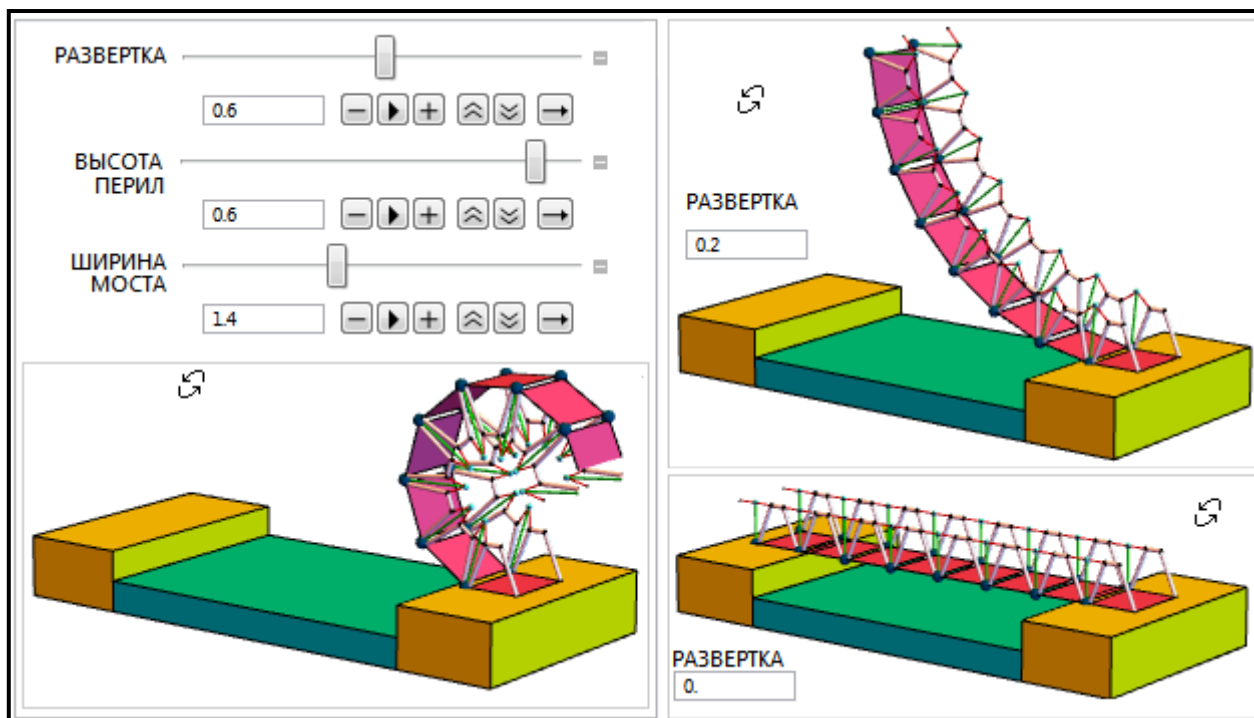


Рис. 1. Интерфейс программного приложения и виды моделируемой конструкции для разных значений параметра развёртки

Fig. 1. The types of software applications and the simulated design interface for different values of the parameter sweep

На рисунках 1 и 2 показаны скриншоты одной панели управления, кадры с результатами работы нескольких программных модулей. Изменение значений параметров на панелях обеспечивает изменение вида конструкции, каждое действие управления можно выполнять, что иллюстрирует рисунок 1, задавая значение параметра в поле ввода или перемещением бегунка; также можно запускать просмотр с автоматическим изменением параметра, регулировать скорость и направления прокрутки видео. Во всех модулях визуализации в блокнотах системы формата NB, CDF документах кроме манипуляций с ползунками на панелях для изменения геометрических параметров, цветов, прозрачности пользователь может у выводимых объектов 3D графики менять масштаб объекта, поворачивать его в разных направлениях.

Т.к. в коллекциях [7] доступны исходные коды, студентам предоставляются включаемые в учебные материалы программные модули не в оригинальной версии, а доработанные. В частности: для опорных элементов конструкций предлагаются альтернативные геометрические примитивы; даются текстовые пояснения с использованием русскоязычной терминологии;

оформление графики сделано, как в базовых учебниках и пособиях; комментарии в модулях переведены на русский язык, их объем значительно увеличен.

Заметим, что в ответ на запрос в поле поиска сайта [7] по ключевому слову bridge дается список 36 разных проектов. В том числе, упоминаются презентации с изложением и описаниями:

- конкретных конструкций мостов и их моделей; в частности, проекты: Консольный мост /Cantilever Bridge/, Подвесные мосты с крепящими опорами разной формы /Bridges with Catenary Shaped Supports/, Разворачивающийся мост /Rolling Bridge/, Голландский разводной мост /Dutch Drawbridge/, Подъемный мост /Bascule (Seesaw) Bridge/, Гейтсхедский мост тысячелетия /Gateshead Millennium Bridge/;

- общих вопросов методик расчёта; в частности, проекты: Модель прогона моста /Girder Bridge Model/, Анализ усилий в фермах /Analysis of Forces on a Truss/, Разновидности мостов /Bridge Varieties/, Нагрузки в фермах мостов /Stress Propagation in a Truss Bridge/, Анализ напряженно-деформированного состояния методом конечных элементов в фермах и узлах соединения /Stress-Strain Analysis by the Finite

Element Method/.

На рисунке 2 приведены фрагменты окон

программных приложений, иллюстрирующих несколько из упомянутых выше моделей мостов.

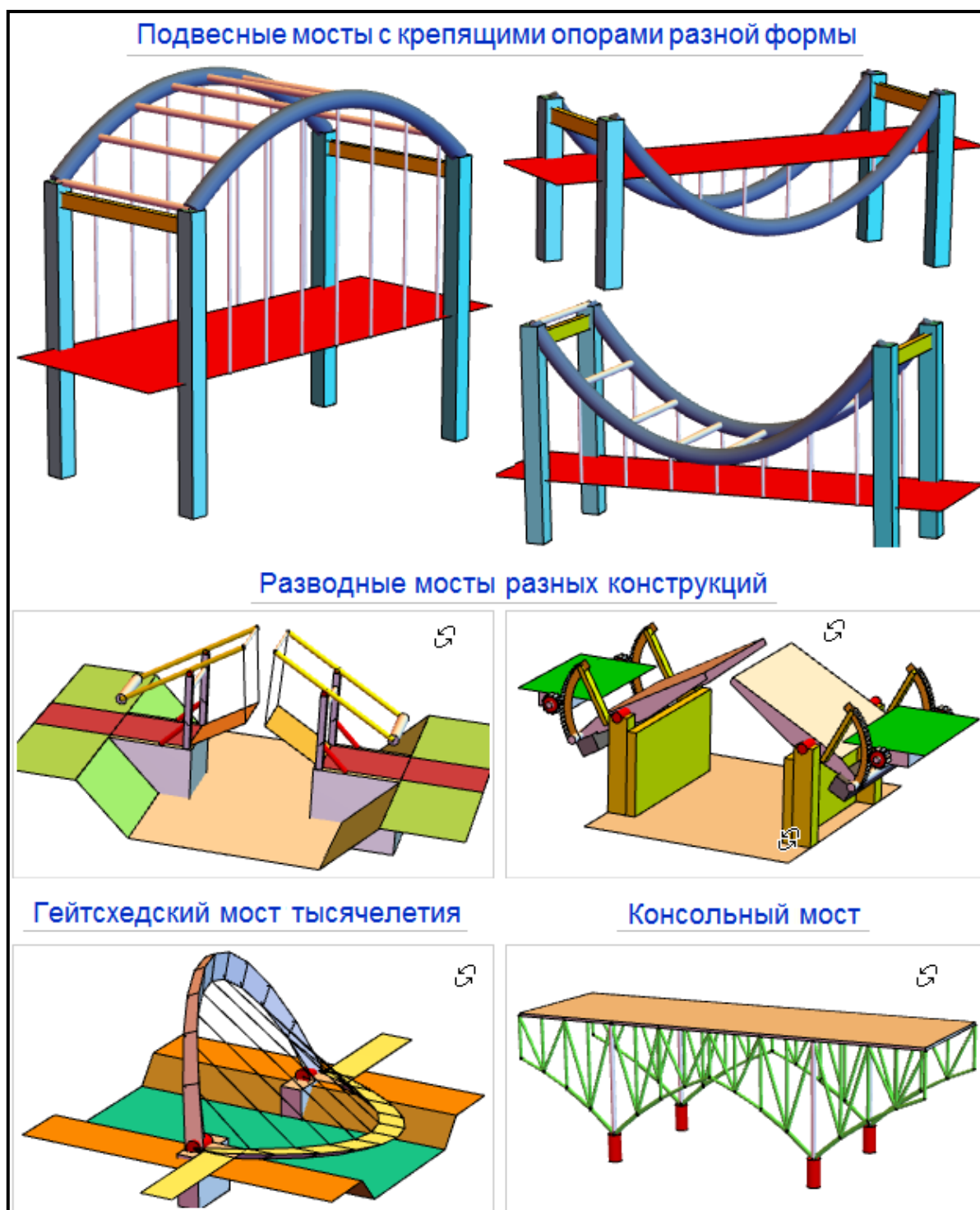


Рис. 2. Пять моделей разных конструкций мостов

Fig. 2. Five different models of bridges

На рисунке 3 приведены фрагменты окон адаптированных программных приложений Girder Bridge Model и Stress-Strain Analysis by the Finite Element Method, которые иллюстрируют модели и

варианты визуализации результатов расчетов напряженно-деформированного состояния конструкций и их элементов.

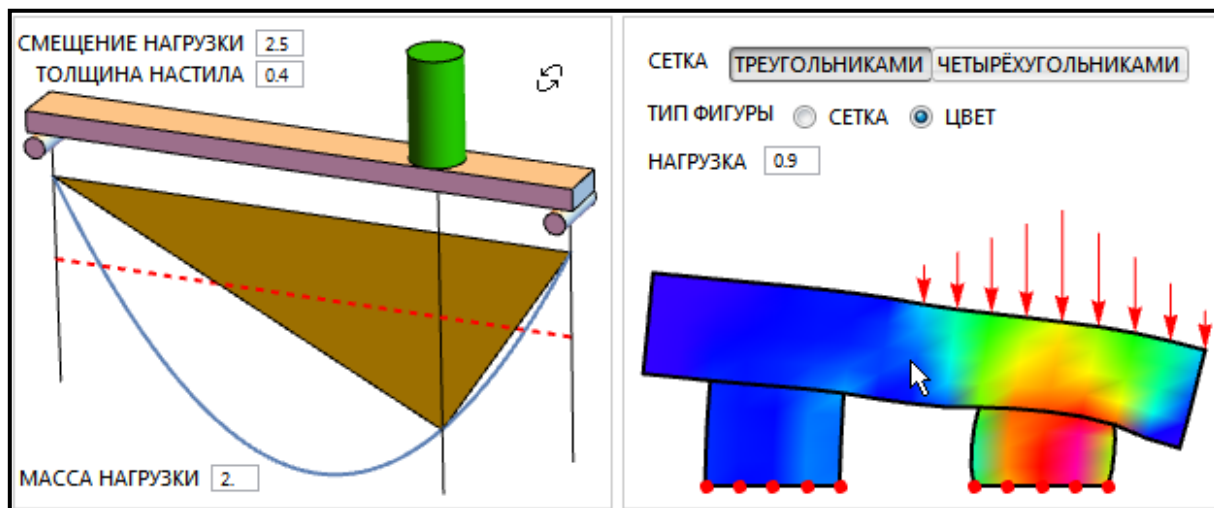


Рис. 3. Примеры модулей с визуализацией нагрузки

Fig. 3. Examples of load-visualization modules

Вторая серия - проекты, используемые при изучении темы «Простейшие модели гидродинамики». Следует заметить, что только в коллекции [7] таких моделей более 100. Студентам на практических занятиях предлагается освоить и запрограммировать с определенными дополнениями перечисленные ниже модели.

Основные модели этой серии, используемые при выполнении контролируемой самостоятельной работы студентов: Поток через открытый канал /Flow through an Open Channel/, Истечение жидкости из емкости через отверстие /Flow of Liquid through a Hole/, Безвихревое течение идеальной жидкости вблизи угла /Fluid Flow around a Corner/, Течение Куэтта /в вариантах Couette Flow и Double-Sided Couette Flow/, Ламинарный поток между двумя эксцентричными трубами /Laminar Flow between Two Eccentric Tubes/, Линии тока ламинарного

потока вблизи вращающегося твердого цилиндра /Streamlines for Laminar Flow Past a Rotating Solid Cylinder/, Профиль скоростей потока несмешивающихся вязких жидкостей /Velocity Profile for Immiscible Viscous Fluids/, Обтекание крыла для разных условий набегающего потока /Potential Flow over an Airfoil Specified by Numerical Data File/, Запуск ракеты /Launching a Rocket/, Сопло Лавалья /De Laval Nozzle/.

Иллюстрации типичных программных приложений этой серии даны на рисунках 4, 5. Приведены результаты работы с адаптированными программными модулями «Ламинарный поток между двумя эксцентричными трубами» (показаны изолинии модуля безразмерной скорости), на рисунке 5 - профиль скоростей потока несмешивающихся вязких жидкостей (слева) и линии тока ламинарного потока вблизи вращающегося твердого цилиндра (справа):

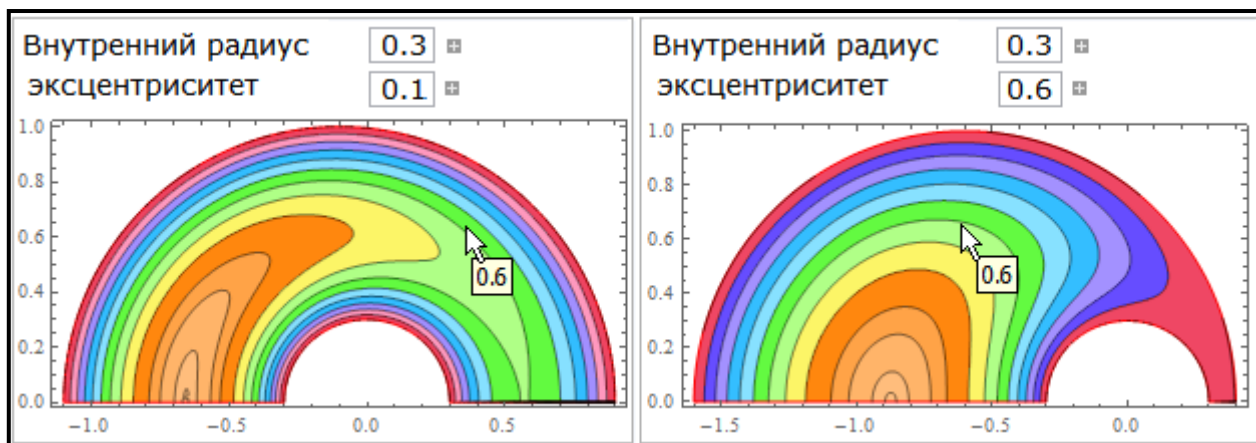


Рис. 4. Примеры модулей с визуализацией, эффект изменения значения эксцентриситета  
Fig. 4. Examples of modules with visualization, the effect of changing the value of eccentricity

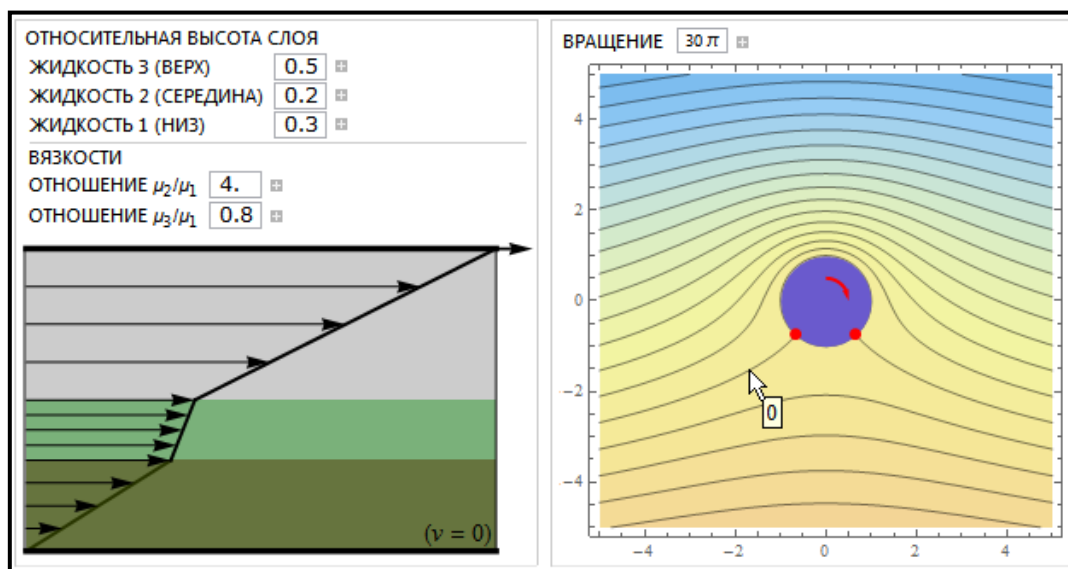


Рис. 5. Примеры модулей с визуализацией скорости потока и линий тока  
Fig. 5. Examples of modules with visualization of velocity and streamlines

### Базовые программные инструменты О средствах настройки динамической интерактивности

Наиболее часто в блокнотах *Mathematica* динамическая интерактивность, диалоговые окна, управление параметрами входных данных для вычислений, построение и просмотр графиков реализуются с использованием функций Manipulate, Animate, Dynamic. В частности, модуль Manipulate позволяет создавать различные интерактивные средства по заданному выражению expr с аргументами (параметрами), причем, выражение expr трактуется в самом общем виде и может быть списком, включающим названия, математические выражения, графические функции и т.д. Особое внимание при пояснениях в представляемых студентам

приложениях уделено вопросам программирования динамического вывода, использования инструментов интерактивности - примерами иллюстрируются функции и опции динамических вычислений, включения и выключения индикаторов, организации флажков, кнопок, иерархических и выпадающих меню, локаторов. Поясняются: PopupMenu (выпадающее меню), ActionMenu (меню с действиями), ButtonBar (полоса кнопок), Delimiter (разделительная линия), CheckBoxBar (полоса чекбоксов), RadioButtonBar (ряд радиокнопок), SetterBar (ряд установочных элементов), TogglerBar (ряд переключателей), ControlType (тип элемента управления), Locator (указатель, устройство ввода позиции), Slider (ползунок), Slider2D (2-мерный ползунок), ColorSlider

(цветовой ползунок), ListPicker (элемент выбора со списка), AutorunSequencing (порядок автоматического использования элементов управления).

#### **Опции динамической интерактивности в CDF документах**

При подготовке блокнотов в *Mathematica*, если предполагается их сохранение, просмотр в CDF Player, следует выполнять инициализацию (Initialization:->) или сохранить параметры для анимации (SaveDefinitions). Это обязательно, т.к. CDF Player не может загружать пользовательские данные во время работы. Допустима работа только с теми списками, комплектами, наборами, которые включены в базу знаний, т.е. вся используемая функцией Manipulate информация должна была встроена в интерактивные элементы .cdf файла.

#### **Оформление**

В части оформления, настройки вида объектов сцены в упражнения включены пояснения правил задания толщины и типа линий (Thickness, Thick, Thin, AbsoluteThickness. Dashed, Dotted, DotDashed), цветов и прозрачности (Colors, Opacity). Включены подробные примеры использования функций и опций управления кадром вывода: PlotRegion (опция функций графики для определения выводимой на экран части изображения), PlotRange (отображаемый интервал координат графика), PlotRangeClipping (условия отсечения выходящего за диапазон), AspectRatio (отношение масштабов по осям), BoxRatios (соотношение показываемых длин сторон ограничивающего параллелепипеда 3D изображения), Translate (перемещение), Rotate (повороты), GeometricTransformation (геометрические преобразования), ViewPoint (точка обзора), ViewAngle (угол обзора).

#### **Об основных сервисных функциях компьютерных моделей**

Для визуализации моделей, когда есть аналитическое описание, могут использоваться следующие функции системы *Mathematica*:

– Plot - график аналитически заданной функции (или нескольких функций), обе шкалы линейные;

– ParametricPlot - график кривой (а также поверхности), заданной параметрически;

– PolarPlot - график функции в полярной системе координат, как положение конца радиус-вектора при изменении угла в заданном диапазоне (полярная диаграмма);

– Graphics – генерирует примитивы 2D

графики (отрезки, полигоны, разные треугольники, прямоугольники, параллелограммы, ромбы, окружности, дуги, сегменты, B-сплайны, Безье-кривые);

– ContourPlot – контурный график; график, который показывает линии равного уровня (изолинии); контурные графики (или графики в горизонталях) используются для изображения изолиний набора скалярных данных, распределенных по поверхности;

– DensityPlot – плотностный график (карта зон);

– RegionPlot – визуализация геометрической фигуры на плоскости;

– ParametricPlot – график параметрически заданной области на плоскости;

– Plot3D – 3D визуализация функции двух переменных, заданной явно аналитически в декартовых координатах; с графиком можно работать интерактивно, обеспечиваются: изменение масштаба, повороты и перемещения;

– ContourPlot3D – контурный график явно заданной в декартовых координатах функции в пространстве; трехмерный контурный график включает также расположенные в пространстве линии равного уровня, показывающие границы слоев трехмерной фигуры в секущих плоскостях, расположенных параллельно опорной плоскости фигуры;

– RegionPlot3D – визуализация геометрической фигуры в пространстве;

– DensityPlot3D – пространственный график, иллюстрирующий распределение в пространстве заданной функции от двух переменных на основе непрерывной или специально задаваемой цветовой схемы;

– ParametricPlot3D – график параметрически заданной кривой или поверхности в пространстве;

– SphericalPlot3D – график в сферических координатах.

В случаях, когда математическое описание моделей создается на основе аппроксимации по результатам наблюдений и замеров на регулярных или нерегулярных сетках (на рассеянном множестве точек), могут использоваться следующие функции:

– ListPlot – диаграмма разброса данных; выводит график списка величин, координаты которых задаются значениями списка/списков;

– ListLinePlot – линейный график по точкам списка данных (перечень значений или список пар координата - значение);

- ListStepPlot – ступенчатый график по списку значений;
- ListPolarPlot – диаграмма разброса данных в полярных координатах;
- DateListPlot – график от календарного времени;
- TimeSeries – временной ряд;
- ListContourPlot – контурный график по массиву значений;
- ListDensityPlot – плотностный график по массиву значений;
- ListPlot3D – трехмерная диаграмма разброса данных, представление в пространстве поверхности по массиву значений высот в точках;
- ListContourPlot3D – контурный 3D-график по массиву значений;
- ListSurfacePlot3D – 3D-график поверхности, восстановленной по списку точек;
- ListPointPlot3D – 3D-диаграмма разброса данных, в пространстве генерируются изображения точек с тремя заданными координатами;
- ListDensityPlot3D – пространственный плотностный график по данным.

Инструменты и функции работы с векторными полями:

- StreamPlot – линии тока на плоскости (диаграмма потоков);
- StreamDensityPlot – линии тока на плоскости с фоном плотности функции (плотностная диаграмма потоков);
- VectorPlot – векторные поля на плоскости (векторная диаграмма);
- VectorDensityPlot – векторно-плотностная диаграмма;
- ListVectorPlot – векторная диаграмма, формируемая по данным;
- ListVectorDensityPlot – плотносно-векторная диаграмма по данным;
- ListStreamPlot – диаграмма интенсивности потоков, формируемая по таблицам данных, т.е. выполняется аппроксимация, а затем построение линий тока на плоскости;
- ListStreamDensityPlot – плотностная диаграмма интенсивности потоков по данным;
- ArrayPlot – изображение массива; генерирует изображение, в котором значениям массива соответствуют раскрашенные квадраты;
- VectorPlot3D – векторная диаграмма (векторные поля) в пространстве;
- ListVectorPlot3D – векторная 3D-диаграмма по данным.

## Заключение

Приведены представительные примеры использования при преподавании дисциплин по основам компьютерного моделирования в механике живого динамического контента, создаваемого и сопровождаемого на основе предложенной методики интеграции средств системы *Mathematica*, формата вычисляемых документов CDF, модулей коллекции свободно распространяемых интерактивных приложений. Определены и отмечены рекомендуемые для реализации методики базовые программные инструменты.

## Список литературы

1. Абламейко С.В., Казаченок В.В., Мандрик П.А. Современные информационные технологии в образовании // Информатизация образования – 2014: педагогические аспекты создания и функционирования виртуальной образовательной среды = Informatization of education – 2014: Pedagogical aspects of the development of virtual educational environment: материалы междунар. науч. конф., г. Минск, 22–25 окт. 2014 г. / Минск, 2014. – С. 7-13.
2. Ломакин В.В., Асадуллаев Р.Г. Организация интеллектуального управления индивидуальными образовательными траекториями // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. № 22 (165) выпуск 28/1. С. 167 – 173.
3. Дмитренко Т.А., Деркач Т.Н., Дмитренко А.А. Технология разработки системы дистанционного обучения // Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. № 8 (179) выпуск 30/1, раздел системный анализ и управление, Белгород, 2014 г. С. 128 – 137.
4. Таранчук В.Б. Возможности и средства Wolfram *Mathematica* для разработки интеллектуальных обучающих систем Научные ведомости БелГУ. Сер. История. Политология. Экономика. Информатика. № 1 (198) выпуск 33/1. С. 102 – 110.
5. Wolfram *Mathematica*. Наиболее полная система для современных технических вычислений в мире [Электронный ресурс]. URL: <http://www.wolfram.com/mathematica>. (Дата обращения: 8.02.2016)
6. CDF. Документы оживают благодаря возможностям вычислений [Электронный ресурс] URL: <http://www.wolfram.com/cdf>. (Дата обращения: 8.02.2016)
7. Wolfram Demonstrations Project [Электронный ресурс]. URL: <http://demonstrations.wolfram.com>. (Дата обращения: 8.02.2016)
8. Таранчук В.Б. Графический сервис вычислительного эксперимента: учеб.-метод. пособие.– Минск: БГУ, 2009. – 124 с.
9. Босяков С.М., Журавков М.А. Решение задач механики в пакете Structural Mechanics компьютерной системы *Mathematica*: пособие для студентов мех.-мат.фак. – Минск: БГУ, 2011. – 295 с.

10. Таранчук В.Б. Особенности функционального программирования интерактивных графических приложений // Вестник Самарского государственного университета. Естественнонаучная серия, раздел Математика № 6 (128), 2015 г. С. 178 – 189.

#### References

1. Ablameiko S.V., Kazachenok V.V., Mandrik P.A. Modern Information Technologies in Education. Informatization of Education – 2014: Pedagogical Aspects of the Development and Functioning of Virtual Educational Environment = Informatization of education – 2014: Pedagogical aspects of the development of virtual educational environment: materials of International Scientific Conference, Minsk, Oct. 22-25, 2014. Minsk, 2014. Pp. 7-13.
2. Lomakin V.V., Asadullaev R.G. Organization of Intellectual Control over Individual Educational Trajectories. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Ekonomika. Informatika. № 22(165) Issue 28/1. Pp. 167-173.
3. Dmitrenko T.A., Derkach T.N., Dmitrenko A.A. Technology of Distance Learning System Development. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Ekonomika. Informatika. № 8 (179) Issue 30/1. Pp. 128-137.
4. Taranchuk V.B. Capabilities and Tools of the Wolfram *Mathematica* for Development of Intelligent Tutoring Systems. Nauchnye vedomosti BelGU. Ser. Istorija. Politologija. Ekonomika. Informatika. № 1 (198) Issue 33/1. Pp. 102-110.
5. The World's Definitive System for Modern Technical Computing [electronic resource]. URL: <http://www.wolfram.com/mathematica>. (date of access: February 8, 2016).
6. CDF. Documents Come Alive with the Power of Computation [electronic resource] URL: <http://www.wolfram.com/cdf>. (date of access: February 8, 2016).
7. Wolfram Demonstrations Project [electronic resource]. URL: <http://demonstrations.wolfram.com>. (date of access: February 8, 2016).
8. Taranchuk V.B. Graphic Services of the Computational Experiment: a study-guide. Minsk: BSU, 2009. 124 p.
9. Bosyakov S.M., Zhuravkov M.A. The Solution of Problems of Mechanics in the Package of Structural Mechanics *Mathematica* Computer System: a guide for students of the Faculty of Mechanics. Minsk: BSU, 2011. 295 p.
10. Taranchuk V.B. Features of Functional Programming of Interactive Graphical Applications. Vestnik Samarskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Estestvennonauchnaja serija, razdel Matematika № 6 (128), 2015. Pp. 178-189.

УДК 004; 334.724

DOI

**Путивцева Н. П.  
Игрунова С. В.  
Бекетова Е. Ю.  
Капитан С.А.**

**РАЗРАБОТКА ИЕРАРХИЧЕСКОЙ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ  
ПРОЦЕДУРЫ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ЭКСПЕРТОВ**

- 1) доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий, кандидат технических наук Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия. *e-mail: putivzeva@bsu.edu.ru*
- 2) доцент кафедры информационных систем, кандидат социологических наук, доцент. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия. *e-mail: igrunova@bsu.edu.ru*
- 3) магистрант. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия. *e-mail: 704250@bsu.edu.ru*
- 4) магистрант. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия. *e-mail: 710664@bsu.edu.ru*

**Аннотация**

Очень часто требуется принятие решений в сложных ситуациях выбора из нескольких альтернатив по многим критериям, которые имеют неодинаковую значимость. Решение таких задач требует привлечения экспертов и проведения групповой экспертизы. Одним из важных и проблемных моментов проведения экспертизы является отбор высококвалифицированных экспертов. Решение данной проблемы требует применения адекватных обоснованных процедур оценки качества экспертов.

На сегодняшний день нет единого подхода к понятию качества эксперта и оценки процедуры. В статье приведено описание разработанной иерархической процедуры оценки качества привлекаемых экспертов, состоящей из способов формирования групповых экспертных суждений, включая правило учета весомостей, определяющих качество эксперта, при формировании групповых экспертных суждений, и оценивания частных показателей качества и интегрального уровня качества привлекаемых экспертов. Для оценки эксперта по каждому из частных свойств, составляющих понятие качества эксперта, реализуются соответствующие методики их определения.

**Ключевые слова:** качество эксперта; компетентность эксперта; иерархическая процедура; многокритериальное оценивание.

**Putivtseva N.P.  
Igrunova S.V.  
Beketova E.Yu.  
Capitan S.A.**

**IMPLEMENTATION OF THE HYERARCHICAL MULTICRITERIA  
PROCEDURE OF THE EVALUATION OF EXPERTS' QUALITY**

- 1) Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Department of Applied Informatics and Information Technologies, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia. *e-mail: putivzeva@bsu.edu.ru*
- 2) Candidate of Sociological Sciences, Associate Professor. Department of Information Systems. Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia. *e-mail: igrunova@bsu.edu.ru*
- 3) Master's Degree Studen. Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia *e-mail: 704250@bsu.edu.ru*
- 4) Master's Degree Student. Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia *e-mail: 710664@bsu.edu.ru*

**Abstract**

Very often, someone needs to make decisions in difficult situations of choice from several alternatives, using many criteria of different importance. Solving such problems requires the involvement of experts and a group expertise. One of the most important and challenging aspects

of the expertise is the selection of highly qualified experts. The solution of this problem requires the use of adequate justified procedures assessment of experts' quality.

Nowadays, there is no unified approach to the concept of expert's quality and the assessment procedure. The article describes the hierarchical assessment procedures of involved experts' quality that consists of the methods of formation of the group expert judgements, including the rule of the accounting of weights, determining the quality of an expert, in the formation of the group expert judgments and assessment of private indicators of quality and the integral level of quality for involved experts. For assessment of the expert with the use of each of the particular properties that make up the concept of the quality of expert, appropriate methods of their determination are implemented.

**Keywords:** quality of an expert; expert competency; hierarchical procedure; multi-criteria evaluation.

### **Введение**

Анализ литературных источников по проблемам оценивания компетентности и качества экспертов позволил сделать вывод о том, что проблема оценки качества экспертов до сих пор еще не может считаться решенной, как считают авторы работы [1], возможно, это объясняется отсутствием системного подхода к ее решению. В научной литературе обычно приводятся только названия небольшого количества отдельных свойств, характеризующих эксперта, без их обоснования и без указания взаимосвязи между ними – например, объективность, компетентность, беспристрастность. Для количественной оценки качества эксперта нужно, прежде всего, получить частные оценки отдельных свойств, от которых это качество зависит. Большинство же предложенных в научной литературе и используемых на практике методов предназначено для оценки не какого-то одного, а нескольких частных свойств [7].

### **Основная часть**

Наиболее полная и иерархическая структура понятия «качество эксперта» предложена в работе [1], где представлены свойства эксперта в виде иерархической структуры, которая отражает их взаимосвязь.

Как показано в работе, качество эксперта определяется четырьмя группами свойств: компетентностью, заинтересованностью в результатах экспертизы, деловитостью и объективностью (беспристрастностью). Каждая из групп в свою очередь содержит в себе несколько свойств.

Авторы представляют качество в виде иерархии частных свойств, описывают методы вычисления частных свойств качества и получение комбинированных оценок как

взвешенной суммы. Представляется целесообразным реализовать оценку качества с использованием многокритериального оценивания. Из тех частных свойств, которые предлагается использовать в работе [2], мы взяли наиболее информативные и поддающиеся оценке методы, и сформулировали критерии для их сравнения при определении важности указанных критериев для оценки качества экспертов.

Предлагается следующая иерархия для оценивания качества экспертов (Рисунок 1).

Представленная иерархия предлагается экспертам, чтоб они осуществили парные сравнения подкритериев, то есть характеристик, позволяющих всесторонне оценивать качество эксперта с позиций, выбранных для этого критерия. Если кто-то из привлекаемых экспертов считает, что некоторые из представленных характеристик не представляют никакой дополнительной информации, позволяющей более адекватно оценить качество эксперта, они могут указать это, а также могут предложить свои характеристики, если таковые имеются [3, 4].

В результате обработки определенного уровня иерархии получаем весомости частных показателей качества экспертов. Для того чтобы сравнивать экспертов по каждому из критериев, необходимо выбрать, как рассчитать каждое частное свойство эксперта, каким образом скомплексировать «качество» каждого эксперта по каждому из указанных частных критериев, после чего вычислить «весомости» экспертов, и, в результате обработки иерархии получить интегральные весомости качества экспертов как интегральный показатель их профессионализма. Элементы МПС экспертов по каждому из частных свойств представляют собой отношение их весомостей, рассчитанных по каждому из частных свойств.

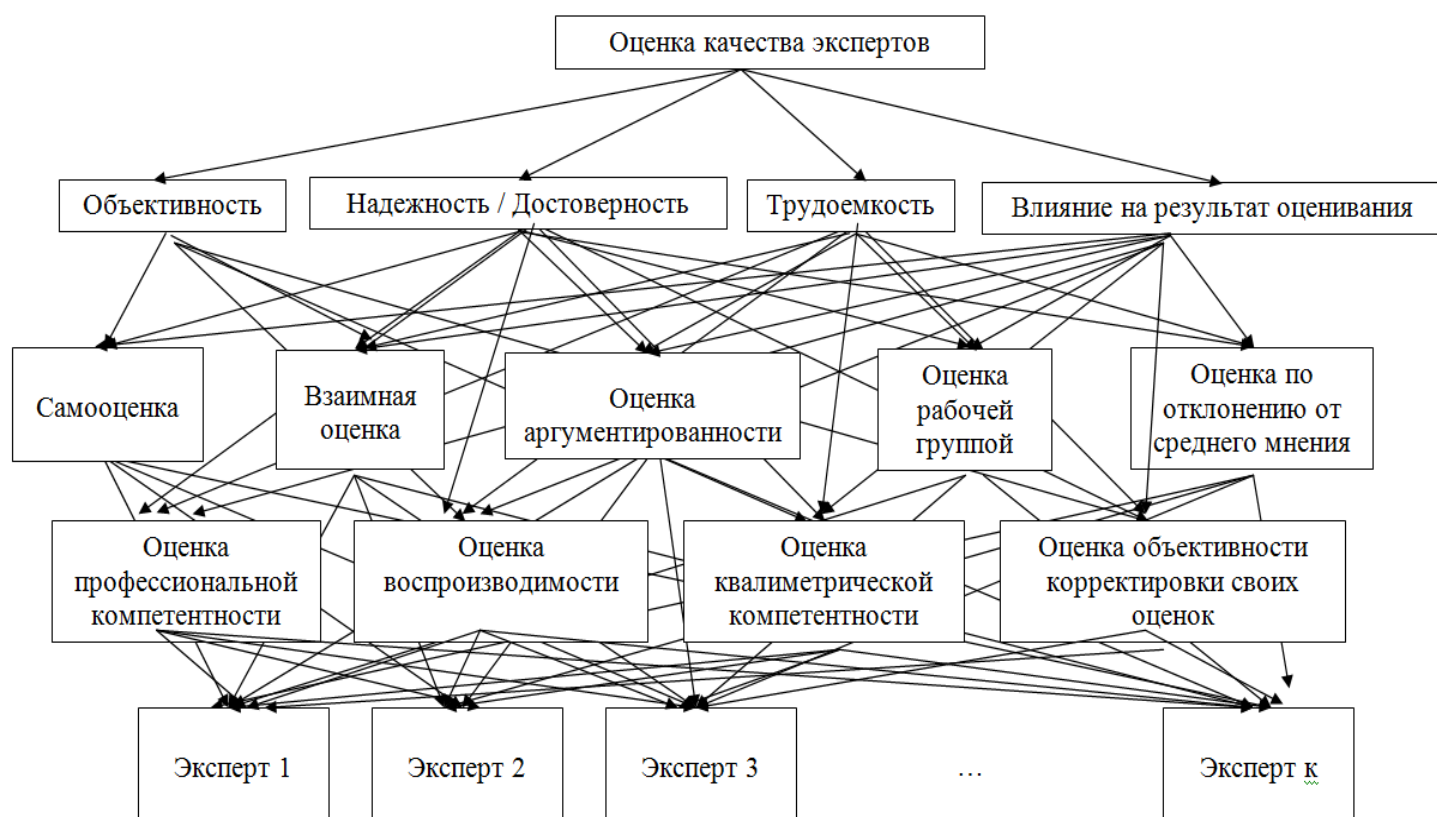


Рис. 1. Иерархия для оценивания качества экспертов

Fig. 1. The hierarchy for the evaluation of experts' quality

Для каждого из частных свойств, составляющих понятие качества эксперта, имеется своя методика их определения.

Предлагается находить весомости частных показателей качества экспертов следующим образом [5].

**Самооценка.** Самооценка вычисляется по формуле:

$$K_{сам j} = \sum_{i=1}^n M_i \cdot K_{ij} \quad (1)$$

где  $K_{сам j}$  – самооценка  $j$ -го эксперта;  $M_i$  – весомость показателей информированности и

знакомства, определяемая в соответствии с данными табл. 1;  $K_{ij}$  – оценка, зависящая от степени информированности и степени знакомства, определяемая в соответствии с данными табл. 1.

Поскольку  $\sum_{i=1}^n M_i = 1,00$ , а  $0 \leq K_{ij} \leq 10$ , то  $0 \leq K_{сам j} \leq 10$ , поэтому делим полученный результат на максимально возможное значение  $K_{сам j}$  для получения весомости в пределах от 0 до 1.

Таблица 1

**Определение коэффициента самооценки**

Table 1

**Determination of the coefficient of self-esteem**

Факторы, влияющие на самооценку эксперта	Весомость показателей $M_i$	Оценка в зависимости от степени информированности и знакомства			
		$K_i = 10,0$	$K_i = 7,5$	$K_i = 2,0$	$K_i = 0$
Источники информации	-	Читаю часто и регулярно	Читаю часто, но не регулярно	Читаю редко	Не читаю
Отечественная литература по вопросам, связанным с объектом экспертизы	0,10				
Зарубежная литература по вопросам, связанным с объектом экспертизы	0,20				
Характер знакомства		Степень знакомства			
		высокая	средняя	низкая	отсутствует
Непосредственное знакомство с вопросами, связанными с объектом экспертизы за рубежом (симпозиумы, командировки и т.д.)	0,14				

**Взаимная оценка.** При реализации взаимной оценки каждый эксперт дает количественную оценку всем остальным экспертам. Затем определяется средняя оценка каждого эксперта. Но подобная процедура является достаточно легкой для выполнения только при ограниченном количестве членов экспертной группы ( $N < 15$ ).

При  $N \geq 15$  человек рекомендуется следующая процедура определения взаимооценки. На специальном бланке каждый эксперт объединяет всех экспертов в три подгруппы в соответствии со своим представлением об их качестве: наиболее квалифицированные, средней квалификации и ниже средней квалификации. Число экспертов в подгруппе не должно превышать 6-8 человек. Затем он ранжирует экспертов каждой подгруппы. Ранг 1 получает самый

квалифицированный эксперт, ранг 2 – следующий по квалификации и т. д. Оценка дается с точностью до половины балла. Определяется средняя оценка каждого эксперта:

$$K_{эзj} = \frac{\sum_{p=1}^{N_i} K_{pj}}{N_i} \quad (2)$$

где  $K_{эзj}$  – средняя взаимооценка j-го эксперта;  
 $K_{pj}$  – оценка, проставленная p-м экспертом j-му;  
 $N_i$  – число экспертов, оценивающих j-го эксперта, причем  $N_i < N$  ( $N$  – общая численность экспертной группы).

**Оценка аргументированности и знакомства с объектами оценивания (вариант самооценки).** Для оценки предлагается использовать следующую таблицу.

Таблица 2

**Шкала оценки эксперта**

Table 2

**The scale of the assessment of an expert**

Количество баллов	Характеристика эксперта
3	Вопрос не входит в сферу тесно связанного с его узкой специализацией направления (например, знакомство с проблемой по литературным источникам, по работе на другом предприятии и т.п.)
5	Вопрос входит в сферу тесно связанного с его узкой специализацией направления (прикладная дисциплина, смежная область практической деятельности)
8	В практическом решении данного вопроса эксперт участвует, но этот вопрос не входит в сферу его узкой специализации
10	Эксперт специализируется по данному вопросу, имеет по нему законченные теоретические или практические разработки (научные исследования, данный вопрос непосредственно относится к области его узкой служебной деятельности)

Предлагается для вычисления данного показателя делить выставленный балл на максимально возможное значение показателя, то есть 10, чтоб получить коэффициент в пределах от 0 до 1.

**Оценка рабочей группой.** Рабочей группой может оцениваться собранность, внимательность, заинтересованность в результатах экспертизы. Предлагаем оценивать эксперта по

документальным свидетельствам его деятельности на основе следующей таблицы.

Для определения весового коэффициента предлагается найти суммы баллов, проставленные эксперту каждым членом рабочей группы, усреднить соответствующие значения, проставленные членами рабочей группы, после чего полученное значение разделить на максимально возможное значение данной характеристики.

Таблица 3

**Оценка эксперта рабочей группой**

Table 3

**Evaluation of an expert by the working group**

Занимаемая должность	Субъективная оценка $h_0$							Субъективная оценка $h_c$					
	Баллы	Уровень образования	Баллы	Общий стаж работы	Баллы	Стаж работы по проблеме	Баллы	Количество публикаций по тематике экспертизы	Баллы	Количество экспертных заключений по тематике экспертизы	Баллы	Степень участия в решении данной проблемы	Баллы
Руководитель организации	10	Д.э.н.	6	Более 10	10	Более 10	10	Более 10	10	Более 7	10	Эксперт специализируется по данному вопросу	10
Заместитель руководителя	8	К.э.н.	4	От 10 до 5	8	От 10 до 5	8	От 9 до 7	8	От 6 до 4	7	Эксперт участвует в практическом решении данного вопроса, но он не входит в сферу его узкой специализации	8
Руководитель подразделения	6	Высшее образование	2	Менее 5 лет	6	Менее 5 лет	6	От 6 до 4	5	От 3 до 1	3	Вопрос входит в сферу тесно связанного с его узкой специализацией направления	6
Заместитель руководителя подразделения	4							От 3 до 1	2	0	0	Вопрос не входит в сферу тесно связанного с его узкой специализацией направления	3

**Оценка по отклонению от среднего мнения экспертной группы.** Для нахождения согласованного (среднего) мнения экспертов предлагается использовать медиану в качестве среднего мнения. Медиана есть такая матрица парных сравнений (МПС), сумма расстояний от которой до всех МПС, получаемых экспертами, является минимальной.

$$\|y_{ik}^*\| \leftarrow \min_{y_{ik}} \sum_{s=1}^d \sum_{i,k=1}^m |y_{ik}^s - y_{ik}| \quad (3)$$

Для определения медианы вводится понятие расстояния (метрики) между матрицами парных сравнений экспертов:

$$d_{sl} = \sum_{i,k=1}^m |y_{ik}^s - y_{ik}^l| \quad (s, l = 1, 2, \dots, d) \quad (4)$$

Расстояние между матрицами парных сравнений определяется числом поразрядных несовпадений всех значений элементов матриц (метрика Хэмминга). Метод оценки качества

экспертов по отклонению от результирующей оценки объекта экспертной комиссией основан на расчете коэффициента отклонения  $K_0$ .

$$K_{oi} = \frac{d_{oi}}{d_{max}} \quad (5)$$

где  $K_{oi}$  – коэффициент отклонения суждений  $i$ -го эксперта,  $d_{oi}$  – расстояние индивидуальной оценки  $i$ -го эксперта от результирующей оценки,  $d_{max}$  ~ максимально возможное расстояние оценки эксперта от результирующей оценки.

Для расчета расстояний могут быть использованы различные формулы. Если оценки точечные, то

$$d_{oi} = O_i - O_{rez} \quad (6)$$

где  $O_i$  – оценка  $i$ -го эксперта,  $O_{rez}$  – результирующая оценка экспертной комиссии.

**Оценка профессиональной компетентности.** Для определения уровня

профессиональной компетенции эксперта предлагается провести тестовое испытание по известным данным об объекте экспертизы, либо об аналогичных объектах, если имеются результаты проведения другой экспертизы, участие в которой данный эксперт не принимал. Эксперту предлагается заполнить матрицы парных сравнений для оценки предпочтительности показателей, для которых известен вектор их предпочтительности, полученный в результате проведения экспертизы. В результате обработки МПС эксперта вычисляется вектор весовостей показателей, отражающий их предпочтительность для данного эксперта. Этот вектор сравнивается с так называемым «эталоном», и на основе меры **Питмена** определяется уровень профессиональной компетенции эксперта в области анализа инвестиционных проектов [6].

Для оценивания уровня профессиональной компетентности весомости объекта экспертизы по отдельным критериям предлагается комплексировать по критериям с помощью свертки.

$$z_{ir} = \sum_{k=1}^K R_k^{\circ} \cdot V_{ik}, \quad \sum_{i=1}^K z_{ir} = 1, \quad r = \overline{1, N} \quad (7)$$

где  $z_{ir}$  – интегральные весомости объекта экспертизы,  $i$  – номер объекта экспертизы,  $k$  – номер критерия,  $K$  – количество критериев;  $N$  – количество объектов экспертизы,  $R_k^{\circ}, k = \overline{1, K}$  – весомости критериев, определяемые тестируемым экспертом,  $V_{ik}$  – весомости объекта экспертизы по каждому из критериев сравнения.

Эталонные интегральные весомости объекта экспертизы  $y_{ir}$  также вычисляются комплексированием по критериям с помощью свертки.

$$y_{ir} = \sum_{k=1}^K R_k \cdot V_{ik}^r, \quad \sum_{i=1}^K y_{ir} = 1, \quad r = \overline{1, N} \quad (8)$$

$R_k, k = \overline{1, K}$  – весомости критериев, определяемые эталонными экспертами,  $V_{ik}^r$  – полученные в результате обработки заполняемых экспертами МПС эталонные весомости объекта экспертизы по каждому из критериев сравнения.

Процедура вычисления оценки уровня профессиональной компетентности эксперта осуществляется следующим образом.

В качестве меры близости весомостей ответов тестируемого эксперта к весомостям эталонным возьмем следующую величину:

$$Q_r = \sqrt{\frac{1}{2} \sum_{i=1}^K (\sqrt{y_{ir}} - \sqrt{z_{ir}})^2}. \quad (9)$$

Градации предлагаются следующие:

$Q_r \in [0; 0.2] \Leftrightarrow$  высокий уровень профессиональной компетентности

$Q_r \in (0.2; 0.5) \Leftrightarrow$  средний уровень профессиональной компетентности

$Q_r \geq 0.5 \Leftrightarrow$  низкий уровень профессиональной компетентности

#### Оценка воспроизводимости

$$K_{sp.j} = 10(1 - \rho_j') \quad (10)$$

где

$$\rho_j' = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n [M'_{ij} - M''_{ij}] \quad (11)$$

$M'_{ij}$  и  $M''_{ij}$  – значения  $i$ -го коэффициента весомости, назначенные  $j$ -м экспертом соответственно в первом и втором турах.

Результаты можно считать воспроизводимыми, если выполняется условие

$$[M_1 - M_2] \leq \varepsilon = t_{\alpha} \cdot S_{M_i} \quad (12)$$

где  $M_1$  и  $M_2$  – средние значения коэффициентов весомости, полученные соответственно в первом и втором турах.  $\varepsilon$  – доверительный интервал;  $S_{M_i}$  – несмещенная оценка средней квадратической ошибки определения  $M_i$ ;  $t_{\alpha}$  – значение критерия Стьюдента.

**Оценка квалиметрической компетентности.** Для определения квалиметрической компетенции эксперта ему предлагается для имеющихся 3-5 вариантов сценариев дальнейшего развития объекта экспертизы, для которых известны (рассчитаны) значения исходных показателей, спрогнозировать вероятности наступления каждого из сценариев. Сопоставление вероятностей эксперта с известными весомостями осуществляется также с использованием меры Питмена. Оценивается также умение работать с различными видами шкал – как с существующими, так и предлагать свои с вербальными градациями [2, 8].

**Оценка объективности корректировки своих оценок (отсутствия конформизма).** Повышение степени объективности эксперта может достигаться в некоторых экспертизах с помощью учета конформизма и конъюнктурности

эксперта. Конъюнктурность эксперта проявляется в том, что эксперты, привлеченные для участия в экспертизе, прямо либо косвенно заинтересованы в ее результате.

В этом случае целесообразно проведение тестовых экспертиз с априори известным объективным результатом экспертизы. Если целью экспертизы является ранжирование экспертами альтернативных вариантов (объектов) по сравнительной предпочтительности, то при проведении тестовой экспертизы определяется объективное ранжирование альтернативных вариантов  $P_0$ . Тогда для каждого эксперта может быть рассчитан коэффициент конъюнктурности

$$K_{ki} = d(P_0, P_i) / \max d(P_0, P_i), i \in \{1, \dots, m\}, \quad (13)$$

где  $P_i$  – результат ранжирования альтернативных вариантов  $i$ -ым экспертом.

Для оценки конформности предлагается следующее выражение

$$K_{кон} = C_2 - C_1 \quad (14)$$

где  $C_2$  – количество ошибок испытуемого при самостоятельном вынесении им суждения;

$C_1$  – количество ошибок испытуемого при вынесении им суждения совместно с подставной группой.

Все полученные частные весомости экспертов, приведенные к значениям из интервала  $[0;1]$ , используются в иерархии для получения интегральной оценки качества экспертов.

Также для каждого эксперта составляется вектор его частных весомостей, отражающих частные компетентности экспертов по представленным выше аспектам качества, поэтому есть возможность помимо получения весомостей и отбора экспертов по их интегральной оценке качества (т.е. числу, отражающему «качество, вес» эксперта в долях единицы) подбирать экспертов в зависимости от сочетания их частных показателей качества, которые могут требоваться различные в зависимости от экспертизы и требований, предъявляемых организаторами экспертизы [9].

Рассмотрим пример расчета. Усредненная матрица парных сравнений частных критериев качества экспертов имеет вид:

Таблица 4

Усредненная МПС частных критериев качества экспертов

Table 4

The average pairwise comparison matrix of particular criteria of experts' quality

Оценка качества эксперта	Объективность	Надежность / достоверность метода	Трудоёмкость	Влияние на результат оценивания	Нормированный вектор локальных приоритетов критериев
Объективность	1	1	2	1	0,261627
Надежность / достоверность метода	1	1	4	1/3	0,236406
Трудоёмкость	1/2	0,25	1	1/4	0,092499
Влияние на результат оценивания	1	3	4	1	0,409468

Таким образом, самыми важными характеристиками при оценке важности методов

оценивания качества экспертов являются Влияние на результат оценивания и Объективность.

**Пример расчета частных показателей качества экспертов**

Таблица 5

**Частные показатели качества экспертов**

Table 5

**Private indicators of experts' quality**

ФИО эксперта	Весомости частных показателей качества экспертов									Интегральный показатель качества эксперта	Рейтинг эксперта
	$M_{СЗМ}$	$M_{ЗЗ}$	$M_{ЭПГ}$	$M_{ПГ}$	$M_{ОС}$	$M_{ПД}$	$M_{ЭОСР}$	$M_{ЗЗ}$	$M_{ОБ}$		
Эксперт 1	0,58	0,85	0,78	0,91	0,68	0,93	0,88	0,83	0,77	0,92	1
Эксперт 2	0,69	0,8	0,85	0,89	0,71	0,88	0,81	0,8	0,84	0,9	2
Эксперт 3	0,64	0,75	0,7	0,81	0,78	0,82	0,76	0,76	0,9	0,86	3
Эксперт 4	0,71	0,71	0,8	0,71	0,63	0,77	0,9	0,73	0,88	0,84	4
Эксперт 5	0,53	0,75	0,7	0,84	0,81	0,86	0,8	0,87	0,79	0,82	5
Эксперт 6	0,59	0,7	0,71	0,81	0,74	0,73	0,85	0,69	0,7	0,79	6

**Заключение**

Разработана иерархическая процедура оценки качества привлекаемых экспертов. Процедура включает в себя способ формирования групповых экспертных суждений, включая правило учета весомостей, определяющих качество эксперта, при формировании групповых экспертных суждений, а также способ оценивания частных показателей качества и интегрального уровня качества привлекаемых экспертов. Для оценки эксперта по каждому из частных свойств, составляющих понятие качества эксперта, реализуются соответствующие методики их определения.

**Список литературы**

1. Azgaldov G.G., Kostin A. V. (2012) Increasing the Validity of Results of a National/International Competition: A Case Study / Europe Middle East Africa Members' Meeting, Barcelona (Spain), 26-28 January 2012.
2. Azgaldov G.G., Kostin A. V. (2012) Quality - as the most important object of quantitative analysis / Europe Middle East Africa Members' Meeting, Barcelona (Spain), 26-28 January 2012.
3. Vendrov, A.M., 2008. CASE technologies Modern methods and design tools of information systems. Moscow: Finance and statistics, pp: 176.
4. Saaty, Thomas; Alexander, Joyce (1989). Conflict Resolution: The Analytic Hierarchy Process. New York, New York: Praeger.
5. Putivtseva N.P., Igrunova S.V., Zaytseva T.V., Puspaya O.P., Mamatov R.A., 2012. Software choice for support method of «360 degrees»: International Journal of Advanced Studies. Date Views 08.04.2015 <http://journal-s.org/index.php/ijas/article/view/5/5-7-1-PB.pdf>.

6. Zhilyakov E.G., Putivtseva N.P., Igrunova S.V. The Adaptive Determination Of The Relative Importances Of The Objects On The Basis Of The Qualitive Pair Comparisons. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 3 (2015) pp. 6521-6530 © Research India Publications <http://www.ripublication.com/Volume/ijaerv9n22.htm>

7. Бешелев С.Д., Гурвич Ф.Г. Математико-статистические методы экспертных оценок 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Статистика, 1980. – 263 с.

8. Квалиметрия для всех: Учеб. пособие / Г.Г. Азгальдов, А.В. Костин, В.В. Садовов. — М.: ИнформЗнание, 2012. — 165 с.

9. Путивцева Н.П. Многокритериальный выбор инвестиционных проектов / Путивцева Н.П., Игрунова С.В., Нестерова Е.В., Зайцева Т.В., Пусная О.П. // Verlag: LAP LAMBERT Academic Publishing ist ein Imprint der / OmniScriptum GmbH & Co. KG Heinrich-Bocking-Str. 6-8, 66121 Saarbrucken, Deutschland/ Email: [info@lap-publishing.com](mailto:info@lap-publishing.com)/ ISBN 978-3-659-76552-0. Copyright© 2015 OmniScriptum GmbH & Co. KG Alle Rechte vorbehalten / Все права защищены. Saarbrucken 2015. С. 89.

**References**

1. Azgaldov G.G., Kostin A. V. Increasing the Validity of Results of a National. International Competition: A Case Study. Europe Middle East Africa Members' Meeting, Barcelona (Spain), 26-28 January 2012.
2. Azgaldov G.G., Kostin A. V. Quality – as the most important object of quantitative analysis. Europe Middle East Africa Members' Meeting, Barcelona (Spain), 26-28 January 2012.
3. Vendrov A.M. CASE technologies Modern methods and design tools of information systems. Moscow: Finance and statistics, 2008. Pp: 176.

4. Saaty, Thomas; Alexander, Joyce. Conflict Resolution: The Analytic Hierarchy Process. New York, New York: Praeger. 1989.

5. Putivtseva N.P., Igrunova S.V., Zaytseva T.V., Purnaya O.P., Mamatov R.A., 2012. Software choice for support method of «360 degrees»: International Journal of Advanced Studies. Date Views 08.04.2015 <http://journal-s.org/index.php/ijas/article/view/5/5-7-1-PB.pdf>.

6. Zhilyakov E.G., Putivtseva N.P., Igrunova S.V. The Adaptive Determination Of The Relative Importances Of The Objects On The Basis Of The Qualitative Pair Comparisons. International Journal of Applied Engineering Research ISSN 0973-4562 Volume 10, Number 3 (2015) pp. 6521-6530 © Research India Publications <http://www.ripublication.com/Volume/ijaerv9n22.htm>

7. Beshelev S.D., Gurvich F.G. Mathematical and Statistical Methods of Expert Assessments. 2<sup>nd</sup> edition, rev. and suppl. M.: Statistika, 1980. 263 p.

8. Qualimetry for Everyone: a study manual. Moscow: InformZnanie, 2012. 165 p.

9. Putivtseva N.P. Multicriteria Choice of Investment Projects. Verlag: LAP LAMBERT Academic Publishing ist ein Imprint der. OmniScriptum GmbH & Co. KG Heinrich-Bocking-Str. 6-8, 66121 Saarbrücken, Deutschland/ Email: [info@lap-publishing.com](mailto:info@lap-publishing.com)/ ISBN 978-3-659-76552-0. Copyright© 2015 OmniScriptum GmbH & Co. KG Alle Rechte vorbehalten./ Vse prava zashchishheny. Saarbrücken 2015. P. 89.

## ИНФОРМАЦИОННО-ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATION

УДК 621.391: 004.522

DOI

Васильев Р.А.  
Николаев Д.Б.

**АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ГОЛОСОВОЙ  
ИДЕНТИФИКАЦИИ В СИСТЕМАХ РАЗГРАНИЧЕНИЯ ДОСТУПА К  
ИНФОРМАЦИИ**

- 1) ассистент кафедры математики и информатики. Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова, ул. Минина, д. 31а, г. Нижний Новгород, 603155, Россия. *e-mail: romangamma@mail.ru*  
2) доцент лаборатории «Безопасность информационных и технических систем», кандидат технических наук, доцент Саровский физико-технический институт – филиал ФГАОУ ВПО «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», ул. Духова, д.6, Нижегородская обл., г. Саров, 607186, Россия. *e-mail: dim010307@yandex.ru*

### Аннотация

При учете проблемы повышения надежности систем разграничения доступа предложен новый метод и алгоритм идентификации на основе элементарных речевых единиц. На их основе представлены программная реализация и результаты экспериментальных исследований разработанной информационной системы в задаче идентификации пользователей по голосу при различных условиях и возможность применения в системах разграничения доступа.

**Ключевые слова:** идентификация по голосу; системы разграничения доступа; защита информации от несанкционированного доступа; фонетический анализ речи; элементарные речевые единицы.

Vasiliev R.A.  
Nikolaev D.B.

**ANALYZING THE POSSIBLE USE OF VOICE IDENTIFICATION  
IN THE SYSTEMS OF ACCESS TO INFORMATION**

- 1) Assistant Lecturer, Department of Mathematics and Informatics, Nizhny Novgorod State Linguistic University named after N.A. Dobrolyubov, 31a Minin St., Nizhny Novgorod, 603155, Russia. *e-mail: romangamma@mail.ru*  
2) PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Information and Technical Systems Safety Laboratory, National Research Nuclear University, 6 Dukhov St., Sarov, Nizhny Novgorod Region, 607186, Russia  
*e-mail: dim010307@yandex.ru*

### Abstract

Taking into account the problem of increasing the reliability of access control, the authors propose a new method for the identification algorithm based on elementary speech units. On this basis, the authors presented the software implementation and results of experimental studies of a new information system aimed at solving the problem of user voice identification in various conditions and the possibility of its application in access control systems.

**Keywords:** voice identification systems; access control; information protection against unauthorized access; the phonetic analysis of the speech; the basic units of speech.

### Введение

В последние годы для идентификации личности человека наиболее перспективным считается применение биометрических технологий [1, 2, 3, 4], особенно в системах разграничения доступа, при проведении финансовых операций,

при запросах информации ограниченного доступа по телефону, при управлении различными устройствами, в криминалистике и т.д. Применение биометрических технологий обладает рядом существенных преимуществ перед традиционными средствами идентификации,

например надёжность идентификации и удобство использования [4].

Наиболее широкое применение в биометрической идентификации получили следующие параметры человека: особенности геометрии лица, отпечатки пальца, геометрия ладони рук, сетчатка и радужная оболочка глаза, голосовые характеристики, особенности подписи и клавиатурный подчерк. В некоторых случаях применение биометрических характеристик человека осложнено. Геометрии лица свойственна низкая уникальность, для анализа сетчатки и радужной оболочки глаза требуется дорогостоящее оборудование. Параметрам клавиатурного подчерка и подписи свойственна низкая стабильность и зависимость от эмоционального состояния человека. При применении сканеров отпечатков пальцев и геометрии ладони рук возможны вопросы чистоты контактных площадок и соблюдения санитарных норм.

Свести к минимуму недостатки указанных выше методов биометрической идентификации пользователей позволит разработка нового бесконтактного метода с использованием биометрических характеристик.

К подобному методу биометрической идентификации пользователей информационных систем относится идентификация по голосу, позволяющая получать и передавать в удостоверяющий центр биометрические данные без применения специализированных и дорогостоящих съёмников биометрической информации: достаточно иметь телефон или микрофон, подключенный к компьютеру.

На данный момент распространённым методом при решении задач анализа и идентификации голоса является байесовский подход [6]. В основе принципа данного метода речевые единицы (РЕ) представляются гауссовой моделью сигналов и набором классов. Недостатками данного подхода является невысокая точность и надёжность. Для сведения к минимуму указанных недостатков профессором Савченко В.В. была создана информационная теория восприятия речи (ИТВР) [5], фундаментом которой служит критерий минимума информационных рассогласований (МИР) [6] и кластерная модель речевых единиц. ИТВР можно считать одним из наиболее прогрессивным направлением развития акустической теории звука [7].

На данный момент существует множество зарубежных (Agnitio, Nuance, Voice Security Systems) и отечественных (Речевые технологии, Центр речевых технологий) компаний,

разрабатывающих системы голосовой биометрии [2, 3, 4]. В большинстве разработанных систем вероятность ошибки идентификации составляет 1-3%, но данные разработки обладают рядом недостатков.

В большинстве существующих систем идентификации по голосу отсутствует настройка алгоритмов под изменяющиеся условия применения (уровень шума, фонемы речи конкретного человека, ошибки идентификации и т.д.), для осуществления процедуры идентификации используется спектральный анализ входного звукового сигнала и эталонного сигнала, записанного в базу, тем самым существует привязка к эталонным фразам.

Поэтому актуальной становится задача создания нового метода и алгоритма идентификации голосового сообщения по индивидуальным характеристикам голоса без представленных недостатков, позволяющая производить текстонезависимую идентификацию в условиях малой обучающей выборки, а также создать систему идентификации дикторов по голосу, реализующую данную модель и позволяющей её тестировать.

### **Объекты и методы исследования**

Новизна метода идентификации заключается в кластеризации голосовых эталонов диктора, при этом звуковой сигнал сегментируется на элементарные речевые единицы. Далее все сегменты последовательно сравниваются с порогом по длительности и спектру, и в случае недостаточной длины и несоответствия спектра, текущий сегмент отбрасывается, переходя к следующему сегменту. После отбора таким образом элементарных речевых единиц, они проверяются на соответствие уже существующим в базе данных фреймам путем расчета вероятности информационного рассогласования между самим сегментом и эталонной реализацией фрейма. Элементарные речевые единицы относятся к тому фрейму, где вероятность информационного рассогласования минимальна, при условии, что она не превышает некоторого априорно установленного порога, после этого формируется кластер эталонов диктора. В противном случае формируем новый фрейм, который будет содержать единственный элемент – эту элементарную речевую единицу.

Схема метода кластеризации голосовых эталонов на основе элементарных речевых единиц отображена на рисунке 1.

Разработанный алгоритм идентификации использует в своей основе метод накопления полезной информации по результатам сравнения двух фонетических баз данных: тестируемой и эталонной (точнее, одной из эталонных) на множестве их элементарных речевых единиц. Указанный принцип широко применяется во многих системах при обработке информации на фоне помех, в частности, в радиолокационных системах. Основываясь на данном принципе был разработан новый метод статистического анализа

фона диктора для решения задачи идентификации по голосу.

В радиолокационных системах совокупность участков одной и той же дальности в различных азимутальных позициях зоны обзора составляет кольцо дальности, в котором и происходит накопление импульсных сигналов, что соответствует логике разработанной кластерной модели речевых единиц, где присутствует информационный центр множества реализаций фона диктора и представлено информативное описание свойств речевой единицы.

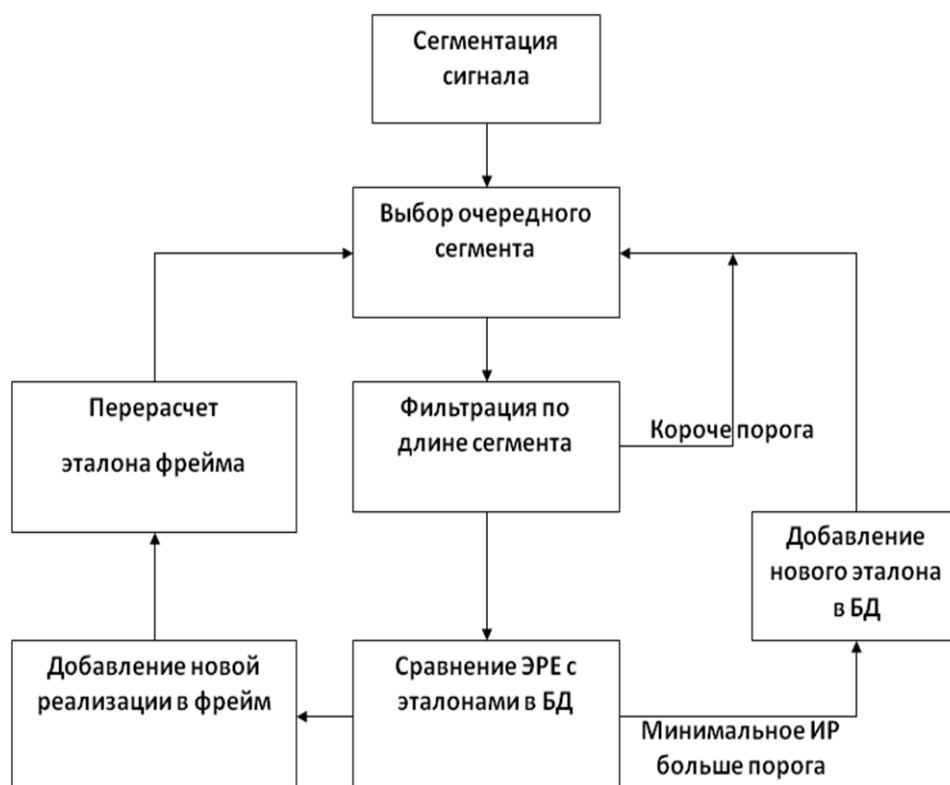


Рис. 1. Схема метода кластеризации голосовых эталонов на основе элементарных речевых единиц

Fig. 1. Diagram of a method of clustering voice standards-based elementary speech units

Следовательно, оптимальное правило обнаружения сигнала по выборке его  $N$  дискретных значений заключается в сравнении числа единиц в выборке с пороговым числом  $k_0$ . Если  $k > k_0$ , то принимается решение о приеме сигнала, в противном случае об его отсутствии, что по логике соответствует принятию решения о принадлежности определяемой фонемы конкретному диктору или о её отвержении.

На основе совместного использования метода кластеризации элементарных речевых единиц и метода накопления информации был разработан новый адаптированный алгоритм идентификации фона диктора.

Блок-схема алгоритма идентификации, реализуемого в среде программирования Matlab, отображена на рисунке 2.

В данной схеме `names` – массив фреймов в базе данных, `tabulate(names)` – алгоритм нахождения наиболее часто встречающегося фрейма, `ii` – переменный индекс фрейма диктора, `namespeaker` – обозначение (ФИО) диктора.

Таким образом разработан и реализован новый усовершенствованный алгоритм идентификации по голосу, основанный на совместном использовании метода кластеризации элементарных речевых единиц и метода накопления информации.

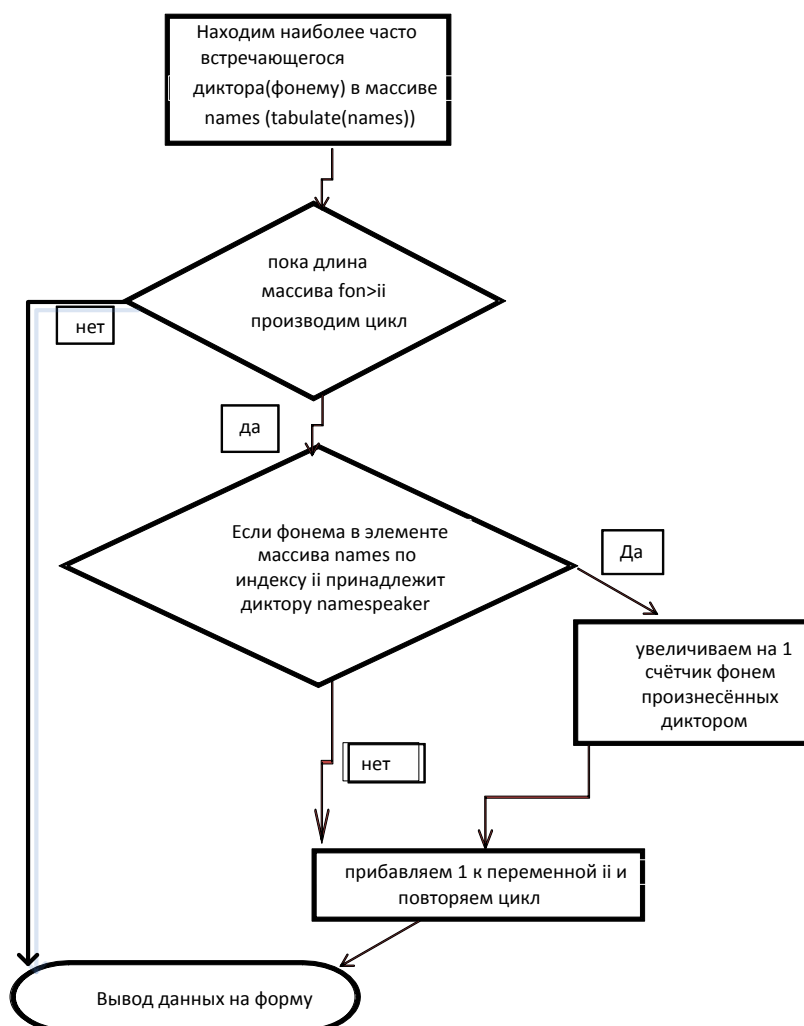


Рис. 2. Блок-схема алгоритма идентификации диктора по голосу

Fig. 2. Block diagram of a voice-based speaker identification

На рисунке 3 изображена блок-схема «информационной системы идентификации дикторов по голосу».

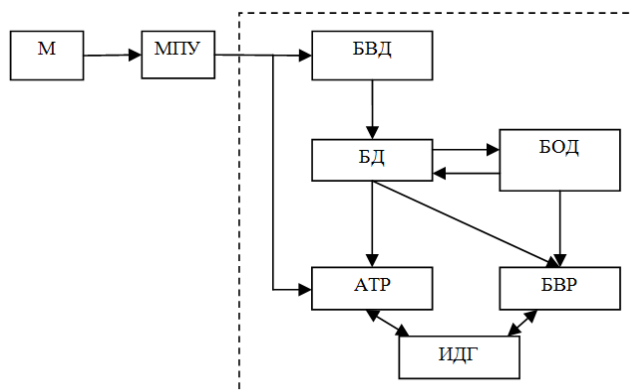


Рис. 3. Блок-схема «информационной системы идентификации дикторов по голосу»

Fig. 3. Block diagram of the «information system of a voice-based speaker identification»

Здесь М–микрофон, БВР – блок вывода результатов, БД – база данных, БОД – блок обработки данных, МПУ – микрофонный предусилитель, БВД – блок ввода данных, АТР – подсистема автоматического транскрибирования речевых сигналов, ИДГ – подсистема идентификации дикторов по голосу.

#### Результаты и их обсуждение

Для реализации предложенного алгоритма идентификации был разработан лабораторный образец «ИС ИДГ» [14]. Данная система представляет собой программный комплекс с расширенным функционалом для идентификации дикторов. Варианты применения данной информационной системы можно привести из самых различных областей. Это может быть, например, задача идентификации диктора по голосу, как для отдельного диктора, так и для группы дикторов, в зависимости от возраста, пола, национальности, эмоционального состояния. В качестве прикладной задачи можно привести удаленную идентификацию диктора при передаче речевого сигнала по каналам связи при низком качестве речи и высоком уровне помех.

При разработке «ИС ИДГ» были учтены требования ГОСТ Р 52633-2006 «Защита информации. Техника защиты информации. Требования к средствам высоконадежной биометрической идентификации» и ГОСТ Р ИСО/МЭК 19785-1-2008 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Единая структура форматов обмена биометрическими данными». Для работы необходим персональный компьютер с процессором класса не ниже 2000 МГц и 1Гб оперативной памяти, операционная система Windows, среда программирования Matlab, а также звуковая карта с частотой дискретизации 8 КГц и возможностью записи звуковых файлов в формате WAV.

Интерфейс «ИС ИДГ» состоит из главной формы, в которой отображаются дикторы, внесенные в базу данных. В данном меню возможен выбор режим работы, загрузка звукового файла, сохранение и последующее отображения данных. Общий вид интерфейса показан на рисунке 4.

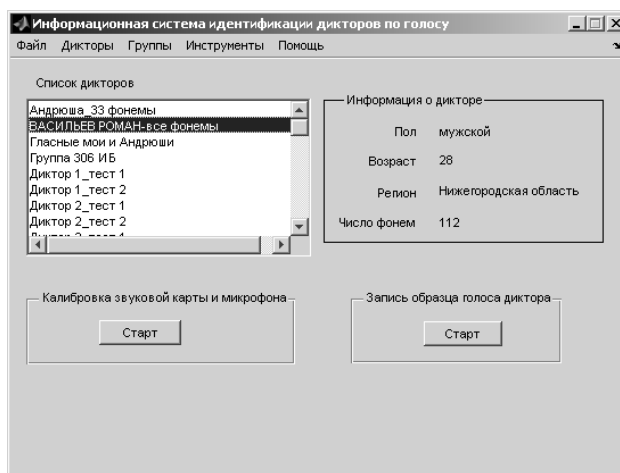


Рис. 4. Интерфейс «информационной системы идентификации дикторов по голосу»

Fig. 4. Interface of the «information system of a voice-based speaker identification»

В представленном окне информационной системы отображаются дикторы, внесенные в базу данных. При выборе диктора из списка отображается краткая информация данного человека.

На рисунке 5 изображен главный раздел информационной системы, в котором осуществляется последовательное сегментирование звукового сигнала, выделение фонем диктора и его последующая идентификация.

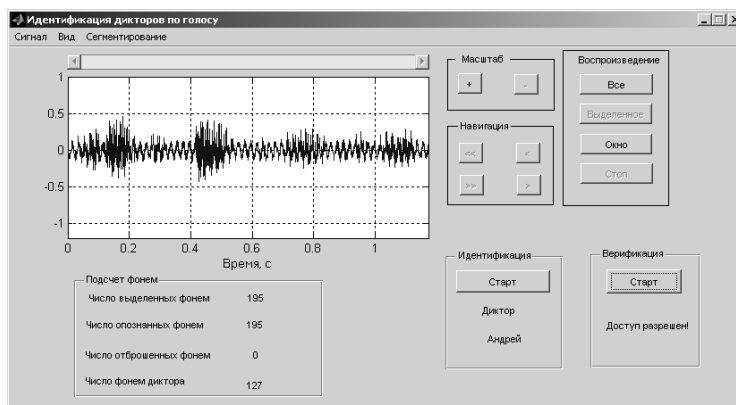


Рис. 5. Интерфейс раздела «Идентификация»

Fig. 5. Interface section «Identification»

Для ввода звукового файла исследуемого диктора выбирается меню "Сигнал" -> "Загрузить". Загруженный звуковой файл неизвестного нам диктора отображается в виде звуковой дорожки. Далее звуковой файл разбивается на определенное количество фреймов, для этого необходимо в меню «Сегментирование» выбрать «Старт».

После того как звуковой файл разбит на фреймы, нам необходимо установить принадлежность записанного в данном файле голоса тому или иному диктору. Для этого в меню «Идентификация» нажимаем кнопку «Старт», при этом происходит подсчет всех фреймов и по наиболее часто повторяющимся (не менее 60%), названным в соответствии с именем диктора, принимается решение о принадлежности данного голоса конкретному диктору. Фреймы заведомо неизвестного диктора сравниваются с фреймами

различных дикторов, занесенных в фонетическую базу данных.

Тестирование «ИС ИДГ» проводилось в соответствии с правилами тестирования систем идентификации, установленными в стандарте ИСО/МЭК 19795-1-2007 «Автоматическая идентификация. Идентификация биометрическая. Эксплуатационные испытания и протоколы испытаний в биометрии. Часть 1. Принципы и структура». В соответствии с данным стандартом необходимо проводить испытания в зависимости от возрастных, гендерных, физиологических, эмоциональных состояний испытуемой группы.

Программа экспериментальных испытаний информационной системы идентификации дикторов по голосу, проведенных в соответствии с описанной выше схемой, приведена в таблице 1 [8-13].

Таблица 1

Table 1

**Программа экспериментальных испытаний информационной системы идентификации дикторов по голосу**

**The program of experimental tests of the information system of a voice-based speaker identification**

№	Название эксперимента	Программа и методики исследований
№1	Выявление различия фонем дикторов для процедуры идентификации	Записаны отдельные фонемы 10 дикторов, произведен анализ и сегментация фонем, произведена идентификация фонем конкретного диктора из общей базы фонем
№2	Выявление различия в произношении дикторов для проведения процедуры идентификации по отдельным фразам	Записаны слова с ярко выраженными фонемами 10 дикторов, произведен анализ и сегментация слов, произведена идентификация конкретного диктора из общей базы записанных контрольных фраз
№3	Проведения текстонезависимой идентификации дикторов по непрерывной речи	Записаны 10 дикторов в режиме непрерывного монолога, создана общая база речи дикторов, произведена идентификация диктора по записанной в режиме онлайн слитной русской речи (предложения, записанные в базу, отличаются от произносимых онлайн)
№4	Определение национальности диктора при проведении процедуры идентификации	Записаны 10 дикторов разной национальности, при записи дикторы говорили в режиме монолога на своем родном языке (немецкий, азербайджанский, английский, арабский, испанский, итальянский, китайский, французский, чешский, русский), создана база дикторов, произведена процедура идентификации, выявлены отличия фонем дикторов разных национальностей.

№5	Определение влияния физического и эмоционального состояния дикторов на процесс идентификации	Записаны 4 диктора в режиме монолога, 1-я запись проведена в устойчивом состоянии, 2-я запись проводилась после физ. нагрузки и в состоянии стресса, создана база фонем дикторов, при идентификации выявлено отличие фонем дикторов в зависимости от эмоционального состояния
№6	Исследование вероятности правильной идентификации при использовании технологий клонирования и пародирования речи (voice changing) для модификации «подделки» голоса диктора.	Записано 5 фонограмм известных дикторов в режиме монолога, 1-я запись проведена на обычный микрофон без применения сторонних программ, 2-я запись проводилась с привлечением «пародистов» голоса и применением специализированных программ клонирования голоса Morphvox и Voice changer, произведена попытка модификации голоса первого диктора для «подделки» голоса второго диктора, создана база фонем дикторов, при идентификации выявлено отличие фонем дикторов в зависимости от «живого» и «подделанного» голоса, процент распознанных фонем позволяет определить реального диктора от его клона

Таким образом, стандарт ИСО/МЭК 19795-1 был адаптирован под испытания систем идентификации человека по речевому сигналу.

Так же по результатам эксперимента сделан вывод, что при увеличении числа идентифицируемых дикторов качество идентификации не снижается, в связи с чем в разработанной информационной системе нет явного ограничения на количество пользователей.

Представленные выше эксперименты проведены в разработанной «ИС ИДГ» и в аналогичных программно-аппаратных и

программных комплексах идентификации по голосу российских производителей, среди которых система «VoiceKey» – ООО «Центр речевых технологий», система «ИКАР Лаб» – ООО «Центр речевых технологий», GritTec Speaker-ID – ООО «ГритТек».

В таблице 2 представлено сравнение показателей программно-аппаратных комплексов идентификации по голосу российских производителей.

Таблица 2

**Сравнение показателей программно-аппаратных комплексов идентификации по голосу российских производителей**

Table 2

**Comparison of software and hardware systems of voice-based identification produced by Russian manufacturers**

Система идентификации	«ИКАР Лаб»	«ИС ИДГ»	«Voice Key»	«GTS-ID»
Параметры проверки системы				
EER (Equal Error Rate) - вероятность ошибок биометрической системы доступа, при котором FAR и FRR равны	1.1-2.6%	1.1 - 2.86%	2–3.3%	4.1%
Отказ в регистрации	1%	2%	4%	~0%
FAR (False Acceptance Rate) – вероятность ложного принятия. Вероятность принятия «чужого» диктора за «своего» (ошибка второго рода)	1,2%	0.5%	2.5%	4%
FRR (False Rejection Rate) – вероятность ложного отклонения. Вероятность отклонения «своего» диктора, приняв его за «чужого» (ошибка первого рода)	0.001%	0.25%	0.1%	0.4%
Стоимость системы	Очень высокая	Низкая	Высокая	Высокая

Проведя анализ полученных результатов, можно сделать вывод, что разработанная в рамках диссертационных исследований «ИС ИДГ» имеет ряд преимуществ над системами аналогами, показав низкую вероятность ошибок при равных значениях FAR и FRR, небольшой процент

ошибок при регистрации, низкую вероятность ложного принятия (FAR), но при этом «ИС ИДГ» уступает аналогам по показателям вероятности ложного отклонения (FRR). Алгоритмы идентификации «ИС ИДГ» возможно внедрить в существующие системы для разграничения прав

доступа к корпоративным ресурсам в сети и в телефонном канале в режиме реального времени.

«ИС ИДГ» может выступать самостоятельно или дополнять имеющиеся системы разграничения доступа. Использование сервиса позволяет исключить случаи несанкционированного доступа к ресурсам, возникающие в случае утери, кражи, передачи обычного символьного пароля (вводимого с клавиатуры компьютера), HID (Proximity) RFID карты, hasp-ключа и т.д., в отличие от голоса, который всегда остается у пользователя системы.

Алгоритм разграничения доступа предусматривает наличие нескольких этапов работы информационной системы. На 1-м этапе происходит запись эталонного голоса диктора, а на 2-м - сравнение произнесенного голоса с эталоном. В стандартных алгоритмах идентификации существует следующий недостаток: нарушитель может записать на диктофон эталонное голосовое сообщение, а далее получить доступ воспроизведя данную запись. Для исключения данного недостатка предлагается следующий алгоритм работы системы разграничения доступа, рисунок 6.



Рис. 6. Алгоритм работы системы разграничения доступа по голосу  
Fig. 6. Algorithm of the system of voice verification access control

На 1-м этапе записываются не связанные между собой короткие голосовые сообщения в виде отдельных слов (существительное, глагол, прилагательное, например, «мама мыла раму»). В алгоритме под цифрой 1 обозначен микрофон, 2 – канал связи, 3 – аналого-цифровой преобразователь, 4 – запоминающее устройство. На 2-м этапе информационная система выбирает несколько записанных диктором звуковых сообщений и предоставляет диктору возможность в выбранном порядке произнести данные слова с указанием текста в окне системы. Диктор произносит данные слова для последующего анализа в устройстве анализа данных – 5. Далее устройство идентификации – 6, выполняет процедуру анализа и подсчета повторяющихся фонем диктора, выполняет проверку содержания распознанных фонем в соответствии с произнесенным словом. При наибольшем соответствии фонем определенному диктору (не менее 60%) и совпадении произнесенных слов со словами в окне системы, принимается решение о предоставлении доступа пользователю.

Далее оценим эффективность предложенной схемы идентификации. Пусть при записи фонем используется  $N$  фраз. При идентификации голос диктора формируется из  $n$  эталонов. Тогда количество фонем диктора  $K$  будет равно:

$$K = N^n \quad (1)$$

Если нарушитель записал произношение диктора, то при попытке взлома, вероятность  $P$  того, что записанное им сообщение совпадёт с запрашиваемым системой идентификации будет равна:

$$P = \frac{1}{N^n} \quad (2)$$

Ниже приведена таблица 3 вероятностей  $P$ , рассчитанных в соответствии с формулой (2) для значений  $N$  и  $n$ . По горизонтали расположены значения  $N$ , а по вертикали –  $n$ , на пересечении столбца и строки – соответствующая им вероятность  $P$ .

Таблица 3

Вероятности  $P$ , рассчитанные для некоторых значений  $N$  и  $n$

Table 3

The probabilities of  $P$  calculated for certain values of  $N$  and  $n$

n\N	5	10	15	20	25
1	0,2	0,1	0,07	0,05	0,04
2	0,04	0,01	0,004	$0,25 \times 10^{-2}$	$0,16 \times 10^{-2}$
3	0,008	$0,1 \times 10^{-2}$	0,0003	$0,125 \times 10^{-3}$	$0,64 \times 10^{-4}$
4	0,0016	$0,1 \times 10^{-3}$	$1,98 \times 10^{-5}$	$6,25 \times 10^{-6}$	$0,256 \times 10^{-5}$
5	0,00032	$0,1 \times 10^{-4}$	$1,3169 \times 10^{-6}$	$3,125 \times 10^{-7}$	$0,1024 \times 10^{-6}$

Как видно из таблицы, вероятность  $P$  мала, поэтому вероятность взлома системы, даже, если нарушителю удалось подслушать и записать произношение фразы, также мала.

## Заключение

Новизна и инновационность разработанного метода идентификации по голосу заключается в независимости от языка, национальности, возраста, пола, эмоционального состояния и здоровья диктора. Для идентификации требуется парольная фраза длиной всего 3-5 секунд, что позволяет существенно экономить время при прохождении этой процедуры и полностью ее автоматизировать. Динамически меняющаяся парольная фраза, которую предлагают произнести пользователю (например, определенную последовательность цифр) позволяет надежностью систем разграничения доступа и защиты информации.

Полученные результаты применимы как в системах защиты информации от несанкционированного доступа [15], использующие параметры голоса для идентификации пользователей, так и в системах разграничения доступа в помещения с голосовой идентификацией. Разработанный алгоритм идентификации так же можно применять в системах криминалистической (фонетической) экспертизы, использующих в качестве доказательной базы голос подозреваемого.

## Список литературы

1. Аграновский А.В., Леднов Д.А., Репалов С.А. Метод текстонезависимой идентификации диктора на основе индивидуальности произношения гласных звуков // Акустика и прикладная лингвистика: Ежегодник РАО. Вып. 3. - М.: 2002. С. 103-115.
2. Центр речевых технологий [Электронный ресурс]: официальный сайт компании «Центр речевых технологий». URL: <http://www.speechpro.ru> (дата обращения: 23.10.2015).
3. Agnitio — Voice Biometrics [Электронный ресурс]: официальный сайт компании «Agnitio». URL: <http://www.agnitio.es> (дата обращения: 29.10.2015).
4. Nuance — The Leading Supplier of Speech Recognition, Imaging, PDF and OCR Solutions [Электронный ресурс]: официальный сайт компании «Nuance». URL: <http://www.nuance.com> (дата обращения: 21.10.2015).
5. Савченко В.В. Информационная теория восприятия речи // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2007. Вып.6. С. 10-14.
6. Кульбак С. Теория информации и статистика. М.: Наука, 1967. 408 с.
7. Савченко В.В., Акатьев Д.Ю. Автотестирование качества произношения речи по принципу минимального информационного рассогласования // Сборник научных трудов «Современные тенденции компьютеризации процесса изучения иностранных языков». Луганск: Восточно-

украинский национальный университет. 2005. Вып.3. С. 205-206.

8. Васильев Р.А. Исследование особенностей фонетического строя речи и текстонезависимая идентификация дикторов по непрерывной речи // Информационная безопасность регионов. 2012. № 2 (11). С. 57-63.

9. Vasiliev R.A. Research of a phonetic system of the speech and identification of announcers on a voice//Questions of information security. 2013. No. 1 (100). Pp. 43-51.

10. Васильев Р.А. Исследование особенностей фонетического строя речи и определение национальности диктора при проведении процедуры идентификации по голосу // Информация и безопасность. 2012. Т. 15. № 4. С. 487-494.

11. Васильев Р.А. Исследование особенностей идентификации дикторов по голосу при использовании технологий клонирования и пародирования речи для модификации голоса диктора// Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2013. № 3. С. 246-252.

12. Васильев Р.А. Исследование особенностей идентификации дикторов по голосу при различиях в произношении дикторов// Безопасность информационных технологий. 2013. № 1. С. 85-86.

13. Савченко В.В., Васильев Р.А. Анализ эмоционального состояния диктора по голосу на основе фонетического детектора лжи // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2014. Вып. № 21 (192) 32/1. С 186-195.

14. Васильев Р.А. 2015. Программа идентификации дикторов по голосу. Программа для ЭВМ. Свидетельство РФ №2015663306.

15. Николаев Д.Б., Мартынов А.П., Фомченко В.Н., Технические средства и методы обеспечения безопасности информации // ФГУП "Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский науч.-исслед. ин-т экспериментальной физики". - Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2015. - 393 с.

## References

1. Agranovsky A.B., Lednov D.A., Repalov S.A. The Method of Text-independent Identification of the Speaker on the Basis of Individual Features of the Pronunciation of Vowels. Acoustics and Applied Linguistics: Year-book of Russian Joint Stock Company. Vyp. 3. Moscow: 2002. Pp. 103-115.
2. Center of Speech Technologies [Electronic resource]: official site of the Center of Speech Technologies company. URL: <http://www.speechpro.ru> (date of access: October 23, 2015)
3. Agnitio – Voice Biometrics [Electronic resource]: official site of the Agnitio company. URL: <http://www.agnitio.es> (date of access: October 29, 2015).
4. Nuance – The Leading Supplier of Speech Recognition, Imaging, PDF and OCR Solutions [Electronic resource]: official site of the Agnitio «Nuance»

company. URL: <http://www.nuance.com> (date of access: October 21, 2015).

5. Savchenko V.B. Information Theory of Perception of the Speech//News of Higher Education Institutions. Radio Electronics. 2007. Vyp.6. Pp. 10-14.

6. Kulbak S. Theory of Information and Statistics. Moscow: Nauka, 1967. 408 p.

7. Savchenko V.V., Akatyev D.Yu. Autotesting of Quality of Pronunciation of the Speech by the Principle of the Minimum Information Mismatch. Collection of Scientific Works "Current Trends of Computerization of the Process of Learning Foreign Languages". Luhansk: East Ukrainian National University. 2005. Vyp.3. Pp. 205-206.

8. Vasilyev R.A. Research of Features of the Phonetic Speech System and Text-independent Identification of speakers Based on the continuous speech. Information Security of Regions. 2012. No. 2 (11). Pp. 57-63.

9. Vasilyev R.A. Research of a phonetic system of the speech and identification of announcers on a voice. Questions of information security. 2013. No. 1 (100). Pp. 43-51.

10. Vasilyev R.A. Research of Features of the Phonetic Speech System and Identification of the Nationality of the Speaker when Carrying out the Voice Identification Procedure. Information and safety. 2012. Vol. 15. No. 4. Pp. 487-494.

11. Vasilyev R.A. Research of Features of the Voice-based Identification of Speakers when Using Technologies of Cloning and Parodying the Speech for Modification of a Voice of the Speaker. News of Tula State University. Technical science. 2013. No. 3. Pp. 246-252.

12. Vasilyev R.A. Research of Features of the Voice-based Identification of Speakers in Differences in the Pronunciation of Speakers. Safety of Information Technologies. 2013. No. 1. Pp. 85-86.

13. Savchenko V.V., Vasilyev R.A. The Analysis of an Emotional Condition of the Speaker by Voice on the Basis of the Phonetic Lie Detector. Scientific Sheets of Belgorod State University. 2014. Vyp. No. 21 (192) 32/1. Pp. 186-195.

14. Vasilyev R.A. 2015. The Program of the Voice-based Identification of Speakers. Computer Program. Certificate of the Russian Federation No. 2015663306

15. Nikolaev D.B., Martynov A.P., Fomchenko V.N., Technical Means and Methods of Safety of Information. Federal State Unitary Enterprise The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Nauch. – Issled. In-t of Experimental Physics. Sarov: RFYaTs-VNIIEF, 2015. 393 p.

УДК 621.397

DOI

**Жиляков Е.Г.  
Черноморец А. А.  
Болгова Е.В.  
Голощাপова В.А.**

**О МЕТОДЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СУБПОЛОСНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ**

- 1) заведующий кафедрой информационно-телекоммуникационных систем и технологий, доктор технических наук, профессор. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия. *e-mail: Zhilyakov@bsu.edu.ru*
- 2) профессор кафедры прикладной информатики и информационных технологий, кандидат технических наук, доцент Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия. *e-mail: Chernomorets@bsu.edu.ru*
- 3) аспирант кафедры прикладной информатики и информационных технологий. Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия. *e-mail: Bolgova\_e@bsu.edu.ru*
- 4) старший преподаватель кафедры информационно-телекоммуникационных систем и технологий Белгородский государственный национальный исследовательский университет, ул. Победы д.85, г. Белгород, 308015, Россия. *e-mail: vgososchapova@bsu.edu.ru*

**Аннотация**

В данной работе изложены результаты экспериментальных исследований эффективности применения метода оптимальной субполосной фильтрации, обеспечивающего минимальный уровень просачивания энергии за пределы выбранной для фильтрации подобласти пространственных частот.

В ходе экспериментов показано, что энергия входного изображения, сосредоточенная вне выбранной подобласти пространственных частот, влияет на выходную частотных фильтров, основанных на применении ДПФ, в значительно большей степени, чем на результат, полученный на основании метода оптимальной фильтрации. Данное влияние проявляется как на графиках значений соответствующих трансформант Фурье, так и на изображениях, полученных в результате фильтрации.

**Ключевые слова:** изображение; оптимальная фильтрация; трансформанта Фурье; подобласть пространственных частот.

**Zhilyakov E.G.  
Chernomorets A.A.  
Bolgova E.V.  
Goloschapova V.A.**

**ON THE METHOD OF OPTIMAL SUBBAND FILTRATION**

- 1) Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia  
*e-mail: Zhilyakov@bsu.edu.ru*
- 2) Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Department of Applied Informatics and Information Technologies, Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia  
*e-mail: Chernomorets@bsu.edu.ru*
- 3) Postgraduate Student. Department of Applied Informatics and Information Technologies. Belgorod State National Research University, 85 Pobedy St., Belgorod, 308015, Russia. *e-mail: Bolgova\_e@bsu.edu.ru*
- 4) Senior Lecturer. Department of Information and Telecommunication Systems and Technologies Belgorod State National Research University, 85 Pobeda St., Belgorod, 308015, Russia. *e-mail: vgososchapova@bsu.edu.ru*

**Abstract**

The paper presents the results of experimental studies of the effectiveness of the optimal subband method. This method allows to achieve the minimal level of energy leakage out of the subdomain of spatial frequencies selected for filtration.

The experiments show that the energy of the input image, being out of the selected subdomain of spatial frequencies, affects in a greater degree the output sequence of frequency filters based on DFT than the results based on the optimal filtration method. This influence is evident both on the graphs of corresponding Fourier transforms, and on the images obtained as a result of filtering.

**Keywords:** image; optimal filtration; Furie transform; subdomain of spatial frequencies.

### Введение

Одно из направлений интенсивного развития современных информационно-телекоммуникационных систем определяется тенденцией использования наиболее естественных для человека форм информационного обмена, и, прежде всего, в виде визуальных данных. Обработка изображений является важной задачей. Существующие в настоящее время методы выделения (фильтрации) значимых характеристик отдельных компонент изображения, некоторых периодических структур изображений не являются оптимальными с точки зрения аппроксимации трансформант Фурье в заданной подобласти пространственных частот (ППЧ), в которых осуществляется фильтрации. Поэтому актуальной проблемой является создание математических моделей и методов фильтрации, позволяющих адекватно учитывать энергетические характеристики изображений в выбранной подобласти пространственных частот. В работе [1] разработан и теоретически обоснован новый метод оптимальной линейной фильтрации изображений на основе частотных представлений, который является оптимальным в том смысле, что спектр получаемого в результате фильтрации изображения имеет наименьшее среднеквадратическое отклонение от спектра фильтруемого изображения в заданной двумерной подобласти пространственных частот, а вне этой подобласти пространственных частот имеет наименьшее отклонение от нуля. В работе представлены результаты экспериментальных исследований эффективности метода оптимальной фильтрации изображений на основе частотных представлений в заданной подобласти пространственных частот на примере модельных изображений.

**Теоретические основы метода оптимальной фильтрации изображений на основе частотных представлений**

О частотных представлениях при обработке изображений [2] можно говорить, поскольку изображение, как функция с конечной или

неограниченной областью определения, может быть представлено в виде суммы синусов и косинусов различных частот, умноженных на некоторые весовые коэффициенты

$$f_{ik} = \frac{1}{4\pi^2} \sum_{u=1}^M \sum_{v=1}^N F(u, v) e^{ju(i-1)} e^{jv(k-1)}, \quad i = 1, 2, \dots, M, \quad k = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где  $F(u, v)$  – значение трансформанты Фурье функции

$$F(u, v) = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^N f_{ik} e^{-ju(i-1)} e^{-jv(k-1)}, \quad u = 1, 2, \dots, M, \quad v = 1, 2, \dots, N. \quad (2)$$

Метод оптимальной фильтрации изображений на основе частотных представлений [1,3] позволяет для нахождения результатов  $Y_\Omega$  фильтрации изображения  $\Phi=(f_{ik}), i=1,2,\dots,M, k=1,2,\dots,N$ , в частотной двумерной области  $\Omega$  построить вычислительную процедуру, не вычисляя при этом трансформанту Фурье. Для фильтрации изображений предложено использовать следующий вариационный принцип: трансформанта Фурье  $Z(u,v)$  результата фильтрации  $Y_\Omega$ , является оптимальной в смысле евклидовой нормы ее отклонения в заданной подобласти пространственных частот  $\Omega$  от трансформанты Фурье  $F(u,v)$  исходного изображения  $\Phi$  и от нуля – вне данной ППЧ, т.е.

$$\iint_{(u,v) \in \Omega} |F(u, v) - Z(u, v)|^2 dudv + \iint_{(u,v) \notin \Omega} |Z(u, v)|^2 dudv \Rightarrow \min. \quad (3)$$

Указанному вариационному принципу соответствует следующее изображение  $Y_\Omega$

$$Y_\Omega = A^T \cdot \Phi \cdot B, \quad (4)$$

где матрицы  $A=(a_{i_1 i_2}), i_1, i_2=1, 2, \dots, M$ , и  $B=(b_{k_1 k_2}), k_1, k_2=1, 2, \dots, N$  (субполосные матрицы [2]), определяются соотношениями

$$a_{i_1 i_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\alpha_2(i_1 - i_2)) - \sin(\alpha_1(i_1 - i_2))}{\pi(i_1 - i_2)}, & i_1 \neq i_2, \\ \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\pi}, & i_1 = i_2, \end{cases} \quad b_{k_1 k_2} = \begin{cases} \frac{\sin(\beta_2(k_1 - k_2)) - \sin(\beta_1(k_1 - k_2))}{\pi(k_1 - k_2)}, & k_1 \neq k_2, \\ \frac{\beta_2 - \beta_1}{\pi}, & k_1 = k_2. \end{cases} \quad (5)$$

Значения

$$0 \leq \alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2 \leq \pi \quad (6)$$

задают границы подобласти пространственных частот  $\Omega$ .

Важным свойством определенного таким образом результата фильтрации является то, что указанный метод не допускает растекания энергии двумерного сигнала за пределы заданной частотной области.

**Концептуальные основы экспериментальных исследований**

В ходе вычислительных экспериментов проводился сравнительный анализ оценки доли энергии изображения  $Y_{Opt}$ , полученного в результате оптимальной фильтрации,

$$\delta_{\Omega Opt} = \frac{\|Y_{Opt}\|^2 - P_{\Omega}(Y_{Opt})}{\|Y_{Opt}\|^2} = 1 - \frac{P_{\Omega}(Y_{Opt})}{\|Y_{Opt}\|^2}, \quad (7)$$

где  $\|Y_{Opt}\|^2$  – энергия изображения  $Y_{Opt}$  в области определения трансформанты Фурье,

$P_{\Omega}(Y_{Opt})$  – доля энергии изображения  $Y_{Opt}$  в подобласти пространственных частот  $\Omega$ , определяемая на основании соотношения

$$P_{\Omega}(Y_{Opt}) = \text{tr}(A_{\Omega}^T Y_{Opt} B_{\Omega} Y_{Opt}^T). \quad (8)$$

с соответствующими характеристиками изображений, полученных при реализации известных частотных фильтров [4]:

– идеальный фильтр (результат фильтрации  $Y_{Ideal}$ ),

$$H_{Ideal}(u, v) = \begin{cases} 1, & u \in [-\pi, \pi], \quad v \in [-\beta_2, -\beta_1] \cup [\beta_1, \beta_2] \\ 0, & \text{в противном случае.} \end{cases} \quad (9)$$

– фильтр Баттерворта порядка  $n=2$  (результат фильтрации  $Y_{Butterw}$ ),

$$H_{Butterw}(u, v) = \frac{1}{1 + \left(\frac{D_1(u, v)}{D_0}\right)^{2n} + \left(\frac{D_2(u, v)}{D_0}\right)^{2n}}, \quad (10)$$

где  $D_0$  – частота среза,  $D_1(u, v)$ ,  $D_2(u, v)$  – расстояние между точкой  $(u, v)$  и осями симметрии  $l_1, l_2$  фильтра,

– Гауссов фильтр (результат фильтрации

$Y_{Gaussian}$ ),

$$H_{Gaussian}(u, v) = \exp\left(-\frac{D_1^2(u, v)}{2D_0^2}\right) + \exp\left(-\frac{D_2^2(u, v)}{2D_0^2}\right), \quad (11)$$

где  $D_0$  – частота среза,  $D_1(u, v)$ ,  $D_2(u, v)$  – расстояния между точкой  $(u, v)$  и осями симметрии  $l_1, l_2$  фильтра.

Построение фильтров осуществлено на основании параметров подобласти пространственных частот, в которой выполнялась оптимальная фильтрация [5,6].

Соответствующие оценки доли энергии результатов фильтрации (изображения  $Y_{Ideal}$ ,  $Y_{Butterw}$ ,  $Y_{Gaussian}$ ), которая сосредоточена вне выбранной подобласти пространственных частот  $\Omega$ , имеют следующий вид

$$\delta_{\Omega Ideal} = 1 - \frac{P_{\Omega}(Y_{Ideal})}{\|Y_{Ideal}\|^2}, \quad (12)$$

$$\delta_{\Omega Butterw} = 1 - \frac{P_{\Omega}(Y_{Butterw})}{\|Y_{Butterw}\|^2}, \quad (13)$$

$$\delta_{\Omega Gaussian} = 1 - \frac{P_{\Omega}(Y_{Gaussian})}{\|Y_{Gaussian}\|^2}. \quad (14)$$

Отметим, что вычисления как относительной доли «просачивания» энергии за пределы подобласти пространственных частот оказались доступными, благодаря разработанному в [1] методу вычисления долей энергии (8).

Для получения большей наглядности при оценивании различий оптимальной фильтрации и фильтрации с помощью известных фильтров представляется естественным построить графики соответствующих характеристик выходных последовательностей фильтров.

Сравнительный анализ в работе выполнен, исследуя параметры фильтров и результаты их применения в различных подобластях двумерной области (подобласти получены при фиксированных значениях одной из независимых переменных частотного пространства). Однако, данный факт не снижает важности полученных результатов в виду известного свойства преобразования Фурье (преобразование Фурье

можно записать так, что переменные в нем оказываются разделенными).

**Результаты вычислительных экспериментов**

Экспериментальные исследования целесообразно осуществлять на основе обработки

$$f_{ik} = a_1 \sin(2\pi f_1 k) + a_2 \sin(2\pi f_2 k) + a_3 \sin(2\pi f_3 k) + a_4 \sin(2\pi f_4 k) + a_5 \sin(2\pi f_5 k), \quad (15)$$

$$i = 1, 2, \dots, 512, \quad k = 1, 2, \dots, 512,$$

где

$$f_1 = 0.0193; \quad f_2 = 0.0208; \quad f_3 = 0.0279, \quad f_4 = 0.0295, \quad f_5 = 0.0311,$$

$$a_1 = 3.2; \quad a_2 = 2.9; \quad a_3 = 3.5, \quad a_4 = 2.1, \quad a_5 = 2.2.$$

Такие значения частот позволяют осуществить исследование различных аспектов фильтрации и, прежде всего, влияния энергии исходного сигнала за пределами подобласти пространственных частот на ее результаты.

Фильтрация модельного сигнала (15) на основании метода оптимальной фильтрации изображений на основе частотных представлений

модельных сигналов. Генерирование значений модельного изображения (рис. 1)  $\Phi = (f_{ik})$ ,  $i = 1, 2, \dots, 512$ ,  $k = 1, 2, \dots, 512$ , размерностью 512x512 пикселей, осуществляется на основе соотношения

осуществлялась в следующей подобласти пространственных частот:

$$\Omega_i: \{ \alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = \pi, \quad \beta_1 = \beta_{01} + \Delta\beta(i-1), \quad \beta_2 = \beta_{02} + \Delta\beta(i-1) \}, \quad (16)$$

$$i = 1, 2, \dots, 15,$$

где  $\Delta\beta$  – величина смещения границ очередной ППЧ.

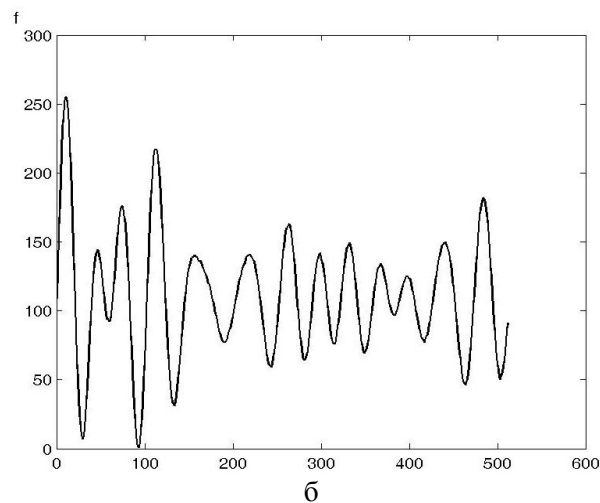
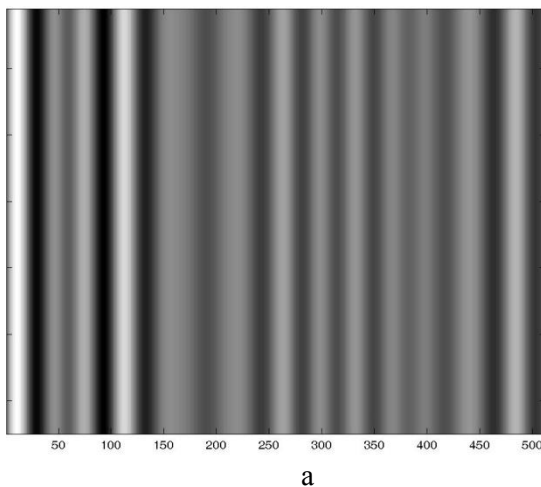


Рис. 1. Модельное изображение: а – в виде изображения, б – профиль

Fig. 1. Model image: a – in the form of images, b – profile

В ходе экспериментов были использованы следующие значения границ подобласти пространственных частот

$$\beta_{01} = 0.035\pi, \quad \beta_{02} = 0.04\pi, \quad \Delta\beta = 0.0025\pi. \quad (17)$$

В таблице представлены значения долей энергии выходных последовательностей оптимального и других анализируемых фильтров, находящихся вне заданной подобласти пространственных частот, вычисленные согласно (7), (12)-(14).

Как показано в ходе экспериментов выходная последовательность оптимального фильтра

определяется только трансформантой Фурье в выбранной подобласти пространственных частот. В отличие от этого, на выходную последовательность идеального, Гауссова фильтров и фильтра Баттерворта влияет энергия входного изображения, сосредоточенная вне выбранной подобласти пространственных частот. Это различие легко обнаружить на рис. 2, на котором представлены абсолютные значения трансформант Фурье выходных последовательностей оптимального и других фильтров.

Таблица 1

Оценка долей энергии результатов фильтрации вне подобласти пространственных частот  $\Omega$

Table 1

Estimation of the energy share of filtered results outside the subdomain of spatial frequencies  $\Omega$

№	Границы ППЧ $\Omega$		$\delta_{\Omega Opt}$	$\delta_{\Omega Ideal}$	$\delta_{\Omega Butterw}$	$\delta_{\Omega Gaussian}$
	$\beta_1$	$\beta_2$				
1	$0.035\pi$	$0.04\pi$	0.13211	0.28323	0.27313	0.27189
2	$0.0375\pi$	$0.0425\pi$	0.3492	0.30822	0.31119	0.31036
3	$0.04\pi$	$0.045\pi$	0.13101	0.55406	0.55503	0.55472
4	$0.0425\pi$	$0.0475\pi$	0.34099	0.72638	0.55996	0.60419
5	$0.045\pi$	$0.05\pi$	0.41356	0.86981	0.87022	0.87001
6	$0.0475\pi$	$0.0525\pi$	0.23196	0.56816	0.57263	0.57082
7	$0.05\pi$	$0.055\pi$	0.34246	0.58755	0.6305	0.62484
8	$0.0525\pi$	$0.0575\pi$	0.12423	0.22294	0.22436	0.22396
9	$0.055\pi$	$0.06\pi$	0.33214	0.63152	0.6312	0.63129
10	$0.0575\pi$	$0.0625\pi$	0.40426	0.85964	0.7762	0.8095
11	$0.06\pi$	$0.065\pi$	0.1968	0.41986	0.4204	0.42016
12	$0.0625\pi$	$0.0675\pi$	0.24863	0.57319	0.57095	0.57158
13	$0.065\pi$	$0.07\pi$	0.4328	0.92163	0.92157	0.92155
14	$0.0675\pi$	$0.0725\pi$	0.47163	0.69156	0.69313	0.69208
15	$0.07\pi$	$0.075\pi$	0.20767	0.7969	0.68474	0.7815

Далее представлены результаты фильтрации модельного изображения (рис. 1) в подобласти пространственных частот

$$\Omega: \{ \alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi, \beta_1 = 0.04\pi, \beta_2 = 0.045\pi \}.$$

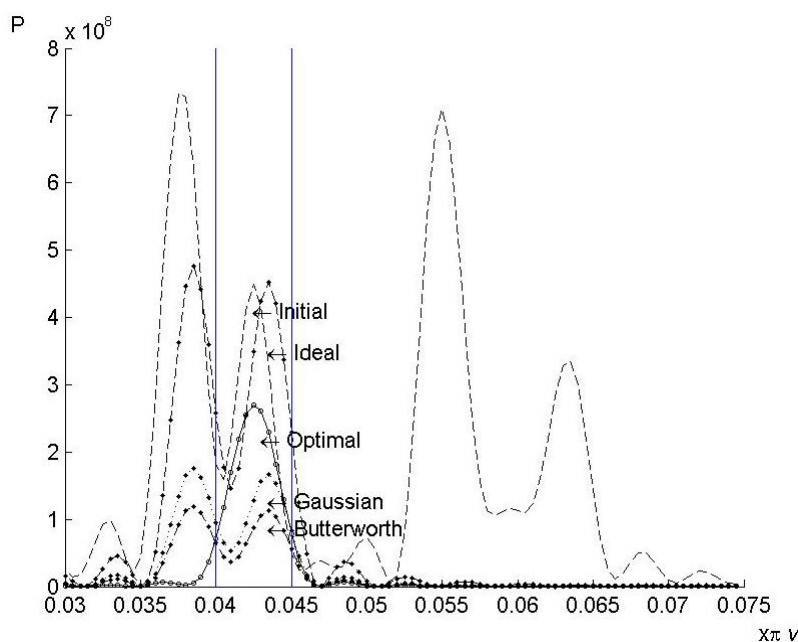


Рис. 2. Трансформанты Фурье (абсолютные значения) в подобласти пространственных частот  $\alpha_1=0, \alpha_2=\pi, \beta_1 = 0.04\pi, \beta_2 = 0.045\pi$  при  $u=0.22\pi$ : ----- - исходного изображения; выходных последовательностей фильтров:

—●—●— — оптимальный, —◆—◆— — идеальный, \*-\*-\*-\*-\* — Баттлерворта, \*-\*-\*-\*-\* — Гауссов

Fig. 2. Fourier transforms (absolute values) in a subdomain of spatial frequencies  $\alpha_1=0, \alpha_2=\pi, \beta_1 = 0.04\pi, \beta_2 = 0.045\pi$  at

$u=0.22\pi$ : ----- - original image; output sequences of filters: —●—●— — optimal, —◆—◆— — ideal, \*-\*-\*-\*-\* — Butterworth, \*-\*-\*-\*-\* — Gaussian

На рис. 2 приведены абсолютные значения трансформант Фурье при  $u=0.22\pi$ ,  $v \in [0.03\pi, 0.075\pi]$  исходного изображения и результатов фильтрации, полученных при применении оптимального и других фильтров в заданной подобласти пространственных частот  $\Omega$ .

На рис. 3 влияние дополнительной энергии исходного изображения, сосредоточенной вне

выбранной подобласти пространственных частот у ее левой границы (рис. 2), проявляется в наличии существенных изменений яркости пикселей изображений (рис. 3в, 3д, 3ж), являющихся результатами фильтрации с помощью фильтров, отличных от оптимального фильтра, и в наличии биений на графиках соответствующих профилей изображений.

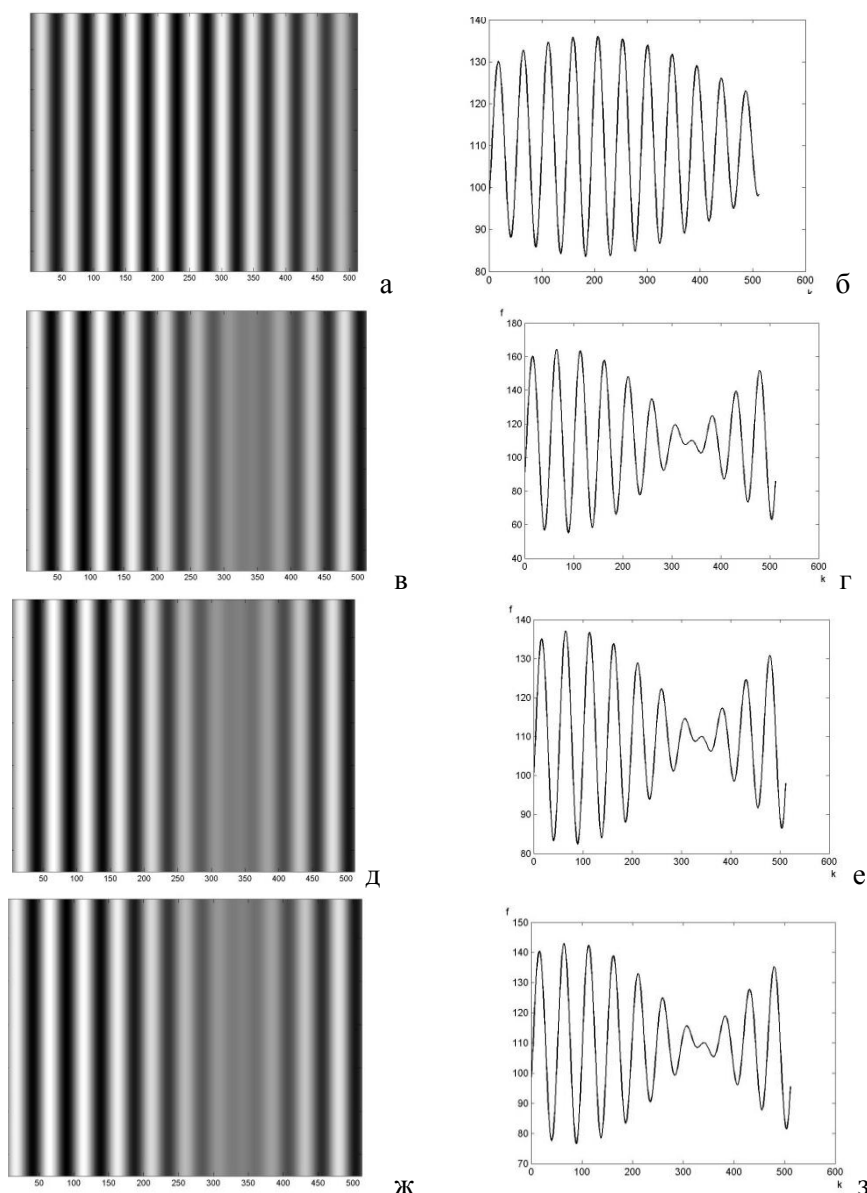


Рис. 3. Результаты фильтрации (изображение и профиль) на основании фильтров: а, б – оптимальный; в, г – идеальный; д, е – Баттвортса, ж, з – Гауссов

Fig. 3. The filter results (image and profile) based on the filters: a, b – optimal; c, d – ideal; e, f Butterworth; g, h – Gaussian

**Выводы**

Результаты вычислительных экспериментов как с модельными изображениями, так и с реальными фотоснимками в цифровом виде

показывают, что относительные доли «просачивания» энергии за пределы указанной подобласти пространственных частот у выходных последовательностей частотных фильтров,

основанных на применении ДПФ, существенно больше, чем у разработанного метода.

В ходе экспериментов показано, что энергия входного изображения, сосредоточенная вне выбранной подобласти пространственных частот, влияет на выходную частотных фильтров, основанных на применении ДПФ, в значительно большей степени, чем на результат, полученный на основании метода оптимальной фильтрации. Данное влияние проявляется как на графиках значений соответствующих трансформант Фурье, так и на изображениях, полученных в результате фильтрации.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 15-07-01570 (Субполосная скрытная интеграция/извлечение дополнительной информации в аудио или видео контенте).*

#### Список литературы

1. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А. Вариационные алгоритмы анализа и обработки изображений на основе частотных представлений. Белгород: Издательство БелГУ, 2008. 146 с.
2. Жилияков Е.Г. Методы анализа и построения функций по эмпирическим данным на основе частотных представлений. Белгород: Издательство БелГУ, 2007. 160 с.
3. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А. Optimal filtering images based on frequency representations // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ, 2008. Вып. 1. С. 118-131.
4. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. М.: Техносфера, 2006. 1072 с.

5. Жилияков Е.Г., Черноморец А.А., Болгова Е.В. О субполосной фильтрации изображений с применением компенсирующих коэффициентов // Техника и технологии – 2014: сборник статей Международной научно-технической конференции. 2014. С. 30-34.

6. Черноморец А.А., Лысенко И.В., Болгова Е.В. Компьютерная реализация алгоритма взвешенной оптимальной фильтрации изображений. Вопросы радиоэлектроники. Сер. ЭВТ, 2012. Вып. 1. С. 103-111.

#### References

1. Zhilyakov E.G., Chernomorets A.A. Variation Analysis Algorithms and Image Processing Based on the Frequency Representations. Belgorod: BSU publishing house, 2008. 146 p.
2. Zhilyakov E.G. Methods of Analysis and Construction of Functions from the Empirical data Based on Frequency Representations. Belgorod: BSU Publishing House, 2007. 160 p.
3. Zhilyakov E.G., Chernomorets A.A. Optimal Filtering Images Based on Frequency Representations. Electronic Engineering. 2008. Part 1. Pp. 118-131.
4. Gonzalez R., Woods R. Digital Image Processing. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 1072 p.
5. Zhilyakov E.G., Chernomorets A.A., Bolgova E.V. About Subband Filtering Images Based on the Use of Compensating Coefficients. Engineering and Technologies – 2014: collected works of the International Scientific and Technical Conference. 2014. Pp. 30-34.
6. Chernomorets A.A., Lysenko I.V., Bolgova E.V. Computer Implementation of Algorithm of the Weighed Optimal Image Filtration. Electronic Engineering. 2012. Part 1. Pp. 103-111.

УДК 621.377.2

DOI

Ушакова Н.Н.  
Винтаев В.Н.

**ВЕРИФИКАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ДЕКОНВОЛЮЦИИ КОСМИЧЕСКОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ МЕТОДОМ МАЛЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ ОПЕРАТОРА ДЕКОНВОЛЮЦИИ**

1) доцент кафедры информационных систем и технологий, кандидат технических наук, доцент Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая 116а, г. Белгород, 308023, Россия  
*e-mail: natush2006@yandex.ru*

2) доцент кафедры информационных систем и технологий, кандидат технических наук, доцент Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая 116а, г. Белгород, 308023, Россия  
*e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru*

#### Аннотация

В работе представлена технология малого нелинейного возмущения модифицированного оператора деконволюции космического изображения высокого разрешения для препарирования регулярных и стохастических компонентов изображения в условиях пересечения их пространственно-частотных спектров с синтезом стартовой функции рассеяния точки на изображении с верифицированными регулярными составляющими.

**Ключевые слова:** цифровое космическое изображение; пространственно-частотный спектр; тонкая структура изображения; функция рассеяния точки; деконволюция; интегральный оператор; мера Лебега; нечеткое множество.

Ushakova N.N.  
Vintaev V.N.

**VERIFICATION OF RESULTS OF DECONVOLUTION OF SPACE HIGH-RESOLUTION IMAGES WITH THE METHOD OF SMALL INDIGNATIONS OF A DECONVOLUTION OPERATOR**

1) Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Department of Information Systems and Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economy and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia  
*e-mail: natush2006@yandex.ru*

2) Candidate of Technical Sciences, Associate Professor Department of Information Systems and Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economy and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia  
*e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru*

#### Abstract

The paper presents the technology of small nonlinear perturbations of a modified deconvolution operator space images of high resolution for the preparation of regular and stochastic components of the image in terms of intersection of their spatial-frequency spectra with the synthesis of the starting point spread function of the image with verified regular components.

**Keywords:** digital space image; the spatial-frequency spectrum; fine structure image; a function of the scattering point; deconvolution; integral operator; the Lebesgue measure; fuzzy set.

#### Введение

При решении задачи восстановления резкости космического изображения высокого разрешения итеративной деконволюцией с различными малыми возмущениями ядра интегрального оператора, реализуется слабоменяющийся от ядра к ядру отклик (в виде результата деконволюции) на регулярные компоненты изображения по сравнению с более выраженной реакцией на стохастические составляющие. Это происходит из-за возрастания аппликата (положительного наклона огибающей)

при увеличении пространственных частот в спектральном представлении ядер, т.е. в их пространственно-частотных спектрах (ПЧС) [1-3].

В условиях пересечения ПЧС шумов и тонкой структуры образов объектов, что имеет место на изображениях высокого и сверхвысокого пространственного и спектрального разрешения, задача учета влияния шума и препарирования его на шум и стохастические составляющие тонких структур изображения не решается однозначно. Как правило для препарирования используется факт

анизотропии радиуса корреляции стохастической составляющей на линейном тонкой структуры. Так как коррекция изображения и сам синтез ядра оператора деконволюции начинается с измерения (адекватного синтеза) функции рассеяния точки (ФРТ) на изображении, то необходимо и целесообразно добиться соотношения энергий регулярных и стохастических компонент на изображении для порождения стохастических составляющих на синтезируемой ФРТ таких, чтоб по энергии они не превышали погрешность итеративного процесса исчисления оператора деконволюции при подавлении той же самой ФРТ (иначе она будет существенно неизопланатичной и вызовет неоднородное распределение уровня коррекций резкости изображения).

**Технология нелинейного возмущения оператора деконволюции для препарирования регулярных и стохастических компонент и коррекция резкости на изображении**

Естественным шагом для получения изопланатичной ФРТ является обеспечение возможного превалирования регулярных составляющих на изображении над стохастическими [4]. Для этого целесообразно построить следующий верифицирующий процесс:

Операторы деконволюции считаем коррелирующими в зависимости от степени корреляции их ядер, т.е. в зависимости от значения коэффициента корреляции. При этом, если результат работы алгоритма, являющегося вычислимой реализацией оператора, сводится к паре  $(S_{RR}, n)$ , где  $S_{RR}$  – регулярная,  $n$  – стохастическая составляющие, и для серии алгоритмов  $L_i$ , порождающих пары  $(S_{RR}, n)_i$ ,

построено выражение  $\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_{RR}, n)_i = (S_{RR}, n)_0$ ,

причем норма разницы  $\|(S_{RR}, n)_0 - (S_{RR}, n)_i\|$  ощутимо заметна за счет эволюции  $n$ , а не  $S_{RR}$ , отношение сигнал/шум в паре  $(S_{RR}, n)_0$  улучшилось в  $\psi$  раз и нельзя заявить, что  $\psi \ll \sqrt{N}$ , то алгоритмы ансамбля считаем верифицируемыми.

В алгоритме  $L_i$  обработки входной пары  $(S_{RR}, n)_i$  подвергнем возмущению операцию умножения (возмущая матрицей  $V_{ij}$  малых вещественных значений базовую  $10 \times 10$ -клеточную матрицу, к примеру, операции умножения). Возмущение других операций не рассматривается, отсутствие операции умножения в алгоритмах  $L_i$  не предполагается, так как в работе строится общая схема

верифицирующих ансамблей для алгоритмов задачи коррекции разрешения, т.е. алгоритмов цифровой фильтрации, деконволюции, ортогональных преобразований. Возмущение считаем малым, если выполняется неравенство

$$\frac{\|\{C_i\} - \{R_i\}\|}{\|\{R_i\}\|} \ll 1, \quad (1)$$

где  $\|\{C_i\}\|$  и  $\|\{R_i\}\|$  – нормы выходных потоков данных по деконволюции после и до возмущения, соответственно.

Нелинейные возмущения стохастической составляющей искажают ее функцию распределения и расширяют полосу ее спектрального представления [5]. Разным матрицам операции возмущения будут теперь соответствовать стохастические составляющие с разными функциями распределения и несильно возмущенная регулярная составляющая [3]. При выполнении верификации суммированием результирующих пар  $(S_{RR}, n)_i$ , где  $i$  – номер матрицы возмущения операции умножения (причем матрицы друг другу не равны), в силу центральной предельной теоремы теории вероятности результирующая стохастическая составляющая будет иметь распределение, близкое к нормальному (при достаточном числе вариантов возмущающих матриц) с соответствующими упомянутой теореме среднеквадратичной дисперсией и математическим ожиданием. Регулярная составляющая в среднем будет нарастать по закону веерного фильтра, а стохастическая составляющая нарастает со значительным отставанием по энергии [3], преобразуясь в нормально распределенную случайную величину [5].

Если  $\Delta f$  – полоса частотно-контрастной характеристики (ЧКХ) тракта зондирования и  $\Delta f < \Delta f_\xi$ , где  $\Delta f_\xi$  – полоса ПЧС стохастической составляющей после нелинейного возмущения, то в соответствии с теоремой о нелинейном возмущении суммы «сигнал + шум» получим новое соотношение сигнал/шум [5, 6]:

$$\text{сигнал/шум} \approx \frac{\Delta f_\xi}{\Delta f} \cdot \frac{S_R^2}{2\sigma^2}, \quad (2)$$

где  $\frac{S_R^2}{2\sigma^2}$  классическое отношение средней энергии слабоизменной регулярной составляющей на изображении к удвоенной среднеквадратичной дисперсии стохастической составляющей, уменьшенной за сет операции

накопления при верификации и нормирования результатов.

На рис. 1 и рис. 2 приведены результаты, использующие разнос отклика на возмущенную операцию умножения исходного изображения на единицу на регулярные составляющие и стохастические. В спектральном представлении это разнос отклика на низко-, средне- и высокочастотные составляющие ПЧС изображения. Исходное изображение попиксельно умножалось возмущенной операцией на единицу и вычиталось из исходного. На рисунке 1 (слева) представлено космическое изображение фрагмента городской черты с высоким разрешением, содержащее примерно равнонасыщенные низкие, средние и высшие моды ПЧС. Правее приведены разностные изображения ("возмущенное" минус исходное).

Размещенное в центре рисунка 1 изображение показывает отсутствие регулярной составляющей, т.е. при матрице с нормой 0.05 возмущение регулярной в исходном изображении крайне мало. Изображение, размещенное в правой части показывает наличие на разностном изображении остаточной регулярной составляющей, т.е. матрица с нормой 0.3 в достаточной мере подвергла возмущению и регулярную составляющую на исходном изображении.

Аппроксимируя ЧКХ тракта зондирования для простоты вычислений прямоугольником

$$K(J\omega) = \begin{cases} K_0, & -\omega_g \leq \omega \leq \omega_g, \\ 0, & \omega \notin (-\omega_g, \omega_g), \end{cases} \quad (3)$$

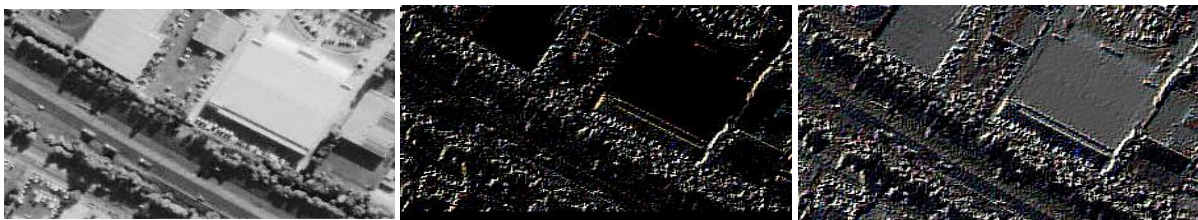


Рис. 1. Исходное изображение (слева), разностное с нормой матрицы возмущения 0.05 (в центре), разностное с нормой матрицы возмущения 0.3 (справа)

Fig. 1. Original image (left), difference from the norm of the matrix perturbation 0.05 (center), difference from the norm of the matrix perturbation 0.3 (right)

$N$  разным возмущающим матрицам  $V_i$  соответствуют  $N$  возмущенных матрицей  $V_i$  состояний исходного функционала, удовлетворяющих описанному выше условию реализации откликов на регулярную и стохастическую составляющие. В силу той же

и возбуждая тракт белым шумом с сингулярной функцией автокорреляции (ФАК)

$$\Phi AK(\tau) = \frac{N_0}{2} \delta(\tau), \quad (4)$$

где  $\delta(\tau)$  – функция Дирака, получим на выходе тракта шум со спектральной плотностью, равной  $\frac{N_0}{2} |K(J\omega)|^2$ . ФАК шума на выходе тракта в соответствии с теоремой Винера-Хинчина [3] будет

$$\begin{aligned} \Phi AK_1(\tau) &= \frac{N_0 K_0^2}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \exp(J\omega\tau) d\omega = \\ &= N_0 K_0^2 \left(\frac{\omega_g}{2\pi}\right) \frac{\sin \frac{\omega_g \tau}{2}}{\frac{\omega_g \tau}{2}} \cdot \cos \omega_g \tau, \end{aligned} \quad (5)$$

откуда следует, что два любых значения шума при  $\Delta\tau = \frac{\pi}{\omega_g}$  – некоррелированы. На любом окне

транспаранта изображения апертурой  $l$  будет

$$\frac{2l}{\Delta\tau} = \frac{2l\omega_g}{\pi} \quad (6)$$

независимых отсчетов шума и  $\sqrt{\frac{2l\omega_g}{\pi}}$  независимых ансамблей для двумерной задачи. Здесь всюду  $\omega$  – пространственная частота. независимых отсчетов шума и  $\sqrt{\frac{2l\omega_g}{\pi}}$  независимых ансамблей для двумерной задачи. Здесь всюду  $\omega$  – пространственная частота.

Средние оценки приведенной величины, оцененной для метрических характеристик современных окон формирования космических изображений высокого разрешения дают значение равное примерно  $\sqrt{150}$ .

На рис. 2 приведен пример верификации изображения "Город". В верхней части рисунка расположены исходное изображение высокого разрешения (слева) и его спектральный портрет (справа). В средней части рисунка, соответственно, расположены – результат коррекции исходного изображения разработанным методом [3] (опорные ориентиры: фрагмент полосы дороги, отдельные крупные автомобили, центральный дом с прилегающими регулярными компонентами) и его спектральный портрет. В нижней части рисунка, соответственно, расположены – результат верификации на базе описанного выше метода с возмущающими матрицами с нормами 0.05; 0.07; 0.09; 0.11. В соответствии с изложенным выше эффект верификации попиксельным суммированием четырех "возмущенных" изображений измеряется коэффициентом превалирования регулярных компонент равным  $\sqrt{4} = 2$ .

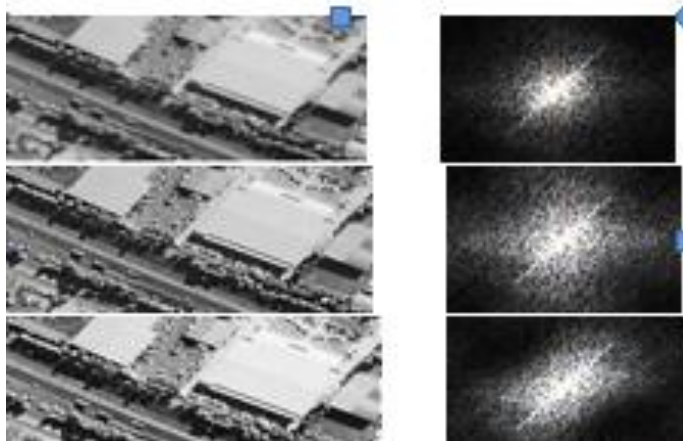


Рис. 2. Исходное изображение и его спектральный портрет (вверху); результат коррекции методом специальной коррекции и его спектральный портрет (в центре); результат верификации и его спектральный портрет (внизу)

Fig. 2. The original image and its spectral portrait (top); the result of correction by the special method of correction and its spectral portrait (center); the result of verification and its spectral portrait (bottom)

На изображении, верифицированном описанном выше способом далее можно ставить и решать задачу более корректного выявления ФРТ по опорному ориентиру и его эталону (при

условии нивелирования невязок масштаба, угла места солнца освещения объекта, взаимного поворота и т.д.) [3]. Формирование изображения без учета (или при подавлении) артефактов, вызываемых возмущением СДИ, в модели Бейтса и Мак Доннела представляется в аналитической записи для изображений высокого и сверхвысокого разрешения в виде Фурье-представления интегрального уравнения Фредгольма, связывающего исходное изображение  $S_R$ , ФРТ и восстанавливаемое изображение  $S_H$  [2]:

$$F(S_R) = F(S_H) \cdot F(\Phi PT), \quad (7)$$

где  $\Phi PT$  является ядром интегрального преобразования (свертки),  $F(S), F(\Phi PT)$  – Фурье-спектры объектов. Определяемая из (7) для каждого из ОО или полигонных объектов  $S_{OO}$  и их эталонов ( $\Xi$ ) –  $S_{HO}$  уникальная ЧКХ тракта в виде

$$F(\Phi PT)_i = F(S_{OO})_i / F(S_{HO})_i \quad (8)$$

с оценкой  $F(\Phi PT)$  в виде  $\bigcup_i^N F(\Phi PT)_i$  дает оценку искомой  $\Phi PT_0$  в виде

$$\Phi PT_0 = F^{-1}(\bigcup_i^N F(\Phi PT)_i). \quad (9)$$

Нанесение нулевых пикселей на фрейм для выявления самого ОО из фона – это задача корректного определения контуров, обрамляющих ОО, иначе в процессе определения ФРТ будут участвовать и пиксели фона. Целесообразно это реализовать веерными фильтрами [3].

Анизотропия радиуса корреляции линеамента образа объекта антропогенного происхождения в отличие от радиуса корреляции шума делает веерный фильтр особенно чувствительными к отклонению азимута фильтрации, т.е. к отклонению направления простираения границы образа объекта, что повышает профит фильтра, а для криволинейных границ или контуров эффект фильтрации сохраняется при многократном запуске фильтра, но с малой базой, соответствующей разложению участка кривой в соответствии с алгоритмом Брезенхейма или переходом к Фурье-представлению веерной фильтрации [3]. На рисунке 3 приведены исходное тестовое изображение, зашумленное изображение и

сравнительные результаты исследования веерного фильтра.

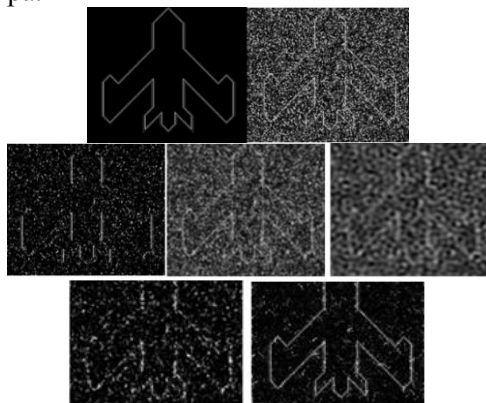


Рис. 3. Слева направо: исходное тестовое изображение; зашумленное равномерным нормальным шумом исходное тестовое изображение (соотношение сигнал/шум=0.8); далее результаты обработки зашумленного тестового изображения: фильтром Винера, линейным матричным фильтром с нормализацией, линейным фильтром в частотной области с обнулением кольца пространственных частот с номерами выше 50, адаптивным фильтром графического пакета PHOTOPAINT, веерным фильтром с параметрами: количество проходов – 2, длина базы – 17 и 5, количество направлений – 36

Fig. 3. Left to right: original test image; evenly suspended noise normal noise source test image (the ratio signal/noise=0.8); further, the results of processing a noisy test image: a Wiener filter, linear matrix filter with the normalization, a linear filter in the frequency domain by zeroing ring of spatial frequencies with numbers above 50, the adaptive filter graphic package PHOTOPAINT, fan filter with the following parameters: number of passes – 2, the length of the base 17 and 5, the number of directions is 36

Для выделения ОО на приведенных ниже материалах с аппарата OrbView-3 – самолете на стоянке и его эталоне – более резком изображении, выделялись для корректного оконтуривания опорного ориентира (и эталона) компоненты изображений – локальные спектральные максимумы в выделенных участках спектра фрейма с объектом. Далее находился энергетический максимум результатов веерной фильтрации в разных базах фильтрации, не выходящих по величине за пределы соотношения неопределенности для данной выделенной полосы. Полный портрет ОО и эталона реализовался операцией объединения обработанных участков спектра и обратным Фурье преобразованием [3].

На рисунке 4 можно видеть эталон и соответствующий опорный ориентир с устраненными взаимными невязками геометрии,

масштаба, угла поворота, гистограммы. Они выбраны на соответствующих паттернах изображения и отфильтрованы от фона, помещены в рабочий фрейм и приведены к виду, инвариантному к углу места солнца.

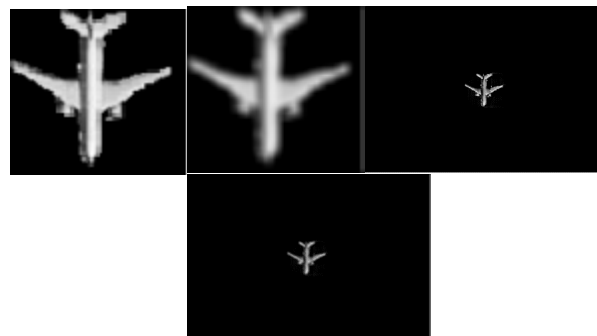


Рис. 4. Слева направо: эталон и соответствующий опорный ориентир с устраненными взаимными невязками, выбранные на соответствующих паттернах изображения и отфильтрованные от фона; далее эталон и соответствующий опорный ориентир, помещенные в рабочий фрейм и приведенные к виду инвариантному к углу места солнца

Fig. 4. Left to right: the reference and the corresponding reference point with fixed mutual residuals, selected on the corresponding patterns of the image and filtered from the background; then the reference and corresponding reference point, placed in the working frame and reduced to the form invariant to the elevation angle of the sun

Коэффициент корреляции ОО и Э не может быть равен 1, иначе ОО и Э идентичны и тогда нет постановки задачи, ниже 0.7 – запрещенные значения, т.к. отсутствует при этом возможность доказать что это сопряженная пара ОО и Э. Следует сделать оговорку: значение коэффициента корреляции, допустим, 0.7, а распознавание ОО и идентификация его соответствия эталону должна сопровождаться уровнем ложной тревоги не выше 0.1, т.е. распознавание и идентификация выполняются при дополнительных признаках [6]. Например, наблюдаемый ОО – самолет, тогда его можно сравнивать только с эталоном самолета F105R, и выяснить, к примеру, что на отслеживаемом аэродроме других не бывает. В  $F(\Phi PT_0)$ , которое и порождает инверсные и Винеровские фильтры с модификациями, включая модификации на частотно-зависимую добавку [7] каждая  $i,j$ -ая мода характеризуется значением функции принадлежности  $\mu_{oij}$ , определенной по выше описанному правилу для (3), и строилась она на значениях коэффициентов корреляции эталонов и ОО.

Значение взвешенной суммы вида

$$\mu_{00} = \left( \sum_{i,j}^{N,M} \mu_{0ij} (F(\Phi PT_{0ij}))^2 \right) / \left( \sum_{i,l}^{N,M} (F(\Phi PT_{0il}))^2 \right) \quad (10)$$

где  $0.7 \leq \mu_{00} < 1$  целесообразно принять за достоверность  $F(\Phi PT_0)$  и  $\Phi PT_0$ .

По вычисленной  $\mu_{00}$  определим разброс  $\Delta A$  апертур ФРТ, используя множитель вида  $1 - \mu_{00}$  на расширение и сужение выявленной апертуры  $A(\Phi PT)$ :

$$\Delta A(\Phi PT) = A(\Phi PT)(1 - \mu_{00}). \quad (11)$$

При ФРТ этом интерполируется на новые апертуры с сохранением ее энергии (суммы квадратов аппликата).

Далее выполняется специальная коррекция резкости (СКР) в соответствии с техникой, представленной в работах [1,7], с пошаговым малым наращиванием «заниженной» апертуры ФРТ до остановки процесса роста резкости на каждом шаге и СКР с пошаговым малым уменьшением «завышенной» апертуры ФРТ до появления на каждом шаге отмеченных в [1] артефактов в виде паразитного контрастирования.

Необходимо заметить, что монотонность в пошаговом наращивании или уменьшении апертур ФРТ на запуск итераций порождает монотонность тенденции изменений резкости, получаемой при заданной погрешности итеративных процессов, но дисперсия отклонений получаемых резкостей от оси выявленной тенденции может превышать указанную погрешность. Анализ соотношений (7), (8) и (9), как базовой модели коррекции резкости наводит на вывод, что «всплески» резкости на фоне тенденции изменения при принятом алгоритме построения последовательности ФРТ с сохранением ее энергии определяются (в первом приближении) уровнем энергии частоты в изображении, совпадающей со средневзвешенной модой в ПЧС используемой в данный момент ФРТ.

При монотонном переборе значений апертур ФРТ с увеличением их и уменьшением, как описано выше, из-за нестойкой монотонности получаемых результатов по деконволюции приходится на этих результатах вводить меру получаемой резкости - Лебега (внешнюю и внутреннюю), а окончательную оценку резкости искать на интервале несовпадения внешней и внутренней меры.

Все процессы СКР завершаются итеративным представлением Ван Циттера, а формула погрешности итерационного процесса имеет вид [7]:

$$\rho(S_H^{(n)}, S_H) \leq (\|T\| \rho(S_H^{(n)}, S_H^{(n-1)})) / (1 - \|T\|), \quad (12)$$

$$\text{где } \rho(S_H^{(n)}, S_H) = \left( \sum_{i,j} (S_{Hij}^{(n)} - S_{Hij})^2 \right)^{1/2} -$$

евклидова метрика, а  $\rho(S_H^{(n)}, S_H^{(n-1)})$  исчисляется аналогично; норма оператора  $T$  в соответствии с технологией СКР равна

$$\|T\| = \left\| F^{-1}(1 - F(\Phi PT_0)) ** S_H^{(n-1)} \right\| / \left\| S_H^{(n-1)} \right\|, \quad (13)$$

где числитель и знаменатель – евклидова норма (формула Пифагора) на компонентах векторов. Легко заметить, что понимание ФРТ при верификации регулярных компонент изображения как изопланатичной ФРТ определится из условия достижения при верификации разницы норм регулярной  $\|S_{RR}\|$  и стохастической  $\|S_{RS}\|$  компонент изображения абсолютного заданного значения погрешности исчисления оператора деконволюции.

$$\|S_{RR}\| - \|S_{RS}\| = \rho(S_H^{(n)}, S_H) \quad (14)$$

Ниже, на рисунке 5 приведен результат с более высоким значением резкости, полученный в описываемой технологии учета ошибок определения ФРТ и фильтрацией шума с введением меры Лебега для резкости в соответствии с технологией, представленной в [7], с расширением числа ОО, выбранных на исходном снимке. В последовательности итеративных деконволюций полученный результат стоит после последней итерации в предыдущей версии коррекции резкости [7] и перед наступающим срывом корректности в коррекции резкости в предыдущей версии.

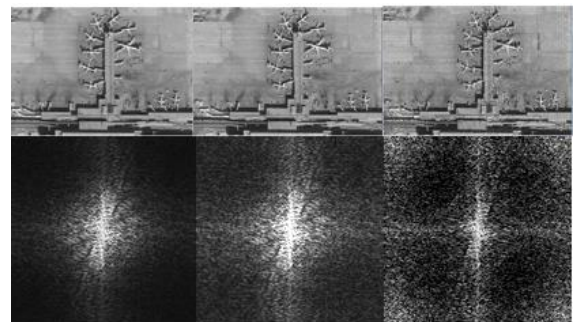


Рис. 5. Слева направо: результат СКР, результат с учетом ошибок по ФРТ, результат срыва корректности работы СКР на последующей итерации в СКР

Fig. 5. Left to right: the result TFR result of the accounting errors on the TRF, is the result of disruption of correct operation of the RCDS on a subsequent iteration in the TFR

Получаемый экстремальный по резкости результат при выполнении верификации в СКР появлялся на 10-15 итераций раньше, чем при

выполнении СКР без верификации на нелинейных возмущениях оператора деконволюции

### **Заключение**

Разработан метод корректировки результатов функционирования итеративного интегрального оператора деконволюции исходного изображения по оценке достоверности функции рассеяния точки, композируемой из функций рассеяния, определяемых по опознанным опорным ориентирам; метод разработан как модернизация представленной ранее специальной коррекции резкости на изображениях высокого разрешения с применением предварительного построения верифицирующего набора регулярных составляющих на изображении.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00171 "Разработка теоретических основ методов моделирования и алгоритмов представления в обобщенных операциях трактов преобразования дистанционных данных с максимизацией эффективности обработки информации (цифровых космических изображений)" и научного проекта № 16-07-00177 "Разработка теоретических основ методов моделирования реализации предельно достижимых характеристик сверхвысокого пространственного и спектрального разрешения в стволах дистанционного зондирования с космических платформ"*

### **Список литературы**

1. Адаптивное восстановление резкости на цифровых космических изображениях / Винтаев В.Н., Жилнев М.Ю., Моторин С.И., Ушакова Н.Н., Щербинина Н.В. // Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы». 2014. №4. С. 33-43.

2. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989. 336 с.

3. Ушакова Н.Н. Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования: Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Белгород, 2004. 255 с.

4. Цибанов В.Н. Регуляризирующие методы фильтрации и восстановления изображений: Дисс. на соискание ученой степени канд. физ.мат. наук. Москва, 2008. 113 с.

5. Тихонов В.И. Статистическая радиотехника. М.: Советское радио, 1966. 677 с.

6. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.

7. Специальная коррекция в процедурах регуляризации и итеративных процессах уменьшения размеров пятна функции рассеяния точки на космических изображениях / Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жилнев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. // Научные ведомости БелГУ. 2014. № 15(186). С. 166–175.

### **References**

1. Adaptive Acuity Restoration in Digital Space Images. The Russian Academy Journal of Information technologies and Computer Systems. 2014. №4. Pp. 33-43.

2. Beits R., Mak-Donnel M. Restoration and Reconstruction of Images. Moscow: Mir, 1989. 336 p.

3. Ushakova N.N. Correction of Digital Space Images on the Basis of Verified Simulation: Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Belgorod, 2004. 255 p.

4. Cibanov V.N. Regularization Methods of Filtering and Image Restoration: Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. fiz.mat. nauk. Moscow, 2008. 113 p.

5. Tihonov V.I. The Statistical Radiotechnics. Moscow: Sovetskoe radio, 1966. 677p.

6. Shovengerdt R.A. Remote Sensing. Imaging Methods and Models. Moscow: Tehnosfera, 2010. 560 p.

7. Applying Special Correction in Regularization Procedure and Iterative Processes of Space Images Point Spread Function Spot Diminution. Nauchnye vedomosti BelGU. 2014. № 15(186). Pp. 166-175.

УДК 621.377.2

DOI

**Винтаев В.Н.  
Жиленев М. Ю.  
Маторин С.И.  
Ушакова Н.Н.**

**ТЕХНИКА ФОРМИРОВАНИЯ И КОРРЕКЦИИ РЕЗКОСТИ  
КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

- 1) доцент кафедры информационных систем и технологий, кандидат технических наук, доцент Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая 116а, г. Белгород, 308023, Россия  
*e-mail: viktor.vn2010 @ yandex.ru*
- 2) ведущий конструктор. КБ «Салют» ФГУП «Государственный космический научно-производственный центр им. М.В. Хруничева», ул. Новозаводская, 18, Москва, 121087, Россия. *e-mail: zhilenev\_mihail@mail.ru*
- 3) профессор кафедры информационных систем и технологий, доктор технических наук, профессор Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая 116а, г. Белгород, 308023, Россия  
*e-mail: matorin@bsu.edu.ru*
- 4) доцент кафедры информационных систем и технологий, кандидат технических наук, доцент Белгородский университет кооперации, экономики и права, ул. Садовая 116а, г. Белгород, 308023, Россия  
*e-mail:natush2006 @ yandex.ru*

**Аннотация**

В работе представлена обобщенная формализованная двудольная диаграмма крейсерской технологии формирования космического изображения высокого разрешения и рассмотрены для сформированного паттерна подходы к улучшению резкости изображения на основе уточнения значений скорости движения изображения на фокальной плоскости бортовой фиксирующей аппаратуры, а также подходы к оптимальному расширению полосы пропускания пространственных частот трактом с улучшением объективности формируемых изображений при пространственно-частотном представлении.

**Ключевые слова:** космическое изображение; пространственно-частотный спектр; функция рассеяния точки; деконволюция; скорость движения изображения; интеграл Лебега; обобщенная функция с носителем меры нуль.

**Vintaev V.N.  
Zhilenev M.Ju.  
Matorin S.I.  
Ushakova N.N.**

**THE TECHNIQUE OF FORMATION AND CORRECTION  
OF HIGH RESOLUTION SPACE IMAGES**

- 1) Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Department of Information Systems and Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economy and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia  
*e-mail: viktor.vn2010@yandex.ru*
- 2) Principal Design Engineer. Khrunichev State Research and Production Space Center, 18 Novozavodskaya St., Moscow, 121087, Russia. *e-mail: zhilenev\_mihail@mail.ru*
- 3) Doctor of Technical Sciences, Professor. Department of Information Systems and Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economy and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia  
*e-mail: matorin@bsu.edu.ru*
- 4) Candidate of Technical Sciences, Associate Professor. Department of Information Systems and Technologies, Belgorod University of Cooperation, Economy and Law, 116a Sadovaya St., Belgorod, 308023, Russia  
*e-mail:natush2006@yandex.ru*

**Abstract**

The paper presents a generalized formalized bipartite graph of a cruising technology of high resolution space image formation and examines some approaches for improving the sharpness of the image based on the specification of the speed values of movement of the image on the focal plane side of the fixing apparatus. Besides, the authors discuss some approaches to the optimal extension of the bandwidth of spatial frequencies of the tract with the improvement in the objectivity of the formed images in the spatial-frequency representation.

**Keywords:** space image; spatial-frequency spectrum; a function of the scattering point; deconvolution; velocity of movement of the image; the Lebesgue integral; generalized function with a carrier of measure zero.

**Введение**

Крейсерские методы формирования космического изображения высокого разрешения при дистанционном зондировании Земли (ДЗЗ) могут быть с целью обобщения и формализации представлены в виде двудольной системной диаграммы – бортовой и наземной части (рис. 1 и рис.2). Для сформированного изображения с внесенными коррекциями от незапрограммированных возмущений орбитальных параметров движения космического аппарата (КА) в качестве модели тракта ДЗЗ при этом обоснованно используется модель Бейтса и Мак Доннела [1], с аналитической записью в виде уравнений Фредгольма, преобразующих искомое по качеству изображение в наблюдаемое, т.е. сформированное изображение. По пространственно-частотным спектрам (ПЧС) этих изображений восстанавливается частотно-

контрастная характеристика (ЧКХ) тракта простым отношением описанных ПЧС [2, 3]. Кроме этого, можно построить поля скоростей движения изображения (СДИ) на фокальной плоскости фиксирующей аппаратуры для последующей коррекции возникающих смазов на изображении и повысить разрешение на изображении до возможного уровня [4, 5]. Согласование коррекций изображения с ЧКХ, оптимизируемой под квазипрямоугольное окно пропускания ПЧС трактом дает улучшенные результаты по резкости. Повышение результативности этих методов требует повышения точности оценок СДИ и снижения степени или отказа от регуляризации возникающих (особенно при вычислениях отношений ПЧС) сингулярностей, т.к. регуляризация в деконволюции изображений приводит к работе с изображениями «не совсем теми», с которыми необходимо работать [6].

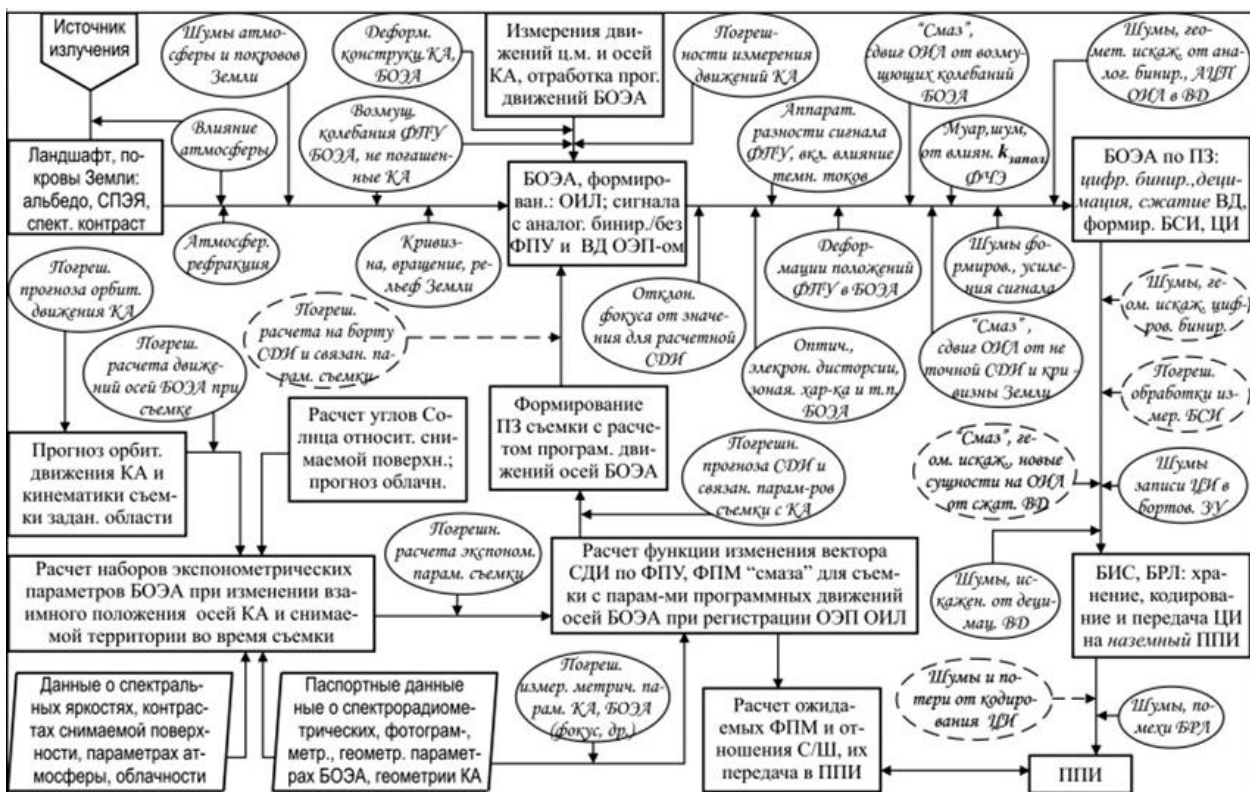


Рис. 1. Системная диаграмма процессов расчета и задания параметров орбитальной съемки, формирования БОЭА КА видеоданных о поверхности Земли, их преобразования в ЦИ и передачи в ПППИ

Fig. 1. A system chart of the processes of calculating and setting the parameters of the orbital imagery, and formation of the Spacecraft Electro Optical Payload video data on the surface of the Earth, their transformation into QI and PPI

**Крейсерская технология формирования космического изображения высокого разрешения**

По данным в открытых публикациях можно представить как современное состояние проблемы ДЗЗ из космоса и как структуру тракта зондирования – общую диаграмму (рис. 1, рис. 2) формирования конечного продукта ДЗЗ, существенно актуализированную сотрудником Конструкторского бюро "Салют" Государственного Космического Научно Производственного Центра имени М.В. Хруничева Жиленевым М.Ю. На рисунке 1 приведена системная диаграмма процессов

расчета и задания параметров орбитальной съемки, формирования бортовой оптико-электронной аппаратурой (БОЭА) совместно с другими системами космического аппарата (КА) видеоданных о поверхности Земли, их преобразования в целевую информацию (ЦИ) и передачи в пункт приема информации (ППИ).

На рисунке 2 приведена системная диаграмма формирования и цифровой обработки многоспектрального изображения поверхности Земли до стандартного продукта ДЗЗ до уровня «базовый» при обработке результатов съемки БОЭА КА.

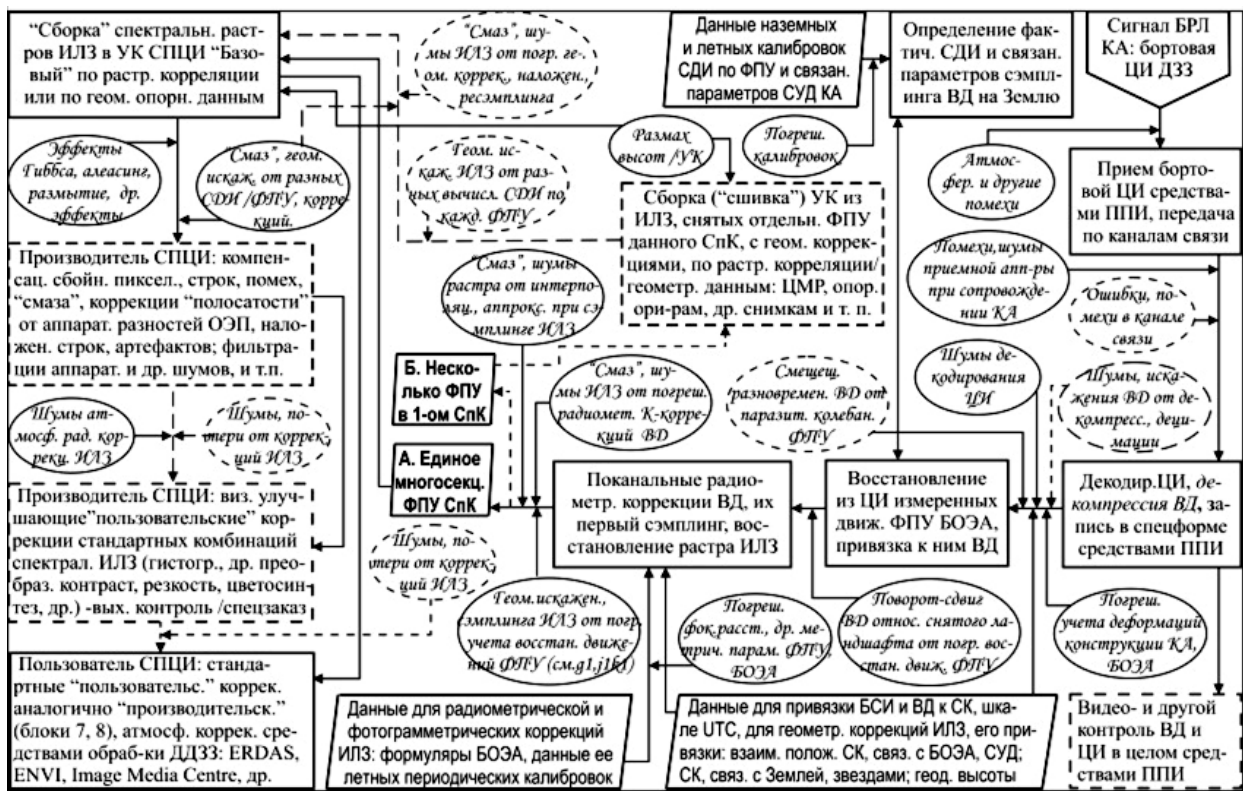


Рис. 2. Системная диаграмма формирования и цифровой обработки многоспектрального изображения поверхности Земли до стандартного продукта ДЗЗ до уровня «базовый» при обработке результатов съемки БОЭА КА

Fig. 2. A system chart of formation and digital processing of multispectral images of the Earth's surface up to standard remote sensing product to the level of "basic" in the processing of images shot by the Spacecraft Electro Optical Payload

Ниже, как необходимое разъяснение, представлена таблица 1 принятых на

рисунках 1 и 2 сокращений.

Таблица 1

**Список принятых сокращений к рисункам 1 и 2**

Table 1

**A list of accepted abbreviations to figures 1 and 2**

Сокращение	Сущность (понятие, термин, система, устройство, функция и т.д.)
АЦП	Аналогово-цифровой преобразователь входит, в частности, в состав ОЭП БОЭА
БИС	Бортовая информационная система, т.е. аппаратура сбора, хранения. селекции и передачи целевой информации
БОЭА	Бортовая оптико-электронная аппаратура
БРЛ	Бортовая радиолиния (передачи целевой информации)
БСКВУ	Бортовое синхронизирующее координатно-временное устройство
БСИ	Бортовая служебная (сопроводительная) информация для обработки видеоданных; содержит, в том числе, кинематические элементы внешнего ориентирования
БЦИ	Бортовая целевая информация; содержит видеоданные с БСИ
ВД	Видеоданные
ГЛОНАСС	Глобальная навигационная спутниковая система
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
ДДЗЗ	Данные дистанционного зондирования Земли
Заполн.	Заполнения, например, коэффициент
ЗУ	Запоминающее устройство
ИЛ	Изображение ландшафта
ИЛЗ	Изображение ландшафта Земли
КА	Космический аппарат
Коэф-т	Коэффициент
КС	Космическая система
КСЯ	Коэффициент спектральной яркости
ЛПИ	Линия передачи информации
ЛФПЗС	Линейка фотоприемников с зарядовой связью
МЗР	Младший значащий разряд
МК	Мультиспектральные каналы съемочной БОЭА
МКО	Мультиплексный канал обмена
МС, МС-	Мультиспектральная (аппаратура, изображение и т.п.)
МСА	Многоспектральная (широкозахватная) аппаратура
МСД	Многоспектральные данные
МЭ	Мира электронная (ЦА)
НИ	Навигационная информация (информация АСН в информации ЦА)
НКУ	Наземный комплекс управления
ОГ	Орбитальная группировка; также оптическая головка
ОЕ	Обрабатываемая единица
ОИ	Опорная информация
ОИЛ	Оптическое изображение ландшафта
ОЛЗ	Объект ландшафта Земли
ОО	Опорный ориентир
ОПО	Общее программное обеспечение
ОС	Операционная система
ОЭА	Оптико-электронная аппаратура
ОЭП	Оптико-электронный преобразователь
ПАН (PAN), ПАН-	Панхроматический канал, растровое изображение, и т. п.
ПЗС	Прибор с зарядовой связью
ПЗ	Полетное задание
ПК	Программный комплекс; также панхроматический канал (изображение), приборный контейнер
ПМО	Программно-математическое обеспечение
ПО	Программное обеспечение; также, первичная /предварительная обработка
ППИ	Пункт приема информации
ПР	Признак
ПРД	Передатчик
СА	Съемочная аппаратура
СДИ	Скорость движения изображения по ФПУ
СК	Система координат

СКП	Среднеквадратическая погрешность
СлИ	Служебная информация
СпК	Спектральный канал БОЭА ДЗЗ
СПО	Специальное программное обеспечение
СПП	Стандартные программные продукты
СПЦИ	Стандартные продукты цифровой обработки изображения, например, растровые данные ДЗЗ, созданные в интересах групп потребителей и ОПО ДЗЗ
СПЭО	Спектрально-энергетическая облученность (апертуры, ОЭП) экспонетрический параметр БОЭА
СПЭЯ	Спектральная плотность энергетической яркости (ландшафт, объекта)
СУ	Съёмочное устройство
СУД	Система управления движением КА
СУБД	Система управления базой или банком данных
СЧ	Составная часть
С/Ш	Соотношение сигнала к шуму
ТС	Темновой сигнал, параметр ФПЗС
ТСК	Топоцентрическая система координат
УК	Условный кадр
ФПЗС	Фотоприемник с зарядовой связью
ФП	Фокальная плоскость объектива БОЭА
ФПМ	Функция передачи модуляции
ФПУ	Фотоприемное устройство
ФР	Фокусное расстояние
ФРТ	Функция рассеяния точки
ФРЛ	Функция рассеяния линии
ФЧЭ	Фоточувствительный элемент
ЦА	Целевая аппаратура
ЦАП	Цифро-аналоговый преобразователь
ЦИ	Целевая информация
ЦКМ	Цифровые карты местности
ЦМР	Цифровая модель рельефа
MSS	Multispectral, мультиспектральный
PAN	Panchromatic.панхроматический, ПАН
PSNR	Пиковое отношение сигнал/шум применяется при оценках, например, сжатого изображения
RPC	Rational Polynomial Coefficient коэффициенты рациональных полиномов, т.н. «быстрой» геопривязки
UTC	Universal Time Coordinated (Всемирное координированное время)
ERDAS IMAGINE	Программный продукт, позволяющий проводить полный цикл обработки данных дистанционного зондирования Земли. URL: <a href="http://www.hexagongeospatial.com/products/producer-suite/erdas-imagine">http://www.hexagongeospatial.com/products/producer-suite/erdas-imagine</a>
ENVI	Программный продукт, позволяющий проводить полный цикл обработки данных дистанционного зондирования Земли. URL: <a href="http://www.exelisvis.com/Support/HelpArticles/TabId/185/ArtMID/800/ArticleID/14146/ENVI-52-Release-Notes.aspx#NewFeatures">http://www.exelisvis.com/Support/HelpArticles/TabId/185/ArtMID/800/ArticleID/14146/ENVI-52-Release-Notes.aspx#NewFeatures</a>
Image Media Centre	Программный продукт, позволяющий проводить полный цикл обработки данных дистанционного зондирования Земли. URL: <a href="http://www.novacenter.ru/cmsms/index.php?page=about_IMC_rus">http://www.novacenter.ru/cmsms/index.php?page=about_IMC_rus</a>

Очевидно, что увеличение разрешения на формируемом изображении в общем случае требует согласованных друг с другом модификаций в каждом из приведенных на рисунках 1 и 2 модулей. Кроме того, очевидно, что эти модернизации определяют пределы соответствующих дальнейших достижений для каждого отдельного постфактум сформированного изображения в постфактум сформированном тракте ДЗЗ и методами,

игнорирующими приведенную на рисунках 1 и 2 детальность технологии.

#### ***Уточнение текущих значений СДИ для коррекции смазов***

Увеличение резкости с сохранением измерительных свойств изображения, т.е. только подавление присутствующей на изображении функции рассеяния точки (ФРТ), требует компенсаций влияния на изображение

возмущений орбитальных параметров вычислением полей СДИ, как генеральных входных данных для коррекции резкости [4,5]. В работе [5] представлены выводы простых в вычислительном аспекте формул вычисления трассовой СДИ для борьбы с ФРТ сравнением с запрограммированной СДИ в виде выражения для  $V$  (СДИ):

для эллиптической орбиты

$$V = \frac{f \cdot \sqrt{\mu \cdot \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)}}{H}, \quad (1)$$

для круговой орбиты в виде

$$V = \frac{f \cdot \sqrt{\frac{\mu}{r}}}{H}, \quad (2)$$

где  $a$  – большая полуось орбиты;  $r$  – радиус-вектор, соответствующий положению КА на орбите;  $\mu$  – гравитационный параметр планеты,  $H$  – высота орбиты над поверхностью планеты,  $f$  – фокусное расстояние БОЭА.

Точностные характеристики цифровой модели для оценок  $H$ , т.е. цифровой модели рельефа (ЦМР) в данном случае существенно влияют на уровень подавления ФРТ. На рисунке 3 приведен фрагмент изображения с КА Ресурс-ДК, полученного с матрицы фокальной системы спутника (территория Испании).



Рис. 3. Фрагмент изображения с КА Ресурс-ДК

Fig. 3. A fragment of images from Resurs-DK spacecraft

Заметная в центре верхней части фрагмента и аномальная ФРТ – это результат координатного «несведения» спектральных каналов за счет аномальных тангажа, рыскания и крена КА или некорректной ЦМР на участке трассы КА.

Для улучшения точности позиционирования элементов изображения совмещением каналов

определялись опорные точки на формируемых изображениях в виде сетки позиционированных точек изображения, корректирующих от кадра к кадру вычисленные значения СДИ измеренными значениями СДИ координатным методом. Координатные разностные методы определения фактического СДИ базируются на определении центров (центроидов) изображений опорных ориентиров (ОО) и сводятся либо к определению геометрического центра изображения ОО, либо к определению энергетического центра (центра интенсивности) данного изображения, либо к аналогичным определениям точек «резкого края» линейно-протяженного ОО с оценкой функции рассеяния линии [7]. Как правило, геометрические и энергетические центры изображений ОО не совпадают. К тому же, простой подсчет площади, занимаемой ОО на изображении, порождает проблему выбора – учитывать ли абсолютно все «засвеченные» ориентиром пиксели.

Позиционирование опорных точек в работе с целью предельно возможного снижения погрешности реализуется в виде регуляризованной дельта-функции, формируемой (как в радиолокации) в виде отклика фильтра, собирающего и суммирующего в одной точке все амплитуды спектра сигнала на принципе реализации соответствующей монотонной дисперсии задержки гармоник в зависимости от их номера.

Все гармоники ПЧС изображения, приведенные к значению единой фазы для выбранной точки позиционирования на «восходящем» фронте формируемого импульса, при этом складываются синфазно, определяя минимальный для данного ПЧС наклон фронта от нулевого значения амплитуды импульса до максимального значения.

Например, «толщина» отклика на уровне 0,7 для элементов оптической ПЗС-матрицы БОЭА, апертурой пикселей в 7-8 мкм может составлять  $10^{-10}$  м или  $10^{-9}$  м на выделенную координатную ось и при работе с разностями позиций откликов на изображениях определяет соответствующую точностную характеристику определения вектора СДИ, улучшающую точность оценки СДИ не хуже, чем на 1-2 порядка. Количество  $N$  суммируемых гармоник определяет дополнительную к базовой разрядность  $K$  вычисления амплитуды отклика в виде

$$K = E[\log_2 N] + 1, \quad (3)$$

где  $E[\ ]$  – функция Антье.

*Деконволюция на основе оптимизированной ЧКХ тракта ДЗЗ и*

**ослабление степени регуляризации сингулярностей ЧКХ обобщенными функциями**

Достижимая степень «прямоугольности» огибающей ЧКХ, получаемой по «входу-выходу» тракта при коррекциях резкости определяется технологическим совершенством операций в тракте (рисунки 1 и 2). При этом и для трактов с превентивными мерами по «улучшению» их работы (например, для аппаратов, поддерживающих технологии сверхвысокого разрешения) можно на сформированном изображении иметь на итеративной деконволюции пропущенные лучшие результаты, как это показано в работе [8] при дальнейшем улучшении резкости. Такое возможно, когда удельное на шаг итерации и метризованное изменение корректируемого изображения станет экстремальным, а глобальный экстремум (существующий объективно и для континуального множества состояний корректируемого изображения) попадет на область возможных более детальных подшагов в итерациях.

В работах [2,3] по специальной коррекции резкости (СКР) строится деконволюция (решение интегральных уравнений Фредгольма) с использованием модифицированных фильтров Винера, т.е. спектральных представлений оператора деконволюции (СПОД). Минимизируя невязку обратной оптимизированной частотно-контрастной характеристики тракта зондирования (ЧКХ)<sup>-1</sup> и СПОД на этапах итеративного процесса коррекции, можно определить сходящуюся к минимальной норме последовательность частотно-зависимых параметров возмущения СПОД, сводя «остаточную» ФРТ к апертуре пиксела по технологии возмущения операторов в гильбертовых пространствах. Оптимизация ЧКХ проводится минимизацией функционалов, сформулированных на требованиях:

- отсутствия тенденции спада и роста аппликата ЧКХТ вплоть до приближения к высшим спектральным модам в заданных пределах; максимальной гладкости ЧКХ;
- наиболее крутого спада ЧКХТ в области высшей спектральной моды тракта;
- мажорирования огибающей ЧКХТ огибающую СПОД<sup>-1</sup> даже с возмущающей добавкой;
- вписывания огибающей спектрального представления наблюдаемого на изображении линеаментов или границы в огибающую ЧКХ;
- не превышения значением порядка градиентного оператора порога, при котором

резидентно присутствуют глобальное контрастирование или выделение контуров.

Однако необходимо учитывать и строить обработку с сингулярными значениями в оптимизируемой ЧКХ. Возникают они достаточно часто, так как в знаменателе выражения для синтеза ЧКХ ПЧС первично откорректированного изображения имеет достаточное количество нулей. Применяемые в практике аналогичных операций со спектрами методы регуляризации приводят всегда к близкому к «истине» решению, которое не всегда попадает в интервал отклонений от «истины», лежащий в области пространственных частот за пределами соответствующих возможностей окна пропуска трактоном зондирования [9].

В работе упоминаемые сингулярности представляются обобщенными сингулярными функциями медленного роста Шварца (с носителем меры нуль) [10]. При этом интегралы Римана во всех выражениях преобразуются в интегралы Лебега при аналитическом интегрировании (с предварительной функционализацией интегрируемого массива), а при численном интегрировании сингулярности представляются моделями обобщенных функций, сингулярных на мере нуль, т.е. предельно возможным узким параллелепипедом в верхней и нижней сумме Дарбу для интеграла.

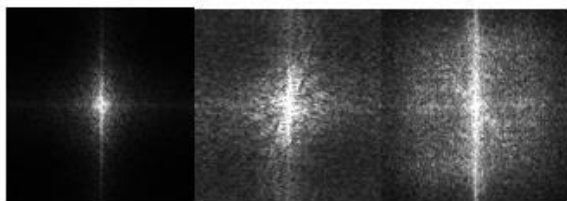
В итоговом итеративном соотношении Ван-Циттера, интеграл в обратном преобразовании Фурье выражения является интегралом Лебега.

При увеличении высоты параллелепипеда в модели сингулярности или надо предельно уменьшать его ширину, что невозможно, т.к. не найдется пикселей с предельно малыми апертурами или соглашаться с возникающими артефактами в виде различных искажений контраста на изображении. В работе рост высоты моделируемой сингулярности ограничен десятикратным значением динамического диапазона изображений и спектров, представленных трактом зондирования. Ниже, на изображении со спутника сверхвысокого разрешения OrbView-3 показаны проведенные вычислительные эксперименты по применению разработанной методики (рисунок 4): верхний ряд – изображения, нижний ряд – их ПЧС.

Полученный конечный и перешагиваемый при итеративной деконволюции ранее результат по резкости показывает увеличение резкости в 2 раза (по критерию Фуко). Очевидно, может быть результат и лучше, но конечность и фиксированность апертур пикселей на паттерне не позволяет дальнейшего развития в этом плане.

Восстановление пропущенного результата осуществлялось уточнением ухода СДИ на изображении от запрограммированного значения и, соответственно, вычислением и компенсацией остаточного смаза: при обработке изображения (центрального на рисунке 4) обобщенным градиентным оператором малого порядка до появления характерного спектра зарождающегося контрастирования [2] определяется величина обратная разности радиусов спектров до обработки и после. Это и есть остаточный смаз и ошибка позиционирования для СДИ. Все остальные параметры спутника для контроля запрограммированной СДИ и полученной разницы берутся из орбитальных таблиц КА.

Существенное замечание: процедура коррекции СДИ и процедура СКР некоммутативны, т.к. именно от коррекции СДИ зависят устанавливаемые параметры процедуры СКР, поэтому результат СКР в центре рисунка 4 не только не экстремален, но и менее достоверен.



*Рис. 4. Слева направо исходный паттерн, обработанный в технологии СКР с учетом достоверности ФРТ и далее обработанный в*

*технологии СКР с ослаблением степени регуляризации сингулярностей ЧКХ и с восстановлением лучшего результата по резкости за счет уточнения СДИ*

*Fig. 4. From left to right of the original pattern, processed in the technology of RCDS, taking into account the reliability of the TRF, and further processed in the technology of the TRF with the weakening of the degree of regularization of the singularities of the MTF and with the restoration the best result in sharpness at the expense of clarification of the DNS*

### **Заключение**

В работе представлены два альтернативных метода коррекции резкости на изображении высокого разрешения до экстремальных значений резкости для заданного тракта ДЗЗ, имеющие строго ограниченную область использования – на постфактум сформированном изображении. В литературе нет данных о выводах из их применения для реализации согласованной

соответствующей модернизации модулей приведенных крейсерских диаграмм полной обработки текущих формируемых «орбитально» изображений (хотя бы потому, что в представленном виде диаграммы публикуются впервые).

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-07-00171 "Разработка теоретических основ методов моделирования и алгоритмов представления в обобщенных операциях трактов преобразования дистанционных данных с максимизацией эффективности обработки информации (цифровых космических изображений)" и научного проекта № 16-07-00177 "Разработка теоретических основ методов моделирования реализации предельно достижимых характеристик сверхвысокого пространственного и спектрального разрешения в стволах дистанционного зондирования с космических платформ"*

### **Список литературы**

1. Бейтс Р., Мак-Доннел М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989. 336 с.
2. Адаптивное восстановление резкости на цифровых космических изображениях / Винтаев В.Н., Жиленев М.Ю., Маторин С.И., Ушакова Н.Н., Щербинина Н.В. // Журнал РАН «Информационные технологии и вычислительные системы». 2014. №4. С. 33-43.
3. Специальная коррекция в процедурах регуляризации и итеративных процессах уменьшения размеров пятна функции рассеяния точки на космических изображениях / Константинов И.С., Щербинина Н.В., Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н. // Научные ведомости БелГУ. 2014. № 15(186). С. 166–175.
4. Кузнецов П.К., Семавин В.И., Солодуха А.А. Алгоритм компенсации скорости смаза изображения подстилающей поверхности, получаемого при наблюдении Земли из космоса // Вестник Самарского гос. технического университета. 2005. № 22. С. 150-157.
5. Жиленев М.Ю., Винтаев В.Н. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой // Телекоммуникации (TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING). 2011. № 7. С.2-7.
6. Цибанов В.Н. Регуляризирующие методы фильтрации и восстановления изображений: Дисс. на соискание ученой степени канд. физ.мат. наук. Москва, 2008. 113 с.
7. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. М.: Техносфера, 2010. 560 с.
8. Винтаев В.Н., Ушакова Н.Н., Жиленев М.Ю. Обобщенные операции для специальной коррекции космических изображений высокого разрешения и поддержка функциональной полноты специальной коррекции // В кн.: Новейшие концепции

фундаментальных и прикладных научных исследований: опыт, традиции, инновации, эффективная стратегия развития. Материалы международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 2015. С. 72-80.

9. Ушакова Н.Н. Коррекция цифровых космических изображений на основе верифицирующего моделирования: Дисс. на соискание ученой степени канд. техн. наук. Белгород, 2004. 255 с.

10. Владимиров В.С. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1967. – 436 с.

#### References

1. Beits R., Mak-Donnel M. Restoration and Reconstruction of Images. Moscow: Mir, 1989. 336 p.

2. Adaptive Acuity Restoration in Digital Space Images. The Russian Academy Journal of Information Technologies and Computer Systems. 2014. №4. Pp. 33-43.

3. Applying Special Correction in Regularization Procedure and Iterative Processes of Space Images Point Spread Function Spot Diminution. Nauchnye vedomosti BelGU. 2014. No 15(186). Pp. 166-175.

4. Kuznecov P.K., Semavin V.I., Soloduha A.A. Compensation Image Blurring Speed Algorithm of the Underlying Surface, Received under the Supervision the

Earth from Space. Vestnik Samarskogo gos. tehničeskogo universiteta. 2005. No 22. Pp. 150-157.

5. Zhilenev M.U., Vintaev V.N. The Formula for Calculating the Image Motion of the Planets with Orbital Shooting Optoelectronic Equipment. Telecommunications (TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING). 2011. No 7. Pp.2-7.

6. Cibanov V.N. Regularization Methods of Filtering and Image Restoration: Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. fiz.mat. nauk. Moscow, 2008. 113 p.

7. Shovengerdt R.A. Remote Sensing. Imaging Methods and Models. Moscow: Tehnosfera, 2010. 560 p.

8. Vintaev V.N., Ushakova N.N., Zhilenev M.U. Generic Operations for Special Correction of Space Images of High Resolution and Support of Functional Completeness Special Correction. V kn.: Novejšie koncepcii fundamental'nyh i prikladnyh nauchnyh issledovanij: opyt, tradicii, innovacii, jeffektivnaja strategija razvitija. Materialy mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii. St. Petersburg, 2015. Pp. 72-80.

9. Ushakova N.N. Correction of Digital Space Images on the Basis of Verified Simulation: Diss. na soiskanie uchenoj stepeni kand. tehn. nauk. Belgorod, 2004. 255 p.

10. Владимиров В.С. Equations of mathematical physics. Moscow: Nauka, 1967. 436 p.