

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

5(90)/2017

5(90)/2017

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

REFEREED EDITION

**Founder**

«Information and Control Systems», Ltd.

**Publisher**Saint-Petersburg State University  
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

M. Sergeev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

**Deputy Editor-in-Chief**

E. Krouk

Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia

**Executive secretary**

O. Muravtsova

**Editorial Council**

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

L. Chubraeva

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

V. Kozlov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Meyer

Dr. Sc., Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Y. Podoplyokin

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Yu. Shokin

RAS Academician, Dr. Sc., Phys.-Math., Novosibirsk, Russia

V. Simakov

Dr. Sc., Tech., Professor, Moscow, Russia

V. Vasilev

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

R. Yusupov

RAS Corr. Member, Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

**Editorial Board**

V. Anisimov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

B. Bezruchko

Dr. Sc., Phys.-Math., Saratov, Russia

N. Blaunstein

Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Beer-Sheva, Israel

A. Dudin

Dr. Sc., Tech., Professor, Minsk, Belarus

I. Dumer

PhD., Professor, Riverside, USA

V. Khimenko

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Maltsev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

G. Matvienko

Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, Tomsk, Russia

V. Melekhin

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shalyto

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Shelupanov

Dr. Sc., Tech., Professor, Tomsk, Russia

A. Shepeta

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Smirnov

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

Z. Yuldashev

Dr. Sc., Tech., Professor, St. Petersburg, Russia

A. Zeifman

Dr. Sc., Phys.-Math., Vologda, Russia

**Editor:** A. Larionova**Proofreader:** T. Zvertanovskaia**Design:** M. Chernenko, A. Koleshko**Layout and composition:** J. Umnitsina**Contact information**

The Editorial and Publishing Center, SUAI

67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [i-us.spb@gmail.com](mailto:i-us.spb@gmail.com)

Tel.: +7 - 812 494 70 02

The Journal was registered in the Ministry of Press, Broadcasting and Mass Media of the Russian Federation. Registration Certificate JD № 77-12412 from April, 19, 2002. Re-registration in the Federal Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information Technologies and Mass Communications (ROSKOMNADZOR) due to change of the founder: «Information and Control Systems», Ltd., JD № FS77-49181 from March, 30, 2012.

© Corporate authors, 2017

**THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS**

**Balotin N. A., Balotin Y. N., Đoković D. Ž., Karbovskiy D. A., Sergeev M. B.** Construction of Symmetric Hadamard Matrices 2

**Gorshkov A. A., Ossadtchi A. E., Fradkov A. L.** Regularization of EEG/MEG Inverse Problem with a Local Cortical Wave Pattern 12

**Furtat I. B.** Algorithm for Compensation of Measurement Noises and Disturbances 21

**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL**

**Velichko A. N., Budkov V. Y., Karpov A. A.** Analytical Survey of Computational Paralinguistic Systems for Automatic Recognition of Deception in Human Speech 30

**Buryachenko V. V., Favorskaya M. N., Zotin A. G., Pahirka A. I.** Restoration of Frame Borders under Stabilization based on Background Model Building and Salient Objects Estimation 42

**Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I.** Technology of Making Depth Maps for Still Images 52

**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS**

**Burakov M. V., Shishlakov V. F.** Fuzzy Control of Solar Power Plant 62

**SYSTEM AND PROCESS MODELING**

**Romanovskii O. A., Sukhanov A. Ya., Kharchenko O. V., Yakovlev S. V., Sadovnikov S. A.** Simulation of Remote Atmospheric Sensing by a Laser System based on Optical Parametric Oscillator 71

**Shilov N. G., Schekotov M. S.** Ontological Modelling of State Machines for Cyberphysical System Services 80

**Isakov V. I., Shepeta D. A.** Simulation of Radar Signals Reflected from the Edge of Land and Sea 89

**INFORMATION SECURITY**

**Novikova E. S., Bekeneva Ya. A., Shorov A. V., Fedotov E. S.** A Survey of Security Event Correlation Techniques for Cloud Computing Environment Security 95

**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS**

**Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Sitnikova E. Yu., Koronovskii A. A., Hramov A. E.** Removing Oculomotor Artifacts in Human EEG during Ambiguous Image Recognition 105

**BRIEF SCIENTIFIC REPORTS**

**Lyandres V.** Compound Model of Fading 113

**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS**

116

Submitted for publication 05.09.17. Passed for printing 21.10.17. Format 60×84<sub>1/8</sub>.  
 Phototype SchoolBookC. Digital printing.

Layout original is made at the Editorial and Publishing Center, SUAI.  
 67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia  
 Printed from slides at the Editorial and Publishing Center, SUAI.  
 67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue: № 15385 — semiannual subscript.

5(90)/2017

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-  
УПРАВЛЯЮЩИЕ  
СИСТЕМЫУчредитель  
ООО «Информационно-управляющие системы»Издатель  
Санкт-Петербургский государственный университет  
аэрокосмического приборостроенияГлавный редактор  
М. Б. Сергеев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФЗам. главного редактора  
Е. А. Крук,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФОтветственный секретарь  
О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
В. Н. Васильев,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФВ. Н. Козлов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
К. Кристодолу,  
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, СШАБ. Мейер,  
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария  
Ю. Ф. Подоплёкин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФВ. В. Симаков,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ  
Л. Фортуна,  
д-р наук, проф., Катания, ИталияА. Л. Фрадков,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Л. И. Чубраева,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФЮ. И. Шокин,  
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ  
Р. М. Юсупов,  
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФРедакционная коллегия:  
В. Т. Анисимов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Б. П. Безручко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФН. Блаунштейн,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль  
А. Н. Дудин,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, БеларусьИ. И. Думер,  
д-р наук, проф., Риверсайд, США  
А. И. Зейфман,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФГ. Н. Мальцев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
Г. Г. Матвиенко,  
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФВ. Ф. Мелехин,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФВ. И. Хименко,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ  
А. А. Шальто,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФА. А. Шелупанов,  
д-р техн. наук, проф., Томск, РФ  
А. П. Шепета,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФЗ. М. Юлдашев,  
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФРедактор: А. Г. Ларионова  
Корректор: Т. В. Звертановская  
Дизайн: М. Л. Черненко, А. Н. Колешко  
Компьютерная верстка: Ю. В. УмницынаАдрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Тел.: (812) 494-70-02, эл. адрес: ius.spb@gmail.com,  
сайт: http://i-us.ruЖурнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,  
телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.  
Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.Перерегистрирован в Роскомнадзоре.  
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС77-49181 от 30 марта 2012 г.Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,  
в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертации  
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

© Коллектив авторов, 2017

## ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

- Balonin N. A., Balonin Y. N., Đoković D. Ž., Karbovskiy D. A., Sergeev M. B.* Construction of Symmetric Hadamard Matrices 2
- Горшков А. А., Осадчий А. Е., Фрадков А. Л.* Регуляризация обратной задачи ЭЭГ/МЭГ локальным кортикальным волновым паттерном 12
- Фуртат И. Б.* Алгоритм компенсации помех измерения и возмущений 21

## ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

- Величко А. Н., Будков В. Ю., Карпов А. А.* Аналитический обзор компьютерных паралингвистических систем для автоматического распознавания лжи в речи человека 30
- Буряченко В. В., Фаворская М. Н., Зотин А. Г., Пахирка А. И.* Восстановление границ кадра при стабилизации на основе построения модели фона и оценки значимости объектов 42
- Красильников Н. Н., Красильникова О. И.* Технология изготовления карт глубины для неподвижных изображений 52

## ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

- Бураков М. В., Шишлаков В. Ф.* Нечеткое управление солнечной батареей 62

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

- Романовский О. А., Суханов А. Я., Харченко О. В., Яковлев С. В., Садовников С. А.* Моделирование дистанционного газоанализа атмосферы лазерной системой на основе параметрического генератора света 71
- Шилов Н. Г., Щекотов М. С.* Онтологическое моделирование управляющих автоматов сервисов киберфизических систем 80
- Исаков В. И., Шепета Д. А.* Моделирование локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море 89

## ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

- Новикова Е. С., Бекенева Я. А., Шоров А. В., Федотов Е. С.* Обзор алгоритмов корреляции событий безопасности для обеспечения безопасности облачных вычислительных сред 95

## УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

- Руннова А. Е., Журавлев М. О., Ситникова Е. Ю., Короновский А. А., Храмов А. Е.* Метод удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ человека при распознавании неоднозначного зрительного образа 105

## КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

- Lyandres V.* Compound Model of Fading 113

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

116

Сдано в набор 05.09.17. Подписано в печать 21.10.17. Формат 60×84<sup>1/8</sup>.  
Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 14,3. Уч.-изд. л. 19,8. Тираж 1000 экз (1-й завод 140 экз). Заказ № 446.  
Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.  
Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить  
через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:  
№ 15385 — полугодовой индекс.

UDC 519.614

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.2

## CONSTRUCTION OF SYMMETRIC HADAMARD MATRICES

**N. A. Balonin<sup>a</sup>**, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ru

**Y. N. Balonin<sup>a</sup>**, Research Fellow, tomaball@mail.ru

**D. Ž. Đoković<sup>b</sup>**, PhD, Distinguished Professor Emeritus, djokovic@uwaterloo.ca

**D. A. Karbovskiy<sup>a</sup>**, Bachelor, alra@inbox.ru

**M. B. Sergeev<sup>a</sup>**, Dr. Sc., Tech., Professor, mbsn@mail.ru

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>University of Waterloo, Department of Pure Mathematics and Institute for Quantum Computing, Waterloo, Ontario, N2L 3G1, Canada

**Purpose:** To investigate more fully, than what was done in the past, the construction of symmetric Hadamard matrices of “propus type”, a symmetric variation of the Goethals – Seidel array characterized by necessary symmetry of one of the blocks and equality of two other blocks out of the total of four blocks. **Methods:** Analytic theory of equations for parameters of difference families used in the propus construction of symmetric Hadamard matrices, based on the theorems of Liouville and Dixon. Numerical method, due to the authors, for the search of two or three cyclic blocks to construct Hadamard matrices of two-circulant or propus type. This method speeds up the classical search of required sequences by distributing them into different bins using a hash-function. **Results:** A wide collection of new symmetric Hadamard matrices was obtained and tabulated, according to the feasible sets of parameters. In addition to the novelty of this collection, we have obtained new symmetric Hadamard matrices of orders 92, 116 and 156. For the order 156, no symmetric Hadamard matrices were known previously. **Practical relevance:** Hadamard matrices are used extensively in the problems of error-free coding, compression and masking of video information. Programs for search of symmetric Hadamard matrices and a library of constructed matrices are used in the mathematical network “Internet” together with executable on-line algorithms.

**Keywords** – Symmetric Hadamard Matrices, Goethals – Seidel Array, Propus Construction, Cyclic Difference Families.

### Introduction

In this paper we investigate some special features of symmetric Hadamard matrices. Let us recall that a Hadamard matrix is a  $\{1, -1\}$ -matrix  $\mathbf{H}$  of order  $n$  whose columns (or rows) are mutually orthogonal

$$\mathbf{H}^T \mathbf{H} = \mathbf{H} \mathbf{H}^T = n \mathbf{I}, \quad (1)$$

where  $\mathbf{I}$  is the identity matrix. This definition is due to Hadamard [1], who pointed out the extremal property of the solutions of this quadratic equation (these matrices have the maximal possible absolute value of determinant among all complex matrices whose entries have modulus at most 1), and also the possibility that such matrices exist for all orders  $n = 4v$ ,  $v$  integer.

As a rule, the search for Hadamard matrices is simplified by using special arrays, built from circulant blocks, i. e., matrices generated by cyclic shifts of the top row. As an example, we can mention the Williamson array [2] which makes use of four circulant matrices  $\mathbf{A}$ ,  $\mathbf{B}$ ,  $\mathbf{C}$ ,  $\mathbf{D}$  and their negatives as blocks inside the globally non-symmetric array. The requirement that the blocks be symmetric works in some cases but not always. The first failure of symmetry occurs for size  $v = 35$  [3]. More such examples were found later, see the paper [4].

This problem was circumvented by Goethals and Seidel [5] who invented a new array, now known as Goethals – Seidel array or just GS-array, see (5) below. This array does not require any of the four circulant blocks to be symmetric. That is its major advantage. If at least one of the blocks is of skew type, then one can rearrange the blocks to obtain a skew-Hadamard matrix. Ever since this array has played a very important role in the construction of Hadamard matrices and skew-Hadamard matrices.

However, a tool of similar nature for the construction of symmetric Hadamard matrices was lacking. Such a tool was invented recently by J. Seberry and N. A. Balonin [6]. They introduced a simple variation of the GS-array to which we refer as the *Propus array*, see (6) below. In the paper [6] it is shown that the symmetry of the array can be easily achieved by demanding that the block  $\mathbf{A}$  be symmetric and that among the remaining three blocks two of them are equal, say  $\mathbf{B} = \mathbf{C}$  (an analog of partial symmetry). This tool has been already used to construct symmetric Hadamard matrices of new orders [6, 7].

Since the size of a Hadamard matrix or a skew symmetric Hadamard matrix can always be doubled, while preserving the type of the matrix, it suffices to construct these matrices for orders  $4v$  with  $v$  odd. We show (see Theorem 1) that for every odd integer  $v$  there exists at least one propus parameter set. Taking this into account, the Propus array can be

used, conjecturally, to obtain symmetric Hadamard matrices of order  $4v$  for all odd  $v$ . However there exists a propus parameter set for which there is no cyclic propus family. So far we have only one such example namely  $(25; 10, 10, 10, 10; 15)$ .

Our purpose is to develop effective numerical algorithms for the search of symmetric Hadamard matrices and subsequent analysis of them and to obtain new orders of such matrices. All matrix solutions are classified by using the table of all feasible parameter sets in the range of odd  $v < 50$ . We point out some peculiarities arising from this table. For instance, apart from the Turyn infinite series in which all four circulant blocks are symmetric, there is only one case known so far (namely  $v = 13$ ), where there exist a propus family with both blocks **A** and **D** symmetric, and satisfying  $\mathbf{B} = \mathbf{C}$  as well.

This paper continues the investigation of the theme of symmetry, considered in the papers [8, 9], and in particular we present for the first time symmetric Hadamard matrices of order 156. In this way, the orders 92, 116, 156, 172 listed as exceptions in [10, Table 1.52, p. 277] are all covered by the propus construction. The next unsolved case is the order 188 which is the object of our further research.

### Preliminaries

Let  $G$  be a finite abelian group of order  $v$  written additively. A sequence  $(X_1, X_2, \dots, X_m)$  of subsets of  $G$  is a *difference family* if there exists a nonnegative integer  $\lambda$  such that for any nonzero element  $a \in G$  there are exactly  $\lambda$  triples  $(x, y, i) \in X_i \times X_i \times \{1, 2, \dots, m\}$  such that  $x - y = a$ . In that case we say that this difference family has *parameters*  $(v; k_1, k_2, \dots, k_m; \lambda)$ , where  $k_i = |X_i|$  is the cardinality of  $X_i$  and that the  $X_i$  are its *base blocks*. A simple counting argument shows that the parameter set of a difference family must satisfy the equality

$$\sum_i k_i(k_i - 1) = \lambda(v - 1). \tag{2}$$

If  $G$  is a cyclic group, we say that the difference families of  $G$  are *cyclic*.

Although the concepts defined below can be defined over arbitrary finite abelian groups, we shall assume in this paper that  $G$  is a cyclic group of order  $v$  and we identify it with the additive group of the ring of integers  $\mathbf{Z}_v = \mathbf{Z}/v\mathbf{Z} = \{0, 1, \dots, v - 1\}$  modulo  $v$ . We are interested in the difference families consisting of four base blocks having the parameter set  $(v; k_1, k_2, k_3, k_4; \lambda)$  such that

$$\lambda = \sum_i k_i - v. \tag{3}$$

For convenience, we shall refer to these parameter sets as *GS-parameter sets* and to the difference

families having these parameters as *GS-difference families*. It is a folklore conjecture that for each GS-parameter set there exists a cyclic difference family with these parameters.

There is a close relationship between GS-difference families and the quadruples of  $\{\pm 1\}$ -sequences (also known as *binary sequences*) of length  $v$  whose periodic autocorrelation functions add up to 0 (except at the origin). Let us recall some relevant definitions.

Let  $A = (a_0, a_1, \dots, a_{v-1})$  be an integer sequence of length  $v$ . We view the indices  $0, 1, \dots, v - 1$  as elements of  $\mathbf{Z}_v$ . The *periodic autocorrelation function* of  $A$  is the function  $\text{PAF}_A: \mathbf{Z}_v \rightarrow \mathbf{Z}$  defined by

$$\text{PAF}_A(s) = \sum_{i=0}^{v-1} a_i a_{i+s}. \tag{4}$$

(The indices should be reduced modulo  $v$ .) To  $A$  we associate the cyclic matrix  $\mathbf{C}$  whose first row is  $A$  itself. We say that  $A$  is *symmetric* resp. *skew* if  $a_i = a_{v-i}$  resp.  $a_i = -a_{v-i}$  for  $i = 1, 2, \dots, v - 1$ . Equivalently,  $A$  is symmetric if and only if  $\mathbf{C}$  is a symmetric matrix, and  $A$  is skew if and only if  $\mathbf{C} + \mathbf{C}^T = 2a_0\mathbf{I}_v$ , where  $T$  denotes the transpose and  $\mathbf{I}_v$  the identity matrix of order  $v$ .

To any subset  $X \subseteq \mathbf{Z}_v$  we associate the binary sequence  $A = (a_0, a_1, \dots, a_{v-1})$ , where  $a_i = -1$  if and only if  $i \in X$ . Let  $(X_1, X_2, X_3, X_4)$  be a quadruple of subsets of  $\mathbf{Z}_v$  with  $|X_i| = k_i$  and let  $(A_1, A_2, A_3, A_4)$  be their associated binary sequences, respectively. Then it is well known that the  $X_i$  form a difference family whose parameter set satisfies the equation (3) if and only if the periodic autocorrelation functions of the  $A_i$  add up to 0 (except at the origin).

Let  $(A_1, A_2, A_3, A_4)$  be a quadruple of binary sequences of length  $v$  whose PAF-functions add up to 0, and let  $(\mathbf{C}_1, \mathbf{C}_2, \mathbf{C}_3, \mathbf{C}_4)$  be their associated cyclic matrices. Then by plugging these matrices into the Goethals — Seidel array:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2\mathbf{R} & \mathbf{C}_3\mathbf{R} & \mathbf{C}_4\mathbf{R} \\ -\mathbf{C}_2\mathbf{R} & \mathbf{C}_1 & -\mathbf{RC}_4 & \mathbf{RC}_3 \\ -\mathbf{C}_3\mathbf{R} & \mathbf{RC}_4 & \mathbf{C}_1 & -\mathbf{RC}_2 \\ -\mathbf{C}_4\mathbf{R} & -\mathbf{RC}_3 & \mathbf{RC}_2 & \mathbf{C}_1 \end{bmatrix}, \tag{5}$$

we obtain a Hadamard matrix of order  $4v$ . The matrix  $\mathbf{R}$  in (5) is the back-circulant identity matrix of order  $v$ :

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \dots & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

This is a very powerful method of construction of Hadamard matrices. If  $A_1$  is skew then  $\mathbf{H}$  will be a Hadamard matrix of *skew type* (*skew-Hadamard matrix*), i. e., a Hadamard matrix such that  $\mathbf{H} + \mathbf{H}^T = 2\mathbf{I}_{4v}$ .

It was recently observed in [6] that (after a small twist) one can make use of the GS-array to construct also the symmetric Hadamard matrices. Namely, if we multiply the first column of (5) by  $-1$  and switch the second and third rows then we obtain the new array, to which we refer as the *propus array*:

$$\begin{bmatrix} -\mathbf{C}_1 & \mathbf{C}_2\mathbf{R} & \mathbf{C}_3\mathbf{R} & \mathbf{C}_4\mathbf{R} \\ \mathbf{C}_3\mathbf{R} & \mathbf{RC}_4 & \mathbf{C}_1 & -\mathbf{RC}_2 \\ \mathbf{C}_2\mathbf{R} & \mathbf{C}_1 & -\mathbf{RC}_4 & \mathbf{RC}_3 \\ \mathbf{C}_4\mathbf{R} & -\mathbf{RC}_3 & \mathbf{RC}_2 & \mathbf{C}_1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

This is still a Hadamard matrix. In the special case when  $A_1$  is symmetric and  $A_2 = A_3$  this matrix is a symmetric Hadamard matrix. We say that a GS-parameter set  $(v; k_1, k_2, k_3, k_4; \lambda)$  is a *propus parameter set* if  $k_2 = k_3$ , and we say that a difference family  $(X_1, X_2, X_3, X_4)$  having such parameter set is a *propus family* if  $X_2 = X_3$  and the set  $X_1$  or  $X_4$  is symmetric.

To summarize, in order to construct a symmetric Hadamard matrix of order  $4v$  it suffices to construct a propus difference family  $(X_1, X_2, X_3, X_4)$  in  $\mathbf{Z}_v$ . All symmetric Hadamard matrices constructed in this paper use this method. We conjecture that for  $v$  odd this method is universal, i. e., for each odd  $v > 1$  there exists a propus difference family in  $\mathbf{Z}_v$ . Theorem 1 below made this conjecture possible.

### Existence of Parameter Sets

In this section we prove the following theorem.

**Theorem 1.** *For any odd positive integer  $v > 1$  there exists a propus parameter set  $(v; x, y, z; \lambda)$  with  $x, y, z < v/2$ .*

Let us first recall an old result of Liouville. If  $x$  is an indeterminate, the polynomial  $T_x = x(x + 1)/2$  takes nonnegative integer values at integer points. These values are known as *triangular numbers*. The *ternary triangular form* is a polynomial  $aT_x + bT_y + cT_z$ , where the coefficients  $(a, b, c)$  are positive integers and  $x, y, z$  are commuting indeterminates. Such form is said to be *universal* if it represents all positive integers, i. e., each positive integer is the value of this form at some point  $(x_0, y_0, z_0) \in \mathbf{Z}^3$ . Since  $T_{-x} = T_{x-1}$ , we can assume that  $x_0, y_0, z_0$  are nonnegative. Liouville has proved in 1863 [11] that there are exactly seven universal ternary triangular forms, assuming that  $a \leq b \leq c$ . These forms have the coefficients

(1, 1, 1), (1, 1, 2), (1, 1, 4), (1, 1, 5), (1, 2, 2), (1, 2, 3), (1, 2, 4).

This theorem of Liouville generalizes a result of Gauss who proved earlier the universality in the case  $a = b = c = 1$ . We shall use below the fact that the triangular form with coefficients  $a = b = 1, c = 2$  is universal.

*Proof:* The block sizes  $x, y, z$  of our parameter set satisfy the equation

$$x(x - 1) + 2y(y - 1) + z(z - 1) = \lambda(v - 1). \quad (7)$$

As  $\lambda = x + 2y + z - v$  this equation can be written as

$$(v - 2x)^2 + 2(v - 2y)^2 + (v - 2z)^2 = 4v. \quad (8)$$

Since  $v$  is odd, we have  $v - 2x = 2p + 1, v - 2y = 2q + 1, v - 2z = 2r + 1$ , where  $p, q, r$  are integers. Then the above equation becomes

$$T_p + 2T_q + T_r = (v - 1)/2. \quad (9)$$

By Liouville's result mentioned above, there exist integers  $p, q, r$  satisfying this equation. Hence, there exist integers  $x, y, z$  satisfying the equation (8). If  $x < 0$  then  $v - 2x > v$  and the equation (8) implies that  $4 > v - 2x$ . This contradicts our hypothesis that  $v \geq 3$ . We conclude that  $x \geq 0$ . Similarly, we can show that  $y, z \geq 0$ . The equation (7) implies now that  $x + 2y + z - v > 0$ . Hence the theorem is proved.

In Appendix we list the propus parameter sets  $(v; x, y, z; \lambda)$  for odd  $v, 1 < v < 50$ . They are computed by solving the equation (9) for each of these values  $v$ . Since we can replace any base block by its complement and permute the blocks, we shall assume that  $x, y, z \leq (v - 1)/2$  and  $x \geq z$ .

For the sake of completeness, let us consider the case when  $v$  is even. The result here is quite different, there is an arithmetic condition which rules out the existence of propus parameter sets for some even values of  $v$ .

**Theorem 2.** *For even positive integer  $v$  there exists a propus parameter set  $(v; x, y, z; \lambda)$  with  $x, y, z \leq v/2$  if and only if  $v$  does not have the form  $2^{2k+1}(8m + 7)$ , where  $k$  and  $m$  are nonnegative integers.*

*Proof:* The equation (8) is valid also in this case, i. e., when  $v$  is even. Then we have  $v - 2x = 2p, v - 2y = 2q, v - 2z = 2r$ , where  $p, q, r$  are integers. Hence, the equation (8) can be written as  $p^2 + 2q^2 + r^2 = v$ . By a theorem of Dixon [12, Theorem V], this equation has no integral solution if and only if  $v$  has the form  $2^{2k+1}(8m + 7)$ . One can now easily complete the proof.

For instance, this theorem rules out the integers  $v = 14, 30, 46, 56, 62, 78, 94$ , i. e., there are no propus parameter sets with these values of the parameter  $v$ .

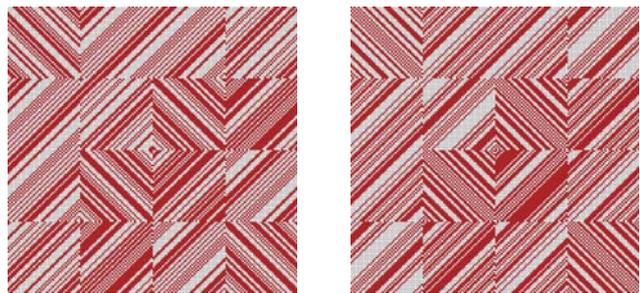
**Symmetric Hadamard Matrices of Order  $4 \cdot 39$**

The smallest order  $4v$  for which no symmetric Hadamard matrix was known prior to this work is  $156 = 4 \cdot 39$ . There are two propus parameter sets  $(39; 17, 17, 17, 15; 27)$  and  $(39; 18, 16, 16, 16; 27)$  that can be used to construct such matrices, as in Fig. 1.

We have constructed many such matrices, but here we record only five pairwise non-equivalent propus families for each parameter set.

For the first parameter set, the block  $A$  is symmetric in the first four families while  $D$  is symmetric in the last family:

- $(39; 17, 17, 17, 15; 27)$
- $[0, 2, 4, 7, 8, 12, 13, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 31, 32, 35, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 10, 14, 17, 18, 19, 21, 24, 26, 27, 30, 32, 36, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 10, 14, 17, 18, 19, 21, 24, 26, 27, 30, 32, 36, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 4, 5, 9, 11, 12, 15, 26, 29, 31, 33, 36];$
- $[0, 2, 6, 8, 9, 12, 13, 18, 19, 20, 21, 26, 27, 30, 31, 33, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10, 14, 15, 17, 18, 19, 24, 28, 34, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 5, 6, 8, 10, 14, 15, 17, 18, 19, 24, 28, 34, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 5, 10, 13, 16, 17, 18, 22, 24, 25, 28, 33];$
- $[0, 3, 7, 8, 9, 12, 13, 17, 19, 20, 22, 26, 27, 30, 31, 32, 36],$
- $[0, 1, 2, 5, 7, 8, 12, 16, 20, 22, 23, 25, 32, 33, 34, 36, 38],$
- $[0, 1, 2, 5, 7, 8, 12, 16, 20, 22, 23, 25, 32, 33, 34, 36, 38],$
- $[0, 1, 2, 3, 6, 9, 18, 20, 22, 23, 30, 32, 33, 34, 36];$
- $[0, 3, 7, 9, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 25, 26, 30, 32, 36],$
- $[0, 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 15, 18, 20, 24, 28, 29, 31, 33],$



■ Fig. 1. Propus 156 with  $(39; 17, 17, 17, 15; 27)$  and  $(39; 18, 16, 16, 16; 27)$

- $[0, 1, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 10, 15, 18, 20, 24, 28, 29, 31, 33],$
- $[0, 1, 3, 4, 8, 13, 14, 16, 17, 20, 23, 25, 28, 35, 37];$
- $[0, 1, 2, 3, 5, 10, 12, 14, 16, 17, 23, 24, 28, 30, 31, 36, 37],$
- $[0, 1, 2, 4, 9, 10, 12, 13, 17, 18, 22, 24, 27, 30, 32, 33, 37],$
- $[0, 1, 2, 4, 9, 10, 12, 13, 17, 18, 22, 24, 27, 30, 32, 33, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 4, 8, 14, 18, 21, 25, 31, 35, 36, 37, 38].$

For the second parameter set, the block  $A$  is symmetric in the first family while  $D$  is symmetric in the other four families:

- $(39; 18, 16, 16, 16; 27)$
- $[3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 17, 18, 21, 22, 27, 29, 31, 32, 34, 35, 36],$
- $[0, 1, 2, 3, 8, 9, 17, 19, 21, 23, 26, 29, 32, 35, 36, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 8, 9, 17, 19, 21, 23, 26, 29, 32, 35, 36, 37],$
- $[0, 1, 2, 4, 5, 6, 10, 11, 13, 14, 21, 22, 27, 29, 33, 36];$
- $[0, 1, 2, 6, 7, 9, 10, 12, 15, 17, 20, 21, 24, 28, 29, 31, 33, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 7, 13, 18, 20, 21, 24, 27, 28, 32, 34, 36, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 7, 13, 18, 20, 21, 24, 27, 28, 32, 34, 36, 37],$
- $[2, 7, 8, 9, 15, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 24, 30, 31, 32, 37];$
- $[0, 1, 2, 6, 8, 9, 10, 12, 14, 16, 18, 19, 27, 30, 32, 33, 36, 37],$
- $[0, 1, 2, 3, 7, 8, 11, 19, 21, 24, 26, 27, 28, 31, 33, 36],$
- $[0, 1, 2, 3, 7, 8, 11, 19, 21, 24, 26, 27, 28, 31, 33, 36],$
- $[2, 4, 5, 6, 7, 11, 17, 18, 21, 22, 28, 32, 33, 34, 35, 37];$
- $[0, 1, 2, 8, 9, 15, 16, 18, 19, 21, 23, 26, 28, 30, 31, 32, 34, 35],$
- $[0, 1, 2, 5, 6, 14, 17, 20, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 35],$
- $[0, 1, 2, 5, 6, 14, 17, 20, 22, 24, 25, 27, 28, 29, 31, 35],$
- $[1, 7, 10, 11, 12, 13, 17, 19, 20, 22, 26, 27, 28, 29, 32, 38];$
- $[0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 9, 10, 12, 18, 23, 24, 28, 30, 31, 32, 35],$
- $[0, 1, 2, 5, 6, 8, 11, 13, 15, 17, 24, 27, 29, 30, 36, 37],$
- $[0, 1, 2, 5, 6, 8, 11, 13, 15, 17, 24, 27, 29, 30, 36, 37],$

[4, 5, 8, 9, 10, 13, 15, 16, 23, 24, 26, 29, 30, 31, 34, 35].

**Description of the Algorithm**

Let us first describe the algorithm for the search of periodic Golay pairs, a somewhat simpler problem. The search we have in mind is a non-exhaustive search which uses a random number generator to create the sequences.

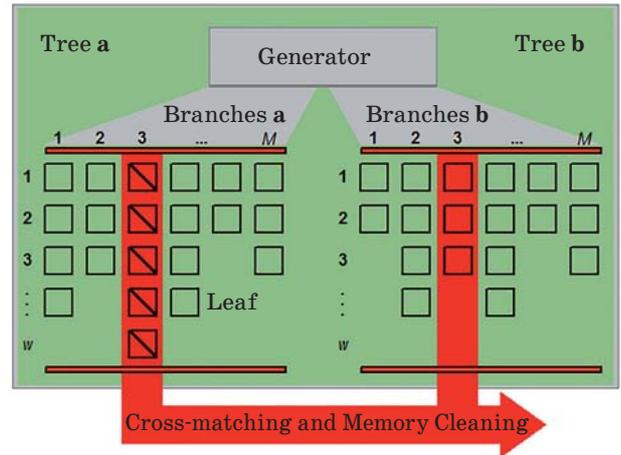
The periodic Golay pairs of length  $v$  are pairs of  $\{\pm 1\}$ -sequences  $\mathbf{a} = (a_0, a_1, \dots, a_{v-1})$  and  $\mathbf{b} = (b_0, b_1, \dots, b_{v-1})$  whose PAF functions have sum 0 except at the origin. (We shall ignore the value of the PAF functions at the origin.) These pairs exist only for even values of  $v$  (excluding the trivial case  $v = 1$ ). The number of indices  $i$  such that  $a_i = -1$  is fixed, and we denote it by  $k_1$ . Similarly,  $k_2$  is the number of  $-1$  terms in  $\mathbf{b}$ . Since the PAF values of a sequence are symmetric, i. e.,  $\text{PAF}_a(s) = \text{PAF}_a(v - s)$  for  $s = 1, 2, \dots, v - 1$ , it suffices to compute and record these values for  $1 \leq s \leq v/2$ .

The very simple and time consuming algorithm can be described as follows. First it generates just one random a-sequence having exactly  $k_1$  terms  $-1$  and computes its PAF function. Next, it computes a bunch of (say  $w$ ) random b-sequences having exactly  $k_2$  terms  $-1$ . At the same time it computes their PAF values and checks whether the sum of the PAF functions of the a-sequence and the b-sequence is 0. (The required memory for this is negligible.) This completes one basic step. This step is then repeated as long as desired.

A more effective algorithm generates a collection of, say,  $w$  binary sequences  $\mathbf{a}$  having exactly  $k_1$  terms  $-1$  and records them together with the PAF values in a table. Another table also of size  $w$  is used to generate and record a collection of binary sequences  $\mathbf{b}$  having exactly  $k_2$  terms  $-1$  and their negated PAF values. The two tables of size  $w$  make it possible to make quickly  $w^2$  comparisons.

The second method performs faster because it computes only  $2w$  sequences (and their PAF values) in order to check  $w^2$  pairs for matching, while  $w$  steps of the simple method has to compute  $w(w + 1)$  sequences to check  $w^2$  pairs for matching. So, the saving is in the number of sequences that one has to generate and compute the PAF values:  $w(w + 1)$  for the brute force method and  $2w$  for the second method.

However, making two big tables is not feasible as the active memory is limited. To handle this problem, one of the authors proposed and implemented the following solution. The tables of data are replaced by trees having a fixed number of branches. Each branch can hold at most  $w$  records of data to which we refer as *leaves* of that branch (Fig. 2). A random number generator is used to generate data and a hash-function,  $f$ , is used to distribute the



■ Fig. 2. Block-scheme of the algorithm

data and store them into the branches. After generating a sequence say  $\mathbf{a}$  and computing its PAF values, the hash function is evaluated at the PAF values which gives the numerical label  $f(\text{PAF}_a)$  of the branch where the data will be stored. In the case of the b-sequence, the PAF values are negated just before storing them into the chosen branch.

If  $f$  takes different values at the functions  $\text{PAF}_a$  and  $-\text{PAF}_b$ , then  $\text{PAF}_a \neq -\text{PAF}_b$ , but the converse fails. Consequently, no comparisons need to be made between the a-leaves and b-leaves belonging to branches having different labels. For that reason, this third method is much more effective than the second one.

A big tree crown of size  $M = 2^m$  gives the function

$$f = \sum_{i=1}^m \text{sing}(\text{PAF}(i)) \cdot 2^{i-1}$$

whose coefficients are the signatures  $\text{sign}(\text{PAF}(i)) \in \{0, 1\}$  of the first  $m$  PAF values. (We take, that 1 corresponds to positive values of the PAF function.) This definition can be modified by using the ternary function  $\text{sign}(\text{PAF}(i)) \in \{0, 1, -1\}$  which distinguishes 0 and the signs of the nonzero PAF values, and adding  $2^m$  if necessary to make the label positive.

Abstract "ideal" hash-function gives strictly uniform distribution of leaves over the branches.

When using binary representation of integers in computer's memory it is beneficial to use logic operations of the iteration formula

$$F = ((F \text{ shl } 1) \text{ or } (F \text{ shr } 31) \text{ and } 1), i = 1, \dots, v/2.$$

The symbols "shl" and "shr" denote left and right shift of the binary code for the indicated amount, the computations begin with the value  $F = 0$  and terminate with the restriction  $f = F \text{ mod } M$ , which guarantees that the size of the crown will be  $M = 2^m$ .

**Parameter Sets for Symmetric Hadamard Matrices**

We list here the propus parameter sets  $(v; x, y, y, z; \lambda)$  with  $v$  odd in the range  $v < 50$  such that  $x, y, z < v/2$  and  $x \geq z$ . The cyclic propus families consisting of four base blocks  $A, B, C, D \subseteq \mathbf{Z}_v$  having sizes  $x, y, y, z$ , respectively, and such that  $B=C$  and either  $A$  or  $D$  is symmetric give symmetric Hadamard matrices of order  $4v$ . If  $x = z \neq y$  then we also include in our list the parameter set  $(v; y, x, x, y; \lambda)$  indicating that the two blocks of size  $x$  are required to be equal. In that case we treat these two parameter sets as different propus parameter sets.

The four base blocks are denoted by  $A, B, C, D$ . In all propus families mentioned below we require that  $B=C$ . If we know that there is such a family with symmetric block  $A$ , we indicate this by the symbol  $A$ , and similarly for the block  $D$ . If we know that there exists a family with both  $A$  and  $D$  symmetric, then we write the symbol  $AD$ . If there are no families with  $A$  or  $D$  symmetric, we write "No" after the parameter set. Finally, the question mark means that the existence of families with  $A$  or  $D$  symmetric remains undecided.

The symbol  $T$  indicates that the parameter set belongs to the Turyn series of Williamson matrices. We note that  $T$  implies  $AD$ . Further, the symbol  $X$  indicates that the parameter set belongs to another infinite series (see [7, Theorem 5]) which is based on the paper [13] of Xia, Xia, Seberry, and Wu. In our list below  $X$  implies  $D$ . More precisely, for a difference family  $A, B, C, D$  in the  $X$ -series two blocks are equal, say  $B=C$ , and one of the remaining blocks is skew, block  $A$  in our list, and the last one is symmetric, block  $D$ . We remark that a difference family in the  $X$ -series gives a skew and a symmetric Hadamard matrix of order  $4v$  (Table).

For odd  $v$  less than 42 there are only two propus parameter sets,  $(5; 1, 2, 2, 1; 1)$  and  $(25; 10, 10, 10, 10; 15)$ , having no cyclic propus difference families. While for the former set this claim can be easily proved, for the latter set it was checked by performing an exhaustive computer search. There is a possibility that a propus family with parameters  $(25; 10, 10, 10, 10; 15)$  may exist in  $\mathbf{Z}_5 \times \mathbf{Z}_5$ .

■ Table of propus paramater sets with odd  $v < 50$

$(3; 1, 1, 1, 0; 0)$	$AD, T, X$	$(5; 1, 2, 2, 1; 1)$	No
$(5; 2, 1, 1, 2; 1)$	$AD, T, X$	$(7; 3, 2, 2, 2; 2)$	$AD, T$
$(7; 3, 3, 3, 1; 3)$	$D, X$	$(9; 3, 3, 3, 3; 3)$	$A, D$
$(9; 3, 4, 4, 2; 4)$	$AD, T$	$(11; 5, 4, 4, 3; 5)$	$A, D, X$
$(13; 4, 6, 6, 4; 7)$	$A, D$	$(13; 5, 5, 5, 4; 6)$	$AD, T$
$(13; 6, 4, 4, 6; 7)$	$AD$	$(13; 6, 6, 6, 3; 8)$	$A, D$
$(15; 6, 7, 7, 4; 9)$	$A, D$	$(15; 7, 5, 5, 6; 8)$	$AD, T, X$
$(17; 6, 7, 7, 6; 9)$	$A, D$	$(17; 7, 6, 6, 7; 9)$	$A, D$
$(17; 8, 7, 7, 5; 10)$	$A, D, X$	$(19; 7, 9, 9, 6; 12)$	$AD, T$

$(19; 8, 8, 8, 6; 11)$	$A, D$	$(19; 9, 7, 7, 7; 11)$	$A, D$
$(21; 9, 8, 8, 8; 12)$	$AD, T$	$(21; 10, 10, 10, 6; 15)$	$A, D, X$
$(23; 9, 10, 10, 8; 14)$	$A, D$	$(23; 10, 11, 11, 7; 16)$	$A, D$
$(25; 9, 12, 12, 9; 17)$	$A, D$	$(25; 10, 10, 10, 10; 15)$	No
$(25; 12, 9, 9, 12; 17)$	$AD, T$	$(25; 12, 10, 10, 9; 16)$	$A, D$
$(25; 12, 11, 11, 8; 17)$	$A, D$	$(27; 11, 13, 13, 9; 19)$	$A, D$
$(27; 12, 11, 11, 10; 17)$	$A, D$	$(27; 12, 12, 12, 9; 18)$	$A, D$
$(27; 13, 10, 10, 12; 18)$	$AD, T, X$	$(29; 11, 13, 13, 11; 19)$	$A, D$
$(29; 13, 11, 11, 13; 19)$	$A, D$	$(31; 13, 13, 13, 12; 20)$	$AD, T$
$(31; 13, 14, 14, 11; 21)$	$A, D$	$(31; 15, 12, 12, 13; 21)$	$A, D$
$(31; 15, 15, 15, 10; 24)$	$A, D$	$(33; 13, 16, 16, 12; 24)$	$A, D$
$(33; 15, 13, 13, 14; 22)$	$A, D$	$(33; 15, 16, 16, 11; 25)$	$A, D$
$(33; 16, 14, 14, 12; 23)$	$A, D, X$	$(35; 16, 15, 15, 13; 24)$	$A, D$
$(35; 17, 16, 16, 12; 26)$	$A, D, X$	$(37; 15, 16, 16, 15; 25)$	$A, D$
$(37; 15, 17, 17, 14; 26)$	$AD, T$	$(37; 16, 15, 15, 16; 25)$	$A, D$
$(37; 16, 18, 18, 13; 28)$	$A, D$	$(37; 17, 17, 17, 13; 27)$	$A, D$
$(37; 18, 15, 15, 15; 26)$	$A, D$	$(39; 17, 17, 17, 15; 27)$	$A, D$
$(39; 18, 16, 16, 16; 27)$	$A, D$	$(41; 16, 20, 20, 16; 31)$	$A, D$
$(41; 18, 19, 19, 15; 30)$	$A, D$	$(41; 20, 16, 16, 20; 31)$	$AD, T, X$
$(43; 18, 21, 21, 16; 33)$	?	$(43; 19, 18, 18, 18; 30)$	?
$(43; 21, 17, 17, 20; 32)$	?	$(43; 21, 19, 19, 16; 32)$	?
$(43; 21, 21, 21, 15; 35)$	$D$	$(45; 18, 21, 21, 18; 33)$	?
$(45; 19, 20, 20, 18; 32)$	$AD, T$	$(45; 21, 18, 18, 21; 33)$	?
$(45; 21, 20, 20, 17; 33)$	?	$(45; 21, 22, 22, 16; 36)$	?
$(45; 22, 19, 19, 18; 33)$	$D, X$	$(47; 20, 22, 22, 18; 35)$	?
$(47; 22, 20, 20, 19; 34)$	?	$(47; 23, 19, 19, 21; 35)$	?
$(47; 23, 22, 22, 17; 37)$	?	$(49; 21, 21, 21, 21; 35)$	?
$(49; 22, 22, 22, 19; 36)$	?	$(49; 22, 24, 24, 18; 39)$	?
$(49; 23, 20, 20, 22; 36)$	$AD, T$	$(49; 23, 23, 23, 18; 38)$	?

## Acknowledgements

The third author wishes to acknowledge generous support by NSERC. His work was made possible by the facilities of the Shared Hierarchical Academic Research Computing Network (SHARCNET) and Compute/Calcul Canada. The research of the first two and fifth authors leading to these results has received funding from the Ministry of Education and Science of the Russian Federation according to the project part of the state funding assignment No 2.2200.2017/4.6.

## Appendix

In order to justify our claims made in section 6 regarding the propus parameter sets, we give the examples of the propus families having the required properties. In all cases the blocks  $B$  and  $C$  are equal, and to save space we omit the block  $C$ . The families are terminated by semicolons.

(9; 3, 3, 3, 3; 3)  
[0, 1, 8], [0, 2, 5], [0, 1, 4];

(11; 5, 4, 4, 3; 5)  
[0, 2, 5, 6, 9], [0, 1, 2, 8], [0, 2, 8];

(13; 4, 6, 6, 4; 7)  
[3, 5, 8, 10], [0, 1, 2, 3, 6, 10], [0, 1, 5, 7];

(13; 6, 4, 4, 6; 7)  
[2, 5, 6, 7, 8, 11], [0, 1, 4, 6], [1, 3, 4, 9, 10, 12];

(13; 6, 6, 6, 3; 8)  
[1, 4, 5, 8, 9, 12], [0, 1, 2, 4, 6, 7], [0, 2, 5];  
[0, 1, 3, 4, 6, 9], [0, 1, 2, 8, 9, 11], [0, 4, 9];

(15; 6, 7, 7, 4; 9)  
[1, 6, 7, 8, 9, 14], [0, 1, 2, 4, 5, 7, 11], [0, 3, 6, 10];  
[0, 2, 4, 5, 10, 12], [0, 1, 2, 4, 9, 10, 13], [5, 6, 9, 10];

(17; 6, 7, 7, 6; 9)  
[2, 5, 6, 11, 12, 15], [0, 1, 2, 3, 5, 8, 13], [0, 1, 7, 9, 11, 15];  
[0, 6, 7, 8, 9, 10, 11], [0, 1, 5, 7, 10, 13], [0, 1, 2, 6, 8, 11, 15];

(17; 8, 7, 7, 5; 10)  
[2, 3, 5, 6, 11, 12, 14, 15], [0, 1, 3, 4, 11, 13, 15],  
[0, 1, 5, 6, 12];

(19; 8, 8, 8, 6; 11)  
[1, 2, 3, 9, 10, 16, 17, 18],  
[0, 1, 3, 9, 12, 13, 15, 17],  
[0, 1, 6, 7, 10, 15];  
[0, 1, 2, 4, 6, 9, 12, 13],  
[0, 1, 2, 5, 6, 12, 15, 17],  
[4, 6, 7, 12, 13, 15];

(19; 9, 7, 7, 7; 11)  
[0, 1, 2, 3, 7, 12, 16, 17, 18],  
[0, 1, 3, 7, 11, 12, 14],  
[0, 1, 3, 6, 9, 13, 15];  
[0, 1, 2, 7, 12, 15, 16, 17, 18],  
[0, 1, 4, 6, 11, 13, 14],  
[0, 2, 6, 9, 10, 13, 17];

(21; 10, 10, 10, 6; 15)  
[1, 2, 3, 5, 10, 11, 16, 18, 19, 20],  
[0, 1, 3, 4, 6, 8, 11, 12, 13, 18],  
[0, 1, 2, 6, 12, 19];

(23; 9, 10, 10, 8; 14)  
[0, 2, 3, 6, 10, 13, 17, 20, 21],  
[0, 2, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 18, 21],  
[2, 3, 6, 11, 12, 14, 15, 16];  
[0, 1, 4, 9, 14, 17, 19, 21, 22],  
[0, 5, 9, 11, 12, 13, 14, 16, 20, 22],  
[2, 5, 6, 11, 12, 17, 18, 21];

(23; 10, 11, 11, 7; 16)  
[1, 3, 4, 9, 10, 13, 14, 19, 20, 22],  
[1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 15, 18, 19, 22],  
[1, 3, 4, 5, 10, 18, 20];  
[1, 2, 5, 11, 12, 15, 16, 18, 19, 20],  
[1, 3, 4, 5, 6, 7, 13, 16, 18, 20, 21],  
[0, 5, 7, 11, 12, 16, 18];

(25; 9, 12, 12, 9; 17)  
[0, 1, 5, 8, 10, 15, 17, 20, 24],  
[0, 1, 3, 9, 12, 13, 14, 16, 17, 19, 20, 24],  
[1, 7, 13, 14, 15, 17, 18, 20, 24];

(25; 12, 10, 10, 9; 16)  
[1, 2, 3, 4, 10, 12, 13, 15, 21, 22, 23, 24],  
[0, 5, 10, 14, 15, 17, 18, 21, 23, 24],  
[2, 4, 8, 12, 14, 16, 19, 20, 24];  
[0, 1, 7, 12, 14, 15, 17, 18, 20, 21, 22, 23],  
[2, 3, 4, 6, 11, 12, 13, 16, 18, 24],  
[0, 2, 6, 9, 10, 15, 16, 19, 23];

(25; 12, 11, 11, 8; 17)  
[3, 4, 5, 6, 9, 11, 14, 16, 19, 20, 21, 22],  
[0, 1, 9, 10, 13, 14, 17, 19, 20, 21, 23],  
[2, 9, 13, 15, 17, 20, 22, 23];  
[0, 4, 5, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 22],  
[3, 4, 7, 8, 10, 13, 15, 19, 21, 22, 23],  
[2, 3, 5, 7, 18, 20, 22, 23];

(27; 11, 13, 13, 9; 19)  
[0, 1, 2, 4, 8, 12, 15, 19, 23, 25, 26],  
[3, 4, 5, 6, 8, 9, 11, 15, 16, 18, 20, 24, 25],  
[0, 8, 9, 10, 13, 16, 18, 19, 22];  
[2, 3, 4, 8, 9, 12, 13, 15, 17, 19, 22],  
[2, 3, 6, 9, 11, 17, 18, 19, 20, 21, 23, 25, 26],  
[0, 1, 3, 8, 13, 14, 19, 24, 26];

(27; 12, 11, 11, 10; 17)

[1, 4, 5, 6, 8, 9, 18, 19, 21, 22, 23, 26],  
[5, 6, 9, 11, 14, 16, 17, 18, 20, 25, 26],  
[1, 2, 4, 5, 6, 10, 12, 18, 22, 26];  
[0, 1, 2, 5, 6, 8, 11, 15, 16, 17, 20, 22],  
[1, 2, 7, 9, 15, 17, 18, 19, 21, 22, 26],  
[1, 2, 3, 6, 12, 15, 21, 24, 25, 26];

(27; 12, 12, 12, 9; 18)

[1, 7, 9, 10, 11, 13, 14, 16, 17, 18, 20, 26],  
[0, 2, 3, 4, 7, 8, 9, 14, 18, 19, 21, 22],  
[0, 2, 4, 6, 9, 12, 15, 20, 26];  
[2, 3, 6, 7, 8, 9, 12, 14, 15, 20, 24, 26],  
[1, 3, 4, 8, 11, 12, 19, 20, 22, 24, 25, 26],  
[0, 2, 5, 12, 13, 14, 15, 22, 25];

(29; 11, 13, 13, 11; 19)

[0, 2, 5, 7, 13, 14, 15, 16, 22, 24, 27],  
[3, 6, 7, 8, 9, 10, 13, 14, 17, 18, 20, 22, 26],  
[0, 1, 3, 4, 9, 12, 15, 17, 22, 23, 28];

(29; 13, 11, 11, 13; 19)

[0, 2, 8, 9, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 27],  
[1, 2, 3, 10, 12, 16, 19, 20, 22, 25, 27],  
[0, 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 13, 17, 18, 20, 23];

(31; 13, 14, 14, 11; 21)

[0, 1, 2, 5, 8, 11, 12, 19, 20, 23, 26, 29, 30],  
[0, 3, 8, 14, 15, 16, 17, 19, 21, 22, 25, 27, 29, 30],  
[0, 1, 4, 6, 11, 15, 16, 20, 22, 24, 30];  
[2, 3, 5, 7, 9, 10, 12, 15, 16, 17, 28, 29, 30],  
[0, 1, 3, 4, 8, 12, 15, 16, 18, 24, 25, 26, 27, 29],  
[0, 1, 6, 10, 12, 15, 16, 19, 21, 25, 30];

(31; 15, 12, 12, 13; 21)

[0, 2, 4, 7, 10, 11, 12, 15, 16, 19, 20, 21, 24, 27, 29],  
[2, 3, 5, 12, 14, 15, 19, 20, 25, 26, 27, 30],  
[6, 8, 9, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 24, 26, 28];  
[0, 1, 6, 9, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 22, 25, 30],  
[2, 4, 6, 9, 10, 13, 15, 20, 23, 25, 26, 29],  
[0, 1, 2, 4, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 22, 23, 24, 28, 30];

(31; 15, 15, 15, 10; 24)

[0, 1, 2, 7, 10, 11, 14, 15, 16, 17, 20, 21, 24, 29, 30],  
[0, 3, 5, 7, 10, 12, 13, 14, 15, 16, 18, 19, 23, 24, 30],  
[0, 2, 4, 6, 12, 14, 22, 25, 26, 28];  
[0, 4, 6, 8, 10, 11, 15, 16, 18, 20, 21, 23, 24, 26, 28],  
[2, 4, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 16, 20, 24, 25, 26, 27, 30],  
[2, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20, 29];

(33; 13, 16, 16, 12; 24)

[0, 1, 2, 4, 7, 12, 14, 19, 21, 26, 29, 31, 32],  
[1, 2, 3, 6, 9, 10, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 23, 24, 26, 32],  
[1, 4, 5, 11, 13, 14, 15, 17, 19, 20, 28, 32];  
[0, 1, 4, 8, 10, 14, 16, 18, 19, 25, 27, 30, 32],  
[0, 5, 7, 9, 10, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 21, 22, 27, 28, 30],  
[2, 3, 4, 6, 13, 16, 17, 20, 27, 29, 30, 31];

(33; 15, 13, 13, 14; 22)

[0, 2, 3, 5, 9, 10, 13, 14, 19, 20, 23, 24, 28, 30, 31],  
[0, 1, 2, 3, 4, 8, 14, 17, 20, 24, 26, 28, 29],  
[0, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 19, 20, 22, 25, 27, 29];  
[0, 1, 2, 4, 7, 11, 13, 16, 18, 26, 27, 28, 29, 30, 32],  
[0, 1, 2, 7, 9, 10, 11, 15, 16, 19, 22, 29, 32],  
[1, 4, 5, 9, 11, 13, 16, 17, 20, 22, 24, 28, 29, 32];

(33; 15, 16, 16, 11; 25)

[0, 1, 4, 7, 8, 9, 10, 13, 20, 23, 24, 25, 26, 29, 32],  
[0, 1, 4, 6, 8, 10, 11, 12, 15, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 31],  
[1, 6, 7, 8, 10, 11, 14, 16, 26, 29, 31];  
[0, 1, 5, 8, 12, 14, 15, 17, 18, 20, 22, 25, 26, 29, 32],  
[0, 1, 3, 8, 13, 14, 15, 19, 21, 22, 23, 25, 27, 30, 31, 32],  
[0, 3, 10, 13, 14, 15, 18, 19, 20, 23, 30];

(33; 16, 14, 14, 12; 23)

[1, 2, 4, 6, 10, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 23, 27, 29, 31, 32],  
[0, 2, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 25, 28],  
[1, 4, 8, 9, 11, 15, 16, 18, 25, 26, 30, 31];

(35; 16, 15, 15, 13; 24)

[1, 3, 4, 7, 9, 10, 11, 15, 20, 24, 25, 26, 28, 31, 32, 34],  
[0, 2, 6, 7, 9, 11, 14, 17, 18, 19, 28, 29, 32, 33, 34],  
[0, 1, 3, 4, 10, 15, 17, 23, 26, 28, 29, 30, 32];  
[0, 6, 9, 11, 14, 16, 18, 21, 22, 25, 26, 27, 29, 32, 33, 34],  
[0, 2, 4, 8, 11, 12, 13, 18, 23, 26, 29, 30, 31, 32, 33],  
[0, 1, 9, 10, 13, 14, 16, 19, 21, 22, 25, 26, 34];

(35; 17, 16, 16, 12; 26)

[0, 1, 2, 6, 9, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 21, 23, 26, 29, 33, 34],  
[1, 5, 12, 13, 14, 15, 17, 20, 21, 23, 25, 26, 27, 30, 31, 34],  
[4, 10, 11, 15, 16, 22, 23, 24, 25, 27, 31, 34];

(37; 15, 16, 16, 15; 25)

[0, 2, 3, 5, 10, 11, 12, 16, 21, 25, 26, 27, 32, 34, 35],  
[0, 1, 2, 5, 9, 10, 12, 13, 15, 16, 22, 28, 30, 33, 34, 35],  
[0, 2, 4, 6, 10, 11, 12, 13, 16, 19, 20, 22, 30, 31, 33];

(37; 16, 15, 15, 16; 25)

[1, 4, 5, 6, 9, 12, 13, 14, 23, 24, 25, 28, 31, 32, 33, 36],  
[0, 2, 3, 4, 6, 7, 13, 14, 16, 19, 24, 28, 30, 35, 36],  
[1, 5, 7, 8, 11, 13, 14, 15, 19, 26, 28, 30, 32, 33, 35, 36];

(37; 16, 18, 18, 13; 28)

[1, 3, 6, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 25, 26, 31, 34, 36],

[1, 2, 7, 11, 14, 15, 17, 18, 23, 25, 26, 27, 28, 29, 31, 32, 34, 36],

[1, 2, 3, 4, 11, 15, 17, 21, 22, 26, 29, 32, 33];

[1, 2, 4, 6, 9, 11, 12, 14, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 36],

[2, 3, 5, 6, 9, 10, 11, 12, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 27, 31, 33, 35],

[0, 2, 6, 7, 11, 14, 17, 20, 23, 26, 30, 31, 35];

(37; 17, 17, 17, 13; 27)

[0, 2, 3, 5, 6, 8, 9, 15, 16, 21, 22, 28, 29, 31, 32, 34, 35],

[2, 4, 5, 7, 8, 9, 15, 16, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 27, 29, 33],

[2, 3, 10, 12, 19, 20, 22, 24, 27, 29, 31, 34, 35];

[1, 2, 3, 4, 9, 11, 13, 15, 16, 19, 20, 21, 22, 24, 25, 27, 28],

[2, 6, 9, 10, 13, 15, 19, 24, 25, 26, 28, 29, 31, 33, 34, 35, 36],

[0, 3, 5, 11, 12, 13, 17, 20, 24, 25, 26, 32, 34];

(37; 18, 15, 15, 15; 26)

[3, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13, 16, 21, 24, 26, 28, 30, 31, 32, 33, 34],

[0, 4, 7, 13, 16, 17, 18, 19, 22, 23, 24, 29, 30, 32, 33],

[1, 5, 9, 10, 12, 15, 18, 22, 23, 24, 26, 28, 30, 31, 33];

[0, 2, 4, 6, 9, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18, 22, 24, 25, 30, 35, 36],

[1, 4, 9, 13, 16, 17, 20, 21, 22, 23, 24, 31, 32, 33, 36],

[0, 6, 8, 10, 11, 14, 16, 17, 20, 21, 23, 26, 27, 29, 31];

(39; 17, 17, 17, 15; 27)

[0, 5, 6, 8, 10, 14, 15, 17, 18, 21, 22, 24, 25, 29, 31, 33, 34],

[0, 3, 5, 6, 12, 13, 14, 16, 17, 18, 22, 27, 30, 33, 35, 37, 38],

[1, 2, 3, 5, 6, 8, 12, 13, 14, 15, 26, 31, 32, 34, 38];

[2, 3, 7, 9, 10, 15, 16, 18, 19, 20, 21, 23, 28, 30, 32, 34, 35],

[0, 3, 5, 6, 10, 12, 13, 14, 16, 21, 22, 24, 25, 29, 30, 34, 36],

[0, 1, 2, 3, 4, 8, 14, 18, 21, 25, 31, 35, 36, 37, 38];

(39; 18, 16, 16, 16; 27)

[3, 4, 5, 7, 8, 10, 12, 17, 18, 21, 22, 27, 29, 31, 32, 34, 35, 36],

[0, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 15, 16, 24, 26, 28, 30, 33, 36],  
[2, 3, 4, 6, 7, 8, 12, 13, 15, 16, 23, 24, 29, 31, 35, 38];

[1, 2, 3, 9, 10, 16, 17, 19, 20, 22, 24, 27, 29, 31, 32, 33, 35, 36],

[1, 5, 6, 7, 10, 11, 19, 22, 25, 27, 29, 30, 32, 33, 34, 36],

[1, 7, 10, 11, 12, 13, 17, 19, 20, 22, 26, 27, 28, 29, 32, 38];

(41; 16, 20, 20, 16; 31)

[1, 2, 3, 9, 11, 15, 19, 20, 21, 22, 26, 30, 32, 38, 39, 40],

[0, 3, 9, 11, 14, 15, 16, 19, 22, 23, 24, 25, 26, 28, 29, 30, 32, 35, 37, 40],

[0, 4, 5, 7, 14, 16, 18, 19, 21, 23, 24, 31, 32, 37, 38, 40];

(41; 18, 19, 19, 15; 30)

[4, 5, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 17, 24, 25, 26, 30, 31, 33, 34, 36, 37],

[3, 5, 8, 9, 11, 12, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 26, 28, 30, 33, 34, 36],

[0, 2, 3, 5, 6, 11, 15, 20, 22, 24, 26, 27, 34, 35, 39];

[3, 5, 6, 9, 10, 11, 13, 15, 16, 26, 27, 31, 33, 35, 36, 38, 39, 40],

[1, 2, 5, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 20, 23, 24, 29, 30, 31, 32, 40],

(43; 21, 21, 21, 15; 35)

[0, 1, 2, 3, 4, 8, 9, 12, 14, 19, 22, 23, 26, 28, 29, 31, 32, 34, 38, 39, 41],

[1, 4, 6, 9, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 21, 23, 24, 25, 31, 35, 36, 38, 40, 41],

[0, 7, 9, 13, 14, 15, 17, 18, 25, 26, 28, 29, 30, 34, 36].

The last example consists of a D-optimal design (blocks  $A$  and  $D$ ) and two copies of the Paley difference set in  $\mathbb{Z}_{43}$  (blocks  $B = C$ ). It is taken from the paper [7].

## References

1. **Hadamard J.** Résolution d'une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
2. **Williamson J.** Hadamard's Determinant Theorem and the Sum of Four Squares. *Duke Math. J.*, 1944, no. 11, pp. 65–81.
3. **Đoković D. Ž.** Good Matrices of Orders 33, 35 and 127. *JCMCC*, 1993, no. 14, pp. 145–152.
4. **Holzmann W. H., Kharaghani H., and Tayfeh-Rezaie B.** Williamson Matrices up to Order 59. *Designs, Codes and Cryptography*, 2008, vol. 46, iss. 3, pp. 343–352.
5. **Goethals J. M., and Seidel J. J.** A Skew-Hadamard Matrix of Order 36. *J. Austral. Math. Soc.*, 1970, vol. 11, pp. 343–344.
6. **Seberry J., and Balonin N. A.** *The Propus Construction for Symmetric Hadamard Matrices*. 2015. Available at: <http://arXiv:1512.01732v1> (accessed 22 May 2017).
7. **Di Mateo O., Đoković D. Ž., Kotsireas I. S.** Symmetric Hadamard Matrices of Order 116 and 172 exist. *Spec. Matrices*, 2015, no. 3, pp. 227–234.

8. Balonin N. A., Đoković D. Ž. Symmetry of Two-Circulant Hadamard Matrices and Periodic Golay Pairs. *Informacionno-upravljaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 3, pp. 2–16 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.2
9. Balonin N. A., Đoković D. Ž. Negaperiodic Golay Pairs and Hadamard Matrices. *Informacionno-upravljaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 5, pp. 2–17. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.2
10. Craigen R., Kharaghani H. Hadamard Matrices and Hadamard Designs. In: *Handbook of Combinatorial Designs*. 2nd ed. C. J. Colbourn, J. H. Dinitz (eds). Ser. Discrete Mathematics and its Applications. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, 2006, pp. 273–280.
11. Liouville J. Nouveaux Théorèmes Concernant les Nombres Triangulaires. *Journal de Mathématiques Pures et Appliquées*, 1863, no. 8, pp. 73–84 (In French).
12. Dixon L. E. Integers Represented by Positive Ternary Quadratic Forms. *Bull. Amer. Math. Soc.*, 1927, vol. 33, no. 1, pp. 63–70.
13. Xia M., Xia T., Seberry J., and Wu J. An Infinite Series of Goethals — Seidel Arrays. *Discrete Applied Mathematics*, 2005, no. 145, pp. 498–504.

УДК 519.614

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.2

### Конструкция симметричных матриц Адамара

Н. А. Балонин<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, korbendfs@mail.ru

Ю. Н. Балонин<sup>а</sup>, инженер, tomaball@mail.ru

Д. Ж. Джокович<sup>б</sup>, PhD, профессор, djokovic@uwaterloo.ca

Д. А. Карбовский<sup>а</sup>, бакалавр, alra@inbox.ru

М. Б. Сергеев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, mbsn@mail.ru

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Университет Ватерлоо, Ватерлоо, Онтарио, Канада

**Цель:** исследовать более полно, чем это было известно ранее, семейства симметричных матриц Адамара конструкции пропусов — симметричной разновидности массива Гетхальса — Зейделя, отличающейся обязательной симметрией одного из блоков и равенством двух других, всего четырех блоков. **Методы:** аналитическая теория уравнений для параметров дифференциальных семейств, используемых в теории симметричных матриц Адамара, базирующаяся на теоремах Лиувилля и Диксона. Авторский численный метод поиска двух или трех циклических блоков для построения матриц Адамара бициклического типа, или пропусов, который ускоряет классический перебор искомым последовательностей предварительной сортировкой их на непересекающиеся множества потенциальных решений с помощью хэш-функции. **Результаты:** получено и классифицировано в таблицы обширное множество новых симметричных матриц Адамара, отличающихся между собой индивидуальными наборами параметров. Помимо новизны указанных множеств, достигнута новизна симметричных конструкций на порядках 92, 116, 156, для которых такие решения были неизвестны. Для порядка 156 симметричные матрицы найдены впервые. **Практическая значимость:** матрицы Адамара имеют непосредственное практическое значение для решения задач помехоустойчивого кодирования, сжатия и маскирования видеoinформации. Программное обеспечение нахождения симметричных матриц Адамара и библиотека найденных матриц используются в математической сети Интернет с исполняемыми онлайн алгоритмами.

**Ключевые слова** — симметричные матрицы Адамара, массив Гетхальса — Зейделя, пропуск-конструкция, циклические дифференциальные семейства.

# РЕГУЛЯРИЗАЦИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ЭЭГ/МЭГ ЛОКАЛЬНЫМ КОРТИКАЛЬНЫМ ВОЛНОВЫМ ПАТТЕРНОМ

А. А. Горшков<sup>а, б</sup>, аспирант

А. Е. Осадчий<sup>б, в</sup>, PhD

А. Л. Фрадков<sup>а, б</sup>, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ

<sup>в</sup>Центр нейрoэкономики и когнитивных исследований, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, РФ

**Постановка проблемы:** пространственное разрешение электроэнцефалографии/магнитоэнцефалографии зависит от метода решения обратной задачи, которая в силу фундаментальных физических причин является некорректно поставленной и имеет бесконечно большое количество решений. В последние несколько лет появились новые свидетельства о том, что нейрональная активность распространяется по коре в соответствии с волновым паттерном, характеризуемым некоторым направлением и скоростью распространения волны. Новые данные о пространственно-временной динамике распространения нейрональной активности по коре головного мозга требуют пересмотра существовавшей долгое время парадигмы, в которой пространственная структура активности рассматривалась независимо от временной динамики. **Цель исследования:** разработка нового метода локализации электрической активности головного мозга, который позволяет достаточно точно восстановить исходную активность по имеющимся данным на сенсорах в предположении, что эта активность имеет волновую структуру. **Результаты:** разработан новый математический аппарат регуляризации обратной задачи, ограничивающий решения множеством пространственно-временных динамик, удовлетворяющих двумерному волновому уравнению, определенному на нерегулярной сетке узлов, аппроксимирующей кортикальную поверхность. Это новый метод, реализованный в соответствии с хорошо себя зарекомендовавшей общей методологией регуляризации некорректно поставленных задач на основании минимизации  $Q$ -нормы решения. Сравнение на модельных данных с двумя наиболее распространенными методами решения обратной задачи показало, что новый метод, в отличие от них, сохраняет волновую структуру, обеспечивает наибольшую точность оценки моделируемой активности. Параметры регуляризующей волны рассчитываются в соответствии с минимизацией относительной невязки решения в пространстве сенсоров.

**Ключевые слова** — обратная задача электроэнцефалографии, волновое уравнение, регуляризация, разностный метод, управление.

## Введение

Магнитоэнцефалография (МЭГ) и электроэнцефалография (ЭЭГ) — неинвазивные технологии регистрации электрической активности головного мозга, обладающие высоким временным разрешением и позволяющие изучать быстро протекающие нейрональные процессы [1], не нарушая целостность тканей [2, 3]. Пространственное разрешение этих технологий зависит от метода решения обратной задачи, которая в силу фундаментальных физических причин является некорректно поставленной (ill-posed) и имеет бесконечно большое количество решений [4, 5]. Для решения таких задач используют методы регуляризации, по сути соответствующие добавлению дополнительных свойств, которым должно обладать решение [6, 7]. Самым простым методом является тихоновская регуляризация, заключающаяся в поиске решения с минимальной энергией. Именно этот тип регуляризации лежит в основе широко распространенного на сегодняшний день метода MNE (Minimum Norm Estimates) [2] решения обратной задачи в ЭЭГ и МЭГ. Байесовская интерпретация этого подхо-

да показывает, что дополнительные требования к решению соответствуют априорному распределению вероятностей конфигурации нейрональной активности [8]. Например, регуляризация по Тихонову соответствует предположению о независимости и одинаковой мощности активности во всех узлах сетки, аппроксимирующей кору головного мозга. Более реалистичные предположения о пространственной гладкости решения реализованы в методе LORETA (Low Resolution Electromagnetic Tomography) [9], в котором в качестве нормы используется мощность пространственно-высокочастотной компоненты, минимизация которой дает гладкие решения.

В последние несколько лет появились дополнительные свидетельства о наличии кортикальных волн разных масштабов [10–12]. Речь идет о том, что нейрональная активность распространяется по коре в соответствии с волновым паттерном, характеризуемым некоторым направлением и скоростью распространения волны [12, 13]. В соответствии с вышесказанным феноменологические волновые свойства распространения нейрональной активности могут быть использованы в качестве априорных представлений об искомой

динамической активации. Принципиальным является тот факт, что при исследовании волновой структуры отсутствует возможность разделить временную и пространственную компоненты носителя, на котором определена регистрируемая в пространстве сенсоров и искомая в пространстве источников активность [13]. В настоящий момент не существует метода решения обратной задачи ЭЭГ/МЭГ на основе регуляризации в соответствии с априорно ожидаемой волновой пространственно-временной динамикой искомой кортикальной активности.

Новые данные о пространственно-временной динамике распространения нейрональной активности по коре головного мозга требуют пересмотра существовавшей долгое время парадигмы, в которой пространственная структура активности рассматривалась независимо от временной динамики [13]. Нами был разработан математический аппарат регуляризации обратной задачи, ограничивающий решения множеством пространственно-временных динамик, удовлетворяющих двумерному волновому уравнению, определенному на нерегулярной сетке узлов, аппроксимирующих кортикальную поверхность. Это новый метод, реализованный в соответствии с хорошо себя зарекомендовавшей общей методологией регуляризации некорректно поставленных задач, широко применяемой в различных областях науки, в том числе и при решении обратной задачи ЭЭГ/МЭГ [8]. Принципиально новым является именно использование волновой динамики для формирования априорного ограничения, накладываемого на искомое решение.

### Обратная задача ЭЭГ и ее решение

Рассмотрим уравнение наблюдения для  $T$  дискретных моментов времени:

$$\mathbf{Y}(t) = \mathbf{G} \times \mathbf{J}(t) + \boldsymbol{\varepsilon}(t), \quad 0 \leq t \leq T - 1, \quad (1)$$

где  $\mathbf{Y}(t) \in \mathbb{R}^{N_e}$  — вектор измерений в момент времени  $t$ ;  $\mathbf{G} \in \mathbb{R}^{N_e \times N_v}$  — матрица прямой модели от  $N_v$  источников к  $N_e$  сенсорам,  $i$ -й столбец которой получается решением прямой задачи для заданной конфигурации сенсоров и диполей, помещенным в  $i$ -й источник на сетке коры;  $\mathbf{J}(t) \in \mathbb{R}^{N_v}$  — неизвестный вектор активаций тока в источниках в момент времени  $t$ ;  $\boldsymbol{\varepsilon}(t) \in \mathbb{R}^{N_e}$  — вектор измерений ошибок (шума).

Для распределенных источников матрица  $\mathbf{G}$  необратима, так как  $N_v \gg N_e$ , и задача является некорректно поставленной. Для ее решения приходится использовать метод регуляризации Тихонова:

$$\min_{\mathbf{J}} \left\{ \left\| \mathbf{G}\mathbf{J} - \mathbf{Y} \right\|_{\Sigma_\varepsilon}^2 + \alpha \left\| \mathbf{J} \right\|_{\mathbf{Q}} \right\}, \quad (2)$$

где  $\left\| \mathbf{G}\mathbf{J} - \mathbf{Y} \right\|_{\Sigma_\varepsilon}^2 = (\mathbf{G}\mathbf{J} - \mathbf{Y})^T \Sigma_\varepsilon^{-1} (\mathbf{G}\mathbf{J} - \mathbf{Y})$  — норма исходной модели, т. е. насколько мы доверяем полученным данным;  $\left\| \mathbf{J} \right\|_{\mathbf{Q}} = \mathbf{J}^T \mathbf{Q} \mathbf{J}$  — специально заданная  $\mathbf{Q}$ -норма матрицы априорных предположений о модели, где  $\mathbf{Q}$  — симметрическая матрица весов;  $\alpha \geq 0$  — параметр регуляризации.

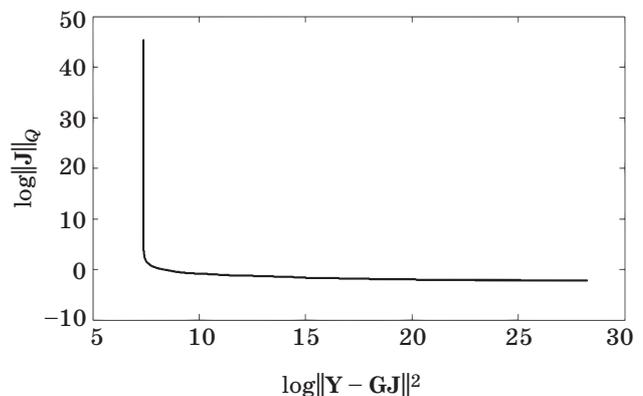
Тогда решением задачи (2) является

$$\hat{\mathbf{J}} = (\mathbf{G}^T \Sigma_\varepsilon^{-1} \mathbf{G} + \alpha \mathbf{Q})^+ \mathbf{G}^T \Sigma_\varepsilon^{-1} \mathbf{Y}, \quad (3)$$

где  $+$  означает псевдообратную матрицу. Формула (3) в дальнейшем в работе будет использована как решение обратной задачи.

Особую роль играет выбор матрицы весов  $\mathbf{Q}$  априорных предположений о модели. Если  $\mathbf{Q} = \mathbf{I}_{N_v}$ , то метод решения по сути является методом наименьших квадратов MNE. Если  $\mathbf{Q}$  задается весами оператора Лапласа, то это метод LORETA, который порождает решения максимальной гладкости. Заметим, что в LORETA гладкость учитывается только по пространственной координате. Суть нового метода заключается в рассмотрении такого ограничения, которое может навязывать решению пространственно-временной паттерн.

Параметр регуляризации  $\alpha$  можно выбирать разными способами. В данной работе использовался метод L-curve, суть которого заключается в следующем. Строится  $\log$ - $\log$ -график  $\mathbf{Q}$ -нормы  $\left\| \mathbf{J} \right\|_{\mathbf{Q}}$  регуляризованного решения относительно соответствующей нормы ошибки уравнения  $\left\| \mathbf{G}\mathbf{J} - \mathbf{Y} \right\|_{\Sigma_\varepsilon}^2$ . Получающаяся кривая имеет форму буквы L (рис. 1), на которой достаточно легко найти точку, минимизирующую обе величины. Таким образом, лучший выбор  $\alpha$  соответствует угловой точке получаемой кривой в непрерывном случае и точке, ближайшей к угловой, — в дискретном.



■ **Рис. 1.** Кривая в методе L-curve  
 ■ **Fig. 1.** The curve in «L-curve» method

**Предположение о волне**

Новый метод заключается во введении пространственно-временного ограничения решения и основывается на предположении, что распространение электрической активности источника представляет собой некоторую волну с параметрами, описываемую волновым уравнением с диссипацией

$$\frac{d^2u}{dt^2} = c^2 \Delta u - p \frac{du}{dt}, \quad (4)$$

где  $c$  — скорость волны;  $p$  — параметр затухания.

Предполагается, что волна имеет неизвестное направление распространения  $\theta$  вдоль вытянутой сетки размером  $N \times M$  и что начальное распределение локализовано рядом с центром сетки. Благодаря наличию временной характеристики в действительности рассматривается расширенное уравнение

$$\hat{Y} = \hat{G}\hat{J} + \hat{\varepsilon},$$

где значения  $Y(t)$  и  $J(t)$  для  $t = 0, 1, \dots, T - 1$  объединены в один вектор:

$$\hat{Y} = \begin{pmatrix} Y(0) \\ \vdots \\ Y(T-1) \end{pmatrix}; \hat{G} = \begin{pmatrix} G & 0 & \dots & 0 \\ 0 & G & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & G \end{pmatrix};$$

$$\hat{J} = \begin{pmatrix} J(0) \\ \vdots \\ J(T-1) \end{pmatrix}; \hat{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon(0) \\ \vdots \\ \varepsilon(T-1) \end{pmatrix}.$$

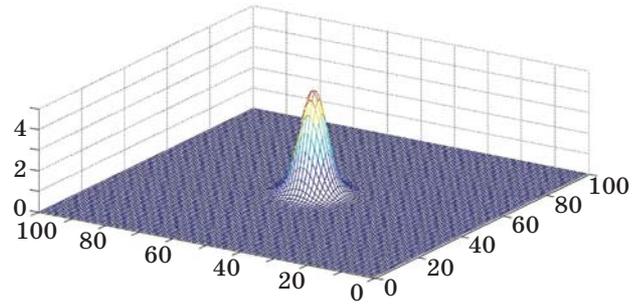
Таким образом, задача решается сразу для всего отрезка времени:

$$\min_J \left\{ \left\| \hat{G}\hat{J} - \hat{Y} \right\|_{\Sigma_\varepsilon}^2 + \alpha \left\| \hat{J} \right\|_Q \right\}, \quad (5)$$

где матрица  $Q$  будет построена как специально заданная матрица весов волнового уравнения.

**Моделирование волны.  
Структура матрицы Q**

Для моделирования волны в двумерном пространстве использовался разностный метод, который широко распространен в численном моделировании [14]. Параметры  $h$  и  $\tau$  соответственно обозначают шаг равномерной сетки в двумерном пространстве и шаг по времени. Дискретный промежуток времени  $T$  выбирался исходя из феноменологических свойств нейрональной активности. В качестве начального условия рассматривалась



■ *Рис. 2.* Начальное условие распространения волны  
■ *Fig. 2.* The initial condition of the wave propagation

гауссова «шапочка», локализованная в центре сетки, а граничные условия брались свободными (рис. 2), поскольку такая начальная активация наиболее соответствует свойствам изучаемой нейрональной активности, представляющей собой кратковременно локализованное в пространстве колебание потенциала действия в форме пика.

Матрица  $Q$  строится «упаковкой» коэффициентов численного моделирования волны. Для этого сначала составляется линейная система уравнений на  $u_{i,j}^k$  для каждого временного слоя:

$$A_k U_k = \hat{O},$$

где  $U_k$  — вектор значений всех точек на сетке в момент времени  $k$ . Матрица  $A_k$  (размера  $NM \times NM$ ) имеет плохую обусловленность и блочный трехдиагональный вид:

$$A_k = \begin{pmatrix} C & I & O & \dots & O \\ I & C & I & \dots & O \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ O & \dots & I & C & I \\ O & \dots & O & I & C \end{pmatrix},$$

где матрицы  $C, O, I$  имеют порядок  $N$ , причем  $O$  является нулевой матрицей, в матрице  $C$  число  $K_i$  есть число соседей  $i$ -го узла сетки (от 1 до 4):

$$C = \frac{c^2}{h^2} \begin{pmatrix} K_1 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ -1 & K_2 & -1 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & -1 & K_{MN-1} & -1 \\ 0 & \dots & 0 & -1 & K_{MN} \end{pmatrix};$$

$$I = \frac{c^2}{h^2} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & -1 & 0 \\ 0 & \dots & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}.$$

Поскольку  $A_k$  не зависит от  $k$ , то переобозначим ее как  $A$ . Теперь составим линейную систему уравнений на все  $u_{i,j}^k$ , т. е. объединим слои:

$$\tilde{A}U = \hat{O},$$

где  $U$  — вектор значений всех точек за все время. Тогда матрица  $\tilde{A}$  (размера  $TMN \times TMN$ ) имеет следующий вид:

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} A'' & F & \dots & O & O & O & O \\ F' & A' & F & O & \dots & O & O \\ O & F' & A' & F & \dots & O & O \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ O & O & \dots & F' & A' & F & O \\ O & O & \dots & O & F' & A' & O \\ O & O & \dots & O & O & O & O \end{pmatrix},$$

где  $F = \frac{1}{\tau^2} I_{NM}$ ;  $F' = \frac{1-p\tau}{\tau^2} I_{NM}$ ;  $A' = A - \frac{2+p\tau}{\tau^2} I_{NM}$ ;

$$A'' = \frac{A}{2} - \frac{1+p\tau}{\tau^2} I_{NM}.$$

Матрица  $\tilde{A}$  представляет собой априорную матрицу для пространственно-временной структуры волны, описываемой уравнением (4). Теперь определим симметрическую матрицу  $Q$  следующим образом:

$$Q := \tilde{A}^T \tilde{A}.$$

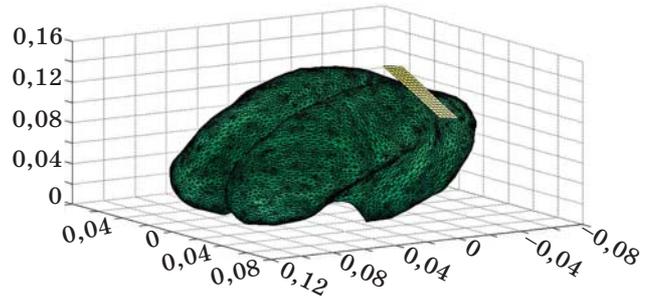
Таким образом, мы определяем  $Q$ -норму как норму пространственно-временной структуры волны по заданным параметрам сетки, скорости и затухания для основной задачи (5). Если подставить  $\hat{J}$  в вытянутый вдоль времени вектор всей волны  $U$ , то получим следующее выражение:

$$\|\hat{J}\|_Q = U^T Q U = U^T \tilde{A}^T \tilde{A} U = 0,$$

которое доказывает, что в  $\hat{J}$   $Q$ -норма достигает своего минимума.

**Отображение активности на коре головного мозга на сигналы сенсоров. Применение прямой модели**

Обратная задача решается на локализованном участке, т. е. заранее известен его центр  $(x_0, y_0, z_0)$  — предположительное место активации. Для того чтобы решать обратную задачу на прямоугольной сетке, необходимо выполнить перенос на область вокруг этого центра и вычислить топографии токовых диполей, находящихся в узлах новой сетки (рис. 3).



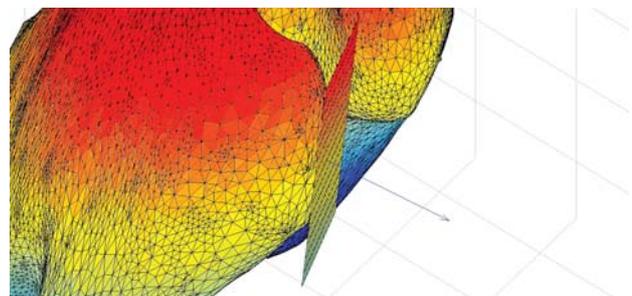
■ *Рис. 3.* Сетка всей коры и прямоугольная сетка  
 ■ *Fig. 3.* The whole cortex grid and the rectangular grid

Один из способов построения преобразования заключается в рассмотрении двух наборов соответствующих между собой реперных точек в пространстве и задания аппроксимирующего отображения для них. Мы пользовались достаточно известным методом Approximating Thin-Plate Splines [15].

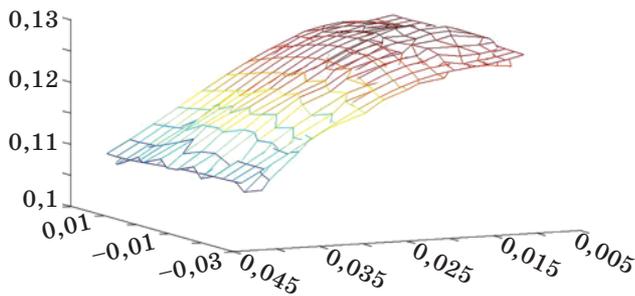
При переносе прямоугольной плоской сетки на кору для удобства был использован сглаженный вариант коры, так как он полностью изоморфен исходной коре, т. е. каждый узел на сглаженной коре можно перенести на соответствующий узел на исходной. Для заданного центра  $(x_0, y_0, z_0)$  на сглаженной коре итеративный перенос заключается в следующем.

— Строится сетка рядом с центром ортогонально направлению фиксированного диполя (рис. 4).

— Итеративно используется трехмерный аналог алгоритма, в качестве реперных точек  $p_i$  выступают узлы сдвигаемой регулярной сетки. Для них строятся проекции на кору и находятся ближайшие к ним узлы сетки коры. В качестве реперных точек  $q_i$  берутся середины векторов между  $p_i$  и найденными точками на сетке коры. Параметр гладкости  $\lambda$  берется в основном в пределах от 0,1 до 10. Итерации происходят до достижения необ-



■ *Рис. 4.* Построение ортогональной сетки рядом с центром  
 ■ *Fig. 4.* The construction of the orthogonal grid near the center



■ **Рис. 5.** Поверхность коры вокруг центра и регулярная сетка после применения алгоритма и наложения на поверхность почти совпадают  
 ■ **Fig. 5.** The cortex surface around the center and the regular grid after applying the algorithm and imposition on the surface almost match

ходимого порога ошибки аппроксимации реперных точек. На рис. 5 показан результат применения такого метода.

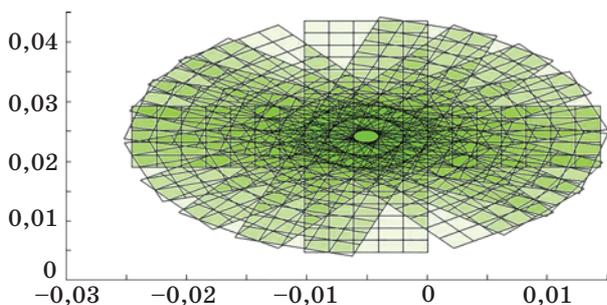
— Из прямой модели **G** для всей коры берутся только те источники, которые участвовали в качестве реперных точек на последней итерации, а значения на них интерполируются по значениям на ближайших узлах сетки.

**Оценки параметров волны**

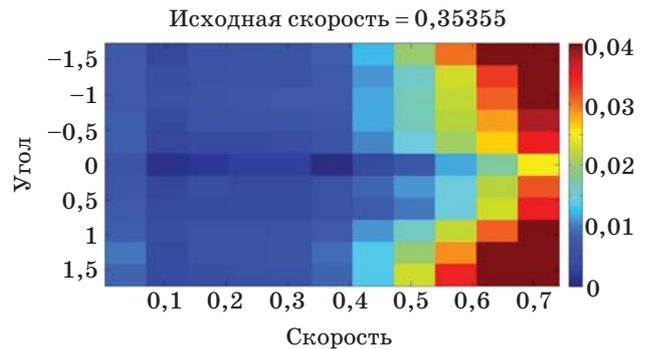
Параметры исходной волны, такие как скорость *c* и направление распространения  $\theta$ , можно оценить исходя из относительной ошибки

$$\text{Ref}(\theta, c) = \|\mathbf{Y} - \mathbf{G}\hat{\mathbf{J}}(\mathbf{Q}(\theta, c))\| / \|\mathbf{Y}\|.$$

Сканирование параметров заключается в следующем: проверяются заданные заранее направления распространения волны, т. е. используются разные возможные углы  $\theta$  (рис. 6), а также для каждого направления проверяется набор скоростей от 0 до максимально возможной, так как численный метод моделирования накладывает условие устойчивости.



■ **Рис. 6.** Направления сеток  
 ■ **Fig. 6.** Grids directions



■ **Рис. 7.** Кодированная цветом таблица отклонения от исходного угла и скорости  
 ■ **Fig. 7.** The color coded table of the initial angle and speed deviation

Далее ищутся минимумы относительных ошибок полученных решений и по ним сужаются интервалы сканирования направлений и скорости. Процесс повторяется итеративно до необходимой точности нахождения параметров. В результате получается таблица значений относительной ошибки (рис. 7), по которой можно определить параметры исходной волны.

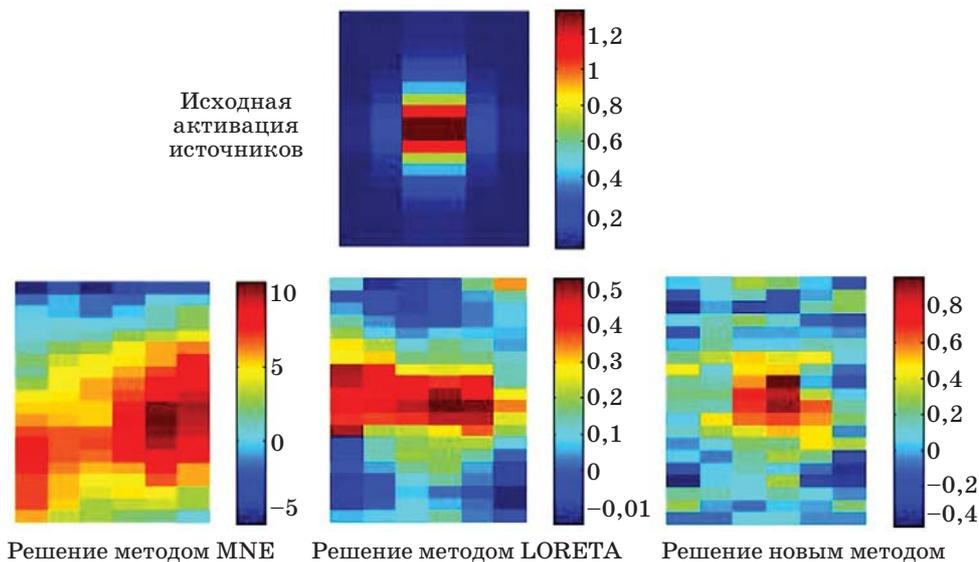
**Результаты моделирования и анализ неизвестных параметров волны**

В качестве модели головы как объемного проводника использовалась модель TutorialCTF (приблизительно 16 × 13 × 12 см) с 15 016 узлами (14 993 после сглаживания). Фиксировался 2010-й узел в качестве центра распространения волны.

Исходная волна  $J_0$  моделировалась на небольшой сетке 20 × 6 (приблизительно 5 × 1 см) в течение 40 отсчетов (при разрешении 598 Гц, что составило 70 мс) с использованием явной разностной схемы, при этом скорость волны равнялась половине от максимально допустимой, а именно  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  (0,795 мм/мс), а коэффициент затухания  $p = 0,01$ . Затем применялся алгоритм переноса сетки на кору, при этом порог ошибки равен  $1 \times 10^{-5}$ , параметр гладкости  $\lambda = 5$ . После 10 итераций на коре было получено 94 узла. Мы интерполировали в них значения со 120 узлов на сетке и применили к ним нужные элементы прямой модели **G**. Обратная задача решалась тремя способами: MNE, LORETA и новым методом в соответствии с выражением (3). Параметр регуляризации  $\alpha$  для всех методов мы искали, пользуясь L-curve методом, и получили следующие значения: MNE —  $\alpha = 2,10 \times 10^{21}$ , LORETA —  $\alpha = 2,01 \times 10^{-19}$ , для нового метода  $\alpha = 6,83 \times 10^{-8}$ .

- Результаты моделирования тремя методами решения обратной задачи ЭЭГ по различным относительным ошибкам
- The results of modelling by three methods of solution of the inverse EEG problem along different relative errors

Норма	MNE		LORETA		Новый метод	
	Без шума	10 %-й шум	Без шума	10 %-й шум	Без шума	10 %-й шум
$\ Y - GJ\ _2 / \ Y\ _2$	0,1911	0,3462	$2,5199 \times 10^{-8}$	0,2820	$8,7113 \times 10^{-12}$	0,2963
$\ J\ _Q / \ J\ _2$	0,0020	0,0695	0,0001	26,8721	$2,1139 \times 10^{-24}$	$2,2466 \times 10^{-13}$
$\ J_0 - J\ _2 / \ J\ _2$	1,8983	1,8915	0,0833	1,1039	$5,5671 \times 10^{-8}$	0,6017

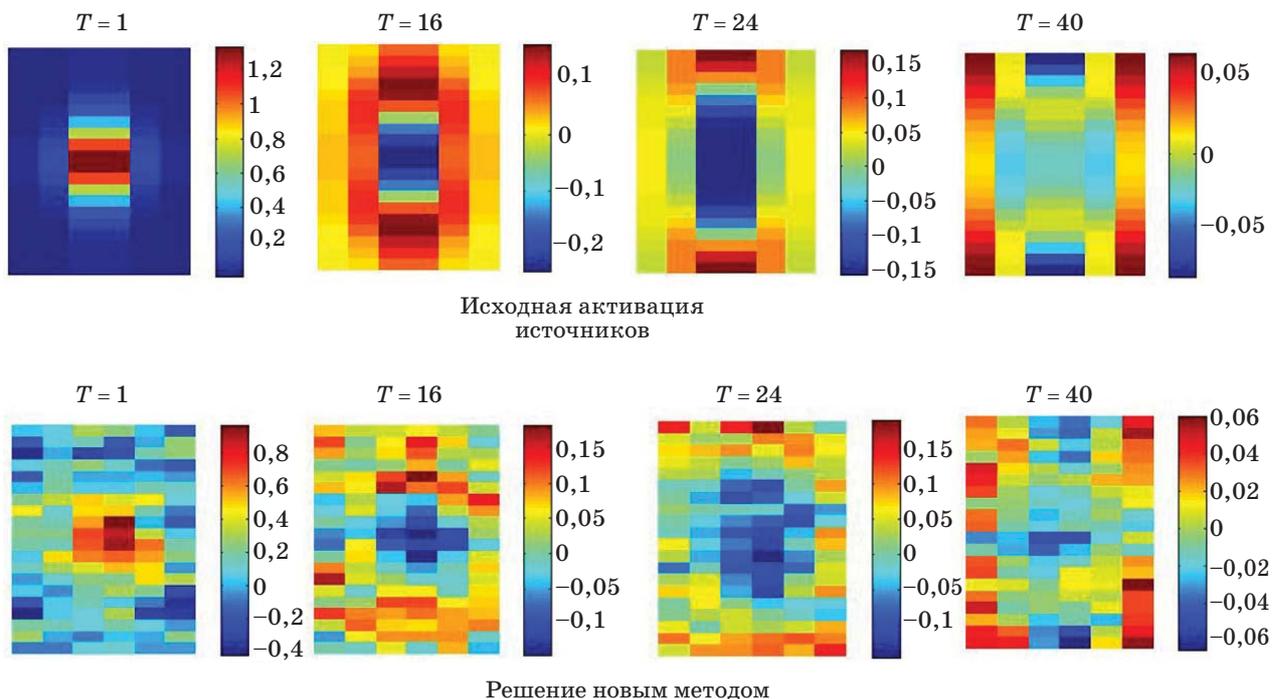


- **Рис. 8.** Визуализация результатов моделирования тремя методами решения обратной задачи ЭЭГ: начальная активация;  $T = 1$ ; шум 10%
- **Fig. 8.** Visualization of the results of modelling by three methods of solution of the inverse EEG problem: initial activation;  $T = 1$ ; noise 10%

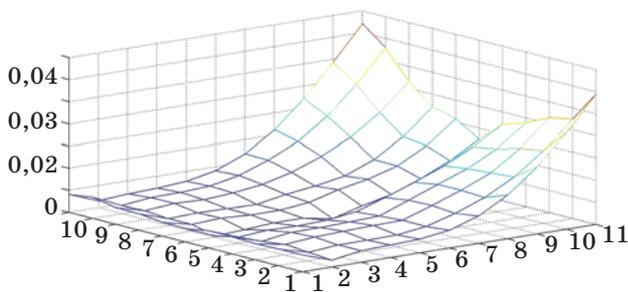
Результаты моделирования с шумом и без него приведены в таблице, а также на рис. 8 и 9. В таблице показаны относительные погрешности уравнения, относительные ошибки  $Q$ -нормы и относительные погрешности решения для нового метода, MNE и LORETA. В случае отсутствия шума имеется многократное улучшение точности оценки волны  $J_0$  по всем параметрам, при 10%-м шуме новый метод все равно дает более точные оценки волны  $J_0$ , чем MNE и LORETA. Однако при визуализации начальной активации источника  $T = 1$  становится понятно, что только новый метод показывает локализацию центра распространения волны  $J_0$ , другие методы не справляются с этой задачей (см. рис. 8). Дальнейшая визуализация направления распространения волны также показывает,

что с этой задачей справляется только новый метод (см. рис. 9). Таким образом, при 10%-м шуме использование волнового уравнения в качестве ограничителя исходного решения обратной задачи ЭЭГ дает значительное преимущество по сравнению с известными методами при локализации электрической активности головного мозга и поиску ее направленности.

На рис. 7 и 10 показаны результаты сканирования параметров исходной волны — скорости  $s$  и направления распространения  $\theta$ . Видно, что когда скорость становится больше искомой, относительная ошибка растет пропорционально модулю разности скоростей. Для углов наблюдается та же закономерность в любую сторону от искомого направления. Поэтому оценка параметра скорости происходит перебором возможных



■ **Рис. 9.** Визуализация результатов моделирования новым методом решения обратной задачи ЭЭГ: распространение волны;  $1 \leq T \leq 40$ ; шум 10 %  
 ■ **Fig. 9.** Visualization of the results of modelling by new method of solution of the inverse EEG problem: wave propagation;  $1 \leq T \leq 40$ ; noise 10 %



■ **Рис. 10.** Пространственное представление таблицы отклонений. Минимум значений соответствует наилучшему выбору параметров скорости и направления волны  
 ■ **Fig. 10.** The space representation of the deviation table. Minimum value corresponds to the best choice of the wave and speed parameters

значений от максимальной к минимальной, а оценка параметра направления происходит по всем значениям.

**Заключение**

В работе описан новый математический аппарат регуляризации обратной задачи, ограничивающий решения множеством пространственно-временных динамик, удовлетворяющих дву-

мерному волновому уравнению. На модельных данных показано, что новый метод дает более точные оценки, чем два других наиболее распространенных метода. Также был разработан способ оценки латентных параметров мозговой активности — скорости  $s$  и направления распространения волны  $\theta$  — с помощью относительной ошибки решения в предположении, что волна распространяется только в конкретном направлении. Кроме того, был сделан анализ зависимости ошибок решения от различного уровня шума в прямой модели и в пространстве сенсоров, а также от различного размера накладываемой сетки.

Таким образом, разработанный новый метод локализации электрической активности головного мозга позволяет достаточно точно восстановить исходную активность по имеющимся данным на сенсорах в предположении, что эта активность имеет волновую структуру.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 15-29-01344, и Санкт-Петербургского государственного университета, грант № 6.38.230.2015. Сравнительный анализ указанных в работе методов проведен в ИПМаш РАН при исключительной поддержке Российского научного фонда, грант № 14-29-00142.

## Литература

1. Jousmaki V. Tracking Functions of Cortical Networks on a Millisecond Timescale// *Neural Networks*. 2000. Vol. 13. P. 883–889.
2. Hamalainen M., Hari R., Ilmoniemi R. J., Knuutila J., Lounasmaa O. V. Magnetoencephalography — Theory, Instrumentation, and Applications to Noninvasive Studies of the Working Human Brain// *Rev. Mod. Phys.* 1993. Vol. 65 (2). P. 413–497.
3. Nunez P. L. *Electric Fields of the Brain*. — N. Y.: Oxford, 1981. — 626 p.
4. Gloor P. Neuronal Generators and the Problem of Localization in Electroencephalography: Application of Volume Conductor Theory to Electroencephalography// *J. Clin. Neurophysiol.* 1985. Vol. 2. P. 327–354.
5. Sarvas J. Basic Mathematical and Electromagnetic Concepts of the Biomagnetic Inverse Problem// *Phys. Med. Biol.* 1987. Vol. 32. P. 11–22.
6. Baillet S., Mosher J. C., Leahy R. M. Electromagnetic Brain Mapping// *Signal Processing Magazine. IEEE*, 2001. Vol. 18(6). P. 14–30.
7. Jeffs B., Leahy R., Singh M. An Evaluation of Methods for Neuromagnetic Image Reconstruction// *IEEE Trans. Biomed. Eng.* 1987. Vol. 34. P. 713–723.
8. Grech R. Review on Solving the Inverse Problem in EEG Source Analysis// *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*. 2008. Vol. 5. N 25. doi:10.1186/1743-0003-5-25
9. Pascual-Marqui R. D. Low Resolution Electromagnetic Tomography: A New Method for Localizing Electrical Activity in the Brain// *International Journal of Psychophysiology*. 1994. Vol. 18 (1). P. 49–65.
10. Patten T. M., Rennie C. J., Robinson P. A., Gong P. Human Cortical Traveling Waves: Dynamical Properties and Correlations with Responses// *PLOS ONE*. 2012. Vol. 7 (6). e38392.
11. Bahramisharif A., van Gerven M. A. J., Aarnoutse E. J., Mercier M. R., Schwartz T. H., Foxe J. J., Ramsey N. F., Jensen O. Propagating Neocortical Gamma Bursts are Coordinated by Traveling Alpha Waves// *The Journal of Neuroscience*. 2013. Vol. 33 (48). P. 18849–18854.
12. Alexander D. M., Jurica P., Trengove C., Nikolaev A. R., Gepshtein S., Zvyagintsev M., Mathiak K., Schulze-Bonhage A., Ruescher J., Ball T., van Leeuwen C. Traveling Waves and Trial Averaging: The Nature of Single-Trial and Averaged Brain Responses in Large-Scale Cortical Signals// *Neuroimage*. 2013. Vol. 73. P. 95–112.
13. Alexander D. M., Trengove C., van Leeuwen C. Donders is Dead: Cortical Traveling Waves and the Limits of Mental Chronometry in Cognitive Neuroscience // *Cogn Process*. Nov. 2015. Vol. 16 (4). P. 365–375.
14. Калиткин Н. Н. Численные методы. — СПб.: БХВ-Петербург, 2011. — 592 с.
15. Rohr K., Stiehl H. S. Landmark-Based Elastic Registration using Approximating Thin-Plate Splines// *IEEE Transactions on Medical Imaging*. June 2001. Vol. 20. N 6. P. 526–534.

UDC 681.3:612.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.12

## Regularization of EEG/MEG Inverse Problem with a Local Cortical Wave Pattern

Gorshkov A. A.<sup>a,b</sup>, Post-Graduate Student, andrey.a.gorshkov@gmail.comOssadtchi A. E.<sup>b,c</sup>, PhD, aossadtchi@hse.ruFradkov A. L.<sup>a,b</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, fradkov@mail.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University, 7/9, Universitetskaya Emb., 199034, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>c</sup>Centre for Cognition and Decision Making, National Research University Higher School of Economics, 46b, Volgogradsky Pr., 109316, Moscow, Russian Federation

**Introduction:** The space resolution of EEG/MEG depends on the inverse problem solution method. This problem is ill-posed because of fundamental physical issues and hence has an infinite number of solutions. Recent research has brought new evidence that cortical waves propagate through the cortex according to a wave pattern characterized by a certain direction and speed. New data about the space-time dynamics of neuronal activity propagation through the cortex require the revision of the long-standing paradigm in which a spatial activity structure is considered independently of the temporal dynamics. **Purpose:** We develop a new method for localizing electrical activity in the brain, which would allow us to fairly accurately restore the initial activity using the data from sensors under the assumption that this activity has a wave structure. **Results:** A new mathematical technique has been developed for the inverse problem regularization, which restricts the solutions by a set of space-time dynamics satisfying the two-dimensional wave equation defined on an irregular node grid approximating the cortical surface. This new method is implemented in correspondence with the tried and true methodology of general regularization of ill-posed problems on the base of minimizing the Q-norm of a solution. Model data comparison with two other common methods of inverse problem solution has shown that they do not retain the wave structure, whereas the new method does. It also provides the best estimation accuracy of the modeled activity. The regularization wave parameters are calculated in correspondence with the minimization of a relative error in the space of the sensors.

**Keywords** — Inverse EEG Problem, Wave Equation, Regularization, Difference Method, Control.

References

1. Jousmaki V. Tracking Functions of Cortical Networks on a Millisecond Timescale. *Neural Networks*, 2000, vol. 13, pp. 883–889.
2. Hamalainen M., Hari R., Ilmoniemi R. J., Knuutila J., Lounasmaa O. V. Magnetoencephalography — Theory, Instrumentation, and Applications to Noninvasive Studies of the Working Human Brain. *Rev. Mod. Phys.*, 1993, vol. 65(2), pp. 413–497.
3. Nunez P. L. *Electric Fields of the Brain*. New York, Oxford, 1981. 626 p.
4. Gloor P. Neuronal Generators and the Problem of Localization in Electroencephalography: Application of Volume Conductor Theory to Electroencephalography. *J. Clin. Neurophysiol.*, 1985, vol. 2, pp. 327–354.
5. Sarvas J. Basic Mathematical and Electromagnetic Concepts of the Biomagnetic Inverse Problem. *Phys. Med. Biol.*, 1987, vol. 32, pp. 11–22.
6. Baillet S., Mosher J. C., Leahy R. M. Electromagnetic Brain Mapping. *Signal Processing Magazine, IEEE*, 2001, vol. 18(6), pp. 14–30.
7. Jeffs B., Leahy R., Singh M. An Evaluation of Methods for Neuromagnetic Image Reconstruction. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1987, vol. 34, pp. 713–723.
8. Grech R. Review on Solving the Inverse Problem in EEG Source Analysis. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2008, vol. 5, no. 25, doi:10.1186/1743-0003-5-25.
9. Pascual-Marqui R. D. Low Resolution Electromagnetic Tomography: A New Method for Localizing Electrical Activity in the Brain. *International Journal of Psychophysiology*, 1994, vol. 18, pp. 49–65.
10. Patten T. M., Rennie C. J., Robinson P. A., Gong P. Human Cortical Traveling Waves: Dynamical Properties and Correlations with Responses. *PLOS ONE*, 2012, vol. 7(6), e38392.
11. Bahramisharif A., van Gerven M. A. J., Aarnoutse E. J., Mercier M. R., Schwartz T. H., Foxe J. J., Ramsey N. F., Jensen O. Propagating Neocortical Gamma Bursts are Coordinated by Traveling Alpha Waves. *The Journal of Neuroscience*, 2013, vol. 33(48), pp. 18849–18854.
12. Alexander D. M., Jurica P., Trengove C., Nikolaev A. R., Gepshtein S., Zvyagintsev M., Mathiak K., Schulze-Bonhage A., Ruescher J., Ball T., van Leeuwen C. Traveling Waves and Trial Averaging: The Nature of Single-Trial and Averaged Brain Responses in Large-Scale Cortical Signals. *Neuroimage*, 2013, vol. 73, pp. 95–112.
13. Alexander D. M., Trengove C., van Leeuwen C. Donders is Dead: Cortical Traveling Waves and the Limits of Mental Chronometry in Cognitive Neuroscience. *Cogn Process*, November 2015, vol. 16(4), pp. 365–375.
14. Kalitkin N. N. *Chislennyye metody* [Numerical Methods]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2011. 592 p. (In Russian).
15. Rohr K., Stiehl H. S. Landmark-Based Elastic Registration Using Approximating Thin-Plate Splines. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, June 2001, vol. 20, no. 6, pp. 526–534.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы регистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 519.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.21

# АЛГОРИТМ КОМПЕНСАЦИИ ПОМЕХ ИЗМЕРЕНИЯ И ВОЗМУЩЕНИЙ

И. Б. Фуртат<sup>а, б</sup>, доктор техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Институт проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Университет ИТМО, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** в теории и практике автоматического управления отдельное внимание уделяется задаче компенсации возмущений и помех измерения. Это связано с тем, что большинство технических и технологических процессов подвержены изменению параметров в течение функционирования; отрицательно сказывается влияние внешних воздействий на сам процесс; сигналы измерения содержат погрешности, значения которых зависят от внешней среды и характеристик измерительного устройства (типа устройства, абсолютной и относительной погрешностей и т. п.). В настоящее время отсутствуют работы, посвященные одновременной компенсации возмущений и помех измерения.

**Цель исследования:** синтез нового алгоритма управления, позволяющего одновременно компенсировать параметрические и внешние возмущения и помехи измерения. Получение условий расчета параметров алгоритма управления.

**Методы:** использованный в исследовании метод основан на принципе компенсации возмущений и поиске закона управления, значение которого противоположно значению возмущений. Такой подход позволяет управлять объектами без значительного увеличения амплитуды управляющего воздействия, что важно при решении прикладных задач.

**Результаты:** синтезирован алгоритм стабилизации линейной системы, когда доступен измерению сигнал, равный сумме вектора состояния объекта и вектора помехи. Параметрические и внешние возмущения могут присутствовать в любом уравнении модели объекта. Получены достаточные условия расчета параметров регулятора для обеспечения устойчивости замкнутой системы. Результаты аналитически доказаны. Эффективность алгоритма продемонстрирована в ходе компьютерного моделирования. **Практическая значимость:** в отличие от существующих адаптивных и робастных алгоритмов управления, разработанный алгоритм обеспечивает более высокую точность управления техническими системами в условиях возмущений и помех измерения.

**Ключевые слова** – возмущение, помеха измерения, динамическая компенсация, наблюдатель производных.

## Введение

Задача синтеза систем управления, позволяющих компенсировать параметрические и внешние возмущения в условиях помех измерения, была и остается одной из ключевых проблем теории и практики автоматического регулирования. Это связано с тем, что технические и технологические процессы подвержены изменению параметров, отрицательно сказываются внешние воздействия на сам процесс и сигналы измерения, качество измерений зависит от особенности соответствующих устройств. Примером может служить управление электрическим генератором в общей энергетической сети [1, 2], где изменение сопротивления линий электропередач обусловлено внешними воздействиями (коротким замыканием, суточными изменениями нагрузки, обледенением и т. п.). До сих пор остается открытой проблема [1, 2] качественного управления электрическим генератором при наличии погрешности в измерениях угла поворота ротора относительно синхронной оси вращения, угловой скорости ротора и переходной электродвижущей силы, особенно в аварийных режимах.

В настоящее время разработано немало методов и подходов для решения задачи компенсации возмущений и помех измерения. Так, для компенсации возмущений используются метод ин-

вариантных эллипсоидов [3], методы на базе внутренней модели возмущений [4], методы идентификации параметров синусоидальных возмущений [5], метод вложения систем [6], метод синтеза универсальных регуляторов [7], метод вспомогательного контура [8] и т. д. Для построения алгоритмов управления при наличии помех в канале измерения используются метод  $H_\infty$ -оптимизации [9], метод вспомогательного контура [8], методы анализа влияния помех измерения на качество работы замкнутой системы [10–12] и т. д.

Отметим, что А. М. Цыкуновым [8] получен алгоритм компенсации возмущений и помех для структуры матриц модели объекта при более общих условиях по сравнению с работой [9]. Так, в [8] не требуется, чтобы произведение матрицы перед возмущением на матрицу перед помехой было равно нулю. Также в работе [8] рассматриваются произвольные внешние ограниченные возмущения, а не синусоидальные, как в статье [5]. Однако автором [8] предполагается, что размерность помехи должна быть меньше размерности вектора состояния объекта, параметрические и внешние возмущения могут присутствовать только в определенных уравнениях модели объекта, отсутствуют аналитические условия расчета параметров алгоритма управления. Решению данных проблем и посвящена настоящая статья.

Для синтеза алгоритма компенсации помехи будет развит предложенный [8] подход с использованием нашего результата [13] на случай действия помех, размерность которых равна размерности вектора состояния объекта, а также наличия возмущений в любом уравнении модели объекта. Для компенсации возмущений будет рассмотрен подход [13] с использованием наблюдателя производных. Дополнительно, в отличие от работы [8], будут получены аналитические условия расчета параметров регулятора.

**Постановка задачи стабилизации линейной системы в условиях возмущений и помех измерения**

Пусть модель объекта управления описывается следующими уравнениями:

$$\dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}u(t) + \mathbf{B}f(\mathbf{x}, u, t); \tag{1}$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{x}(t) + \boldsymbol{\xi}(t), \tag{2}$$

где  $\mathbf{A}$  — известная гурвицева матрица соответствующей размерности;  $\mathbf{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T$  — вектор состояния;  $\mathbf{B} = [b_1, \dots, b_n]^T, b_i \neq 0; u(t) \in R$  — сигнал управления;  $f(\mathbf{x}, u, t) \in R$  — функция, зависящая от параметрических и внешних возмущений;  $\mathbf{z}(t) \in R^n$  — сигнал, доступный измерению;  $\boldsymbol{\xi}(t) = [\xi_1(t), \dots, \xi_n(t)]^T$  — помеха измерения.

При решении задачи на объект управления (1), (2) наложим следующие предположения.

1. Сигнал возмущения  $f(\mathbf{x}, u, t)$  представлен в виде  $f(\mathbf{x}, u, t) = c_{01}^T \mathbf{x}(t) + c_{02} u(t) + c_{03} \varphi(t)$ , где  $c_{01} \in R^n, c_{02} \in R$  и  $c_{03} \in R$  — неизвестные постоянные вектор и числа, принадлежащие известному компактному множеству  $\Xi$ ;  $\varphi(t)$  — ограниченная функция вместе с ее первой производной.

2. Пара  $(\mathbf{A} + \mathbf{B}c_{01}^T, \mathbf{B} + \mathbf{B}c_{02})$  — управляема для всех  $c_{01}$  и  $c_{02}$  из  $\Xi$ .

3. Доступен измерению только сигнал  $\mathbf{z}(t)$ .

Требуется спроектировать систему управления, которая обеспечит выполнение целевого условия

$$|\mathbf{x}(t)| < \delta \text{ при } t > \tau, \tag{3}$$

где  $\delta > 0$  — точность регулирования;  $\tau > 0$  — время переходного процесса. Здесь и далее  $|\cdot|$  — евклидова норма соответствующего вектора.

**Алгоритм компенсации помех измерения**

Перепишем уравнение (2) в виде

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{x}(t) + \sum_{j=1}^n \mathbf{E}_j \xi_j(t), \tag{4}$$

где  $\mathbf{E}_j = [0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0]^T$  — вектор соответствующей размерности, у которого  $j$ -я компонента равна 1, а остальные нулю.

Обозначим

$$\tilde{\boldsymbol{\xi}}(t) = [\xi_1(t), \dots, \xi_{i-1}(t), \xi_{i+1}(t), \dots, \xi_n(t)]^T;$$

$$\tilde{\mathbf{E}} = [\mathbf{E}_1, \dots, \mathbf{E}_{i-1}, \mathbf{E}_{i+1}, \dots, \mathbf{E}_n].$$

Перепишем (4) как

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{x}(t) + \tilde{\mathbf{E}}\tilde{\boldsymbol{\xi}}(t) + \mathbf{E}_i \xi_i(t). \tag{5}$$

Исключим  $i$ -е уравнение в (5). Для этого умножим (5) слева на  $\tilde{\mathbf{I}}$  — матрицу размерности  $(n - 1) \times n$ , полученную из единичной матрицы порядка  $n$  путем вычеркивания  $i$ -й строки. В результате

$$\tilde{\mathbf{z}}(t) = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{x}(t) + \tilde{\boldsymbol{\xi}}(t), \tag{6}$$

где  $\tilde{\mathbf{z}}(t) = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{z}(t)$ .

Продифференцируем (6) по времени вдоль траекторий системы (1):

$$\dot{\tilde{\mathbf{z}}}(t) = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{B}u(t) + \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{B}f(\mathbf{x}, u, t) + \dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}}(t). \tag{7}$$

Выразим в (5) переменную  $\mathbf{x}(t)$  и подставим ее в (7):

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\mathbf{z}}}(t) = & \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{A}\mathbf{z}(t) - \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{A}\tilde{\mathbf{E}}\tilde{\boldsymbol{\xi}}(t) - \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{A}\mathbf{E}_i \xi_i(t) + \\ & + \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{B}u(t) + \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{B}f(\mathbf{x}, u, t) + \dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}}(t). \end{aligned} \tag{8}$$

Введем обозначения

$$\tilde{\mathbf{A}} = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{A}\tilde{\mathbf{E}}, \tilde{\mathbf{A}}_1 = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{A}, \tilde{\mathbf{A}}_2 = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{A}\mathbf{E}_i, \tilde{\mathbf{B}} = \tilde{\mathbf{I}}\mathbf{B}$$

и перепишем (8) в виде

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}}(t) = & \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\boldsymbol{\xi}}(t) + \dot{\tilde{\mathbf{z}}}(t) - \tilde{\mathbf{A}}_1\mathbf{z}(t) - \tilde{\mathbf{B}}u(t) - \\ & - \tilde{\mathbf{B}}f(\mathbf{x}, u, t) + \tilde{\mathbf{A}}_2 \xi_i(t). \end{aligned} \tag{9}$$

Если бы сигналы  $f$  и  $\xi_i$  были доступны измерению, то решение уравнения (9) позволило бы получить точное значение вектора  $\tilde{\boldsymbol{\xi}}$ . Однако сигналы  $f$  и  $\xi_i$  не доступны измерению по условию задачи. Введем в рассмотрение вектор  $\tilde{\boldsymbol{\xi}}$ , который является оценкой вектора  $\tilde{\boldsymbol{\xi}}$  и определяется выражением

$$\dot{\tilde{\boldsymbol{\xi}}}(t) = \tilde{\mathbf{A}}\tilde{\boldsymbol{\xi}}(t) + \dot{\tilde{\mathbf{z}}}(t) - \tilde{\mathbf{A}}_1\mathbf{z}(t). \tag{10}$$

Для реализации алгоритма (10) требуется информация о производной  $\dot{\tilde{\mathbf{z}}}(t)$ , которую можно получить, используя наблюдатель производных. Воспользуемся следующей процедурой

для исключения наблюдателя. Найдем решение дифференциального уравнения (10) в виде

$$\bar{\xi}(t) = \int_0^t [\tilde{A}\bar{\xi}(s) - \tilde{A}_1 z(s)] ds + \tilde{z}(t) + \bar{\xi}(0) - \tilde{z}(0). \quad (10)$$

Очевидно, что для реализации последнего уравнения требуется информация о начальном условии  $\tilde{z}(0)$ . Покажем независимость оценки помехи от знания начального условия  $\tilde{z}(0)$ . Сформируем новый алгоритм оценки помехи в виде

$$\hat{\xi}(t) = \int_0^t [\tilde{A}\hat{\xi}(s) - \tilde{A}_1 z(s)] ds + \tilde{z}(t) + \gamma, \quad (11)$$

где  $\hat{\xi}(t)$  — новый вектор оценки сигнала  $\hat{\xi}(t)$ ;  $\gamma = \hat{\xi}(0) - \tilde{z}$ ,  $\tilde{z}$  — оценка значения  $\tilde{z}(0)$ . Если матрица  $\tilde{A}$  гурвицева, то разность между векторами  $\hat{\xi}(t)$  и  $\bar{\xi}(t)$  экспоненциально стремится к нулю, так как  $\dot{\hat{\xi}}(t) - \dot{\bar{\xi}}(t) = \tilde{A}(\hat{\xi}(t) - \bar{\xi}(t))$  в силу (10) и (11).

Рассмотрим ошибку

$$e(t) = \hat{\xi}(t) - \bar{\xi}(t), \quad (12)$$

которая характеризует качество оценивания вектора  $\hat{\xi}(t)$  с использованием алгоритма (11). Учитывая (10) и (11), продифференцируем (12) по времени:

$$\dot{e}(t) = \tilde{A}e(t) - \tilde{B}(u(t) + f(x, u, t)) + \tilde{A}_2 \xi_i(t). \quad (13)$$

Из уравнения (13) следует, что на величину ошибки  $e(t)$  влияют значения функций  $u(t)$  и  $f(x, u, t)$ . Очевидно, что соответствующим выбором сигнала управления  $u(t)$  можно уменьшить влияние возмущения  $f(x, u, t)$  на качество оценивания вектора  $\hat{\xi}(t)$ . Решению данной проблемы посвящен следующий раздел.

### Алгоритм компенсации возмущений

Выпишем в системе (1)  $i$ -е уравнение. Для этого умножим слева (1) на матрицу  $E_i$ :

$$\dot{x}_i(t) = E_i^T A x(t) + E_i^T B u(t) + E_i^T B f(x, u, t), \quad (14)$$

где  $x_i(t) = E_i^T x(t)$ . Выразим в (14) возмущение как

$$f(x, u, t) = (E_i^T B)^{-1} \times \left[ \dot{x}_i(t) - E_i^T A x(t) - E_i^T B u(t) \right]. \quad (15)$$

Из (15) следует, что для получения информации о возмущении  $f(x, u, t)$  необходима информация о сигналах  $x(t)$  и  $\dot{x}_i(t)$ . Однако данная ин-

формация напрямую не доступна из постановки задачи. Поэтому дальнейшие действия посвящены получению оценок сигналов  $x(t)$  и  $\dot{x}_i(t)$ , которые позволят сформировать оценку возмущения  $\hat{f}(x, u, t)$ .

В предыдущем разделе был синтезирован алгоритм (11), который позволяет оценить часть сигнала помехи  $\xi(t)$  в (2) в виде функции  $\hat{\xi}(t)$ . Воспользуемся функцией  $\hat{\xi}(t)$  для уточнения значения вектора состояния  $x(t)$ .

Пусть  $\hat{x}(t)$  — оценка вектора  $x(t)$ . Принимая во внимание (5) и (12), запишем выражение для  $\hat{x}(t)$  в виде

$$\hat{x}(t) = z(t) - \tilde{E}\hat{\xi}(t) = x(t) + \tilde{E}e(t) + E_i \xi_i(t). \quad (16)$$

Для оценки сигнала  $\dot{x}_i(t)$  воспользуемся наблюдателем

$$(\mu p + 1)\bar{x}_i(t) = p\hat{x}_i(t), \quad (17)$$

где  $\mu > 0$  — малое число;  $p = d/dt$ . Наблюдатель (17) представляет собой реальное дифференцирующее звено.

В результате выражение для оценки возмущения  $f$  можно записать как

$$\hat{f}(x, u, t) = (E_i^T B)^{-1} \times \left[ \bar{x}_i(t) - E_i^T A \hat{x}(t) - \alpha E_i^T B u(t) \right], \quad (18)$$

где  $\bar{x}_i(t)$  — оценка сигнала  $\dot{x}_i(t)$ ;  $0 < \alpha < 1$ .

Для компенсации возмущения введем закон управления в виде

$$u(t) = -\hat{f}(x, u, t). \quad (19)$$

Выразим из (18) и (19) сигнал управления как

$$u(t) = -\frac{1}{1-\alpha} (E_i^T B)^{-1} \left[ \bar{x}_i(t) - E_i^T A \hat{x}(t) \right]. \quad (20)$$

Перед формулировкой основного результата введем следующие обозначения:

$$\begin{aligned} A_1 &= A + \frac{1-\alpha}{2-\alpha+c_{02}} B c_{01}^T; \\ B_1 &= -B (E_i^T B)^{-1} \frac{1+c_{02}}{2-\alpha+c_{02}}; \\ B_2 &= B (E_i^T B)^{-1} \frac{1+c_{02}}{2-\alpha+c_{02}} E_i^T A \tilde{E}; \\ B_3 &= -B (E_i^T B)^{-1} \frac{1+c_{02}}{2-\alpha+c_{02}} E_i^T A E_i; \\ B_4 &= B \frac{\alpha-1}{2-\alpha+c_{02}} c_{03}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{A}}_{11} &= \tilde{\mathbf{A}} - \tilde{\mathbf{B}} \frac{1+c_{02}}{2-\alpha+c_{02}} (\mathbf{E}_i^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{E}_i^T \mathbf{A} \tilde{\mathbf{E}}; \\ \tilde{\mathbf{B}}_1 &= -\tilde{\mathbf{B}} \frac{1-\alpha}{2-\alpha+c_{02}} \mathbf{c}_{01}^T; \\ \tilde{\mathbf{B}}_2 &= -\tilde{\mathbf{B}} \frac{1-\alpha}{2-\alpha+c_{02}} c_{03}; \quad \tilde{\mathbf{B}}_3 = \tilde{\mathbf{B}} \frac{1+c_{02}}{2-\alpha+c_{02}} (\mathbf{E}_i^T \mathbf{B})^{-1}; \\ \tilde{\mathbf{B}}_4 &= \tilde{\mathbf{A}}_2 - \tilde{\mathbf{B}} \frac{1+c_{02}}{2-\alpha+c_{02}} (\mathbf{E}_i^T \mathbf{B})^{-1} \mathbf{E}_i^T \mathbf{A} \mathbf{E}_i; \\ \mathbf{A}_{31} &= (1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1)^{-1} [\mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1^2 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_1]; \\ \mathbf{A}_{32} &= (1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1)^{-1} (\mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_2 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{A}}_{11}); \\ \mathbf{A}_{33} &= -\frac{1}{\mu} + (1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1)^{-1} \times \\ &\times \left( -\mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1 \frac{1}{\mu} - \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_3 \right); \\ D_{31} &= (1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1)^{-1} (\mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_4 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_2); \\ D_{32} &= (1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1)^{-1} \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_4; \\ D_{33} &= (1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1)^{-1} (\mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_3 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_4); \\ D_{34} &= (1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1)^{-1} (\mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_3 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_3); \\ \mathbf{D} &= \begin{bmatrix} \mathbf{B}_4 & \mathbf{0} & \mathbf{B}_3 & \mathbf{B}_1 & \mathbf{0} \\ \tilde{\mathbf{B}}_2 & \mathbf{0} & \tilde{\mathbf{B}}_4 & \tilde{\mathbf{B}}_3 & \mathbf{0} \\ D_{31} & D_{32} & D_{33} & D_{34} & 1 \end{bmatrix}; \\ \mathbf{A}_e &= \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1 & \mathbf{B}_2 & -\mathbf{B}_1 \\ \tilde{\mathbf{B}}_1 & \tilde{\mathbf{A}}_{11} & -\tilde{\mathbf{B}}_3 \\ \mathbf{A}_{31} & \mathbf{A}_{32} & \mathbf{A}_{33} \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (21)$$

**Утверждение.** Пусть выполнены условия предположений 1–3, матрица  $\tilde{\mathbf{A}}$  — гурвицева,  $\xi(t)$  — ограниченная помеха вместе с ее первой производной,  $i$ -я компонента вектора  $\xi(t)$  дважды дифференцируема и ограничена, а также существуют коэффициенты  $\alpha$  и  $\mu$  такие, что матрица  $\mathbf{A}_e$  — гурвицева. Тогда система управления, состоящая из алгоритма оценки помехи (11), закона управления (20) и наблюдателя (17), обеспечивает выполнение целевого условия (3) с точностью

$$\delta = \sqrt{\lambda_{\min}^{-1}(\mathbf{P}) \left( V(0) - \chi^{-1} |\mathbf{d}|^2 \right) e^{-\rho T} + \rho^{-1} \chi^{-1} \bar{d}^2}. \quad (22)$$

Здесь

$$V = \mathbf{x}_e^T(t) \mathbf{P} \mathbf{x}_e(t), \quad (23)$$

$$\mathbf{x}_e(t) = \left[ \mathbf{x}^T(t), \mathbf{e}^T(t), \eta(t) \right]^T;$$

$$\eta(t) = \hat{x}_i(t) - \bar{x}_i(t); \quad (24)$$

$\mathbf{P} = \mathbf{P}^T > \mathbf{0}$  — матрица, при которой выполнено линейное матричное неравенство  $\mathbf{A}_e^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A}_e < -\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{Q} = \mathbf{Q}^T > \mathbf{0}$ ,  $\mathbf{R} = \mathbf{Q} - \chi \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{D}^T \mathbf{P}$ ,  $\chi > 0$  такое, что  $\mathbf{R} > \mathbf{0}$ ,  $\rho = \lambda_{\min}(\mathbf{R}) / \lambda_{\max}(\mathbf{P})$ ,  $\bar{d} = \sup_{t \geq 0} |\mathbf{d}(t)|$ ,  $\mathbf{d}(t) = [\varphi(t), \phi(t), \xi_i(t), \dot{\xi}_i(t), \ddot{\xi}_i(t)]^T$ .

Оценка предельного множества  $|x|$  определяется в виде

$$\limsup_{t \rightarrow \infty} |x(t)| < \sqrt{\frac{\lambda_{\min}(\mathbf{P}) \bar{d}}{\rho \chi}}. \quad (25)$$

**Замечание.** Из (13) и доказательства утверждения следует, что существенный вклад в точность регулирования  $\delta$  вносит  $i$ -я составляющая помехи  $\xi_i(t)$ . Поэтому для синтеза алгоритма управления можно воспользоваться следующей рекомендацией. Предположим, что в (1) у вектора  $\mathbf{B}$  компоненты  $b_k$  и  $b_l$  не равны нулю; сигналы  $\xi_k(t)$  и  $\xi_l(t)$  ограничены вместе с двумя производными;  $\int_T^t |\xi_k(s)| ds \leq \int_T^t |\xi_l(s)| ds$  при  $t > T$ . Тогда для синтеза алгоритма компенсации возмущений рекомендуется выбирать  $k$ -е уравнение в системе (1).

### Пример исследования работоспособности разработанной схемы управления

Рассмотрим объект управления (1), (2) в виде

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{x} + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{bmatrix} f(\mathbf{x}, u, t), \quad (26)$$

$$\mathbf{z}(t) = \mathbf{x}(t) + \xi(t).$$

Множество возможных значений  $\Xi$  задано следующими неравенствами:

$$|c_{01}^1| \leq 5, \quad |c_{01}^2| \leq 5, \quad |c_{01}^3| \leq 5, \quad 0,5 \leq c_{02} \leq 2, \quad |c_{03}| \leq 5,$$

где  $\mathbf{c}_{01} = [c_{01}^1, c_{01}^2, c_{01}^3]^T$ . Дополнительно  $|\varphi(t)| \leq 7$ .

Сформируем систему управления. В качестве  $i$ -го уравнения выберем третье уравнение в системе (26). Тогда  $\tilde{\mathbf{I}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ . Следовательно:

$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $\tilde{\mathbf{A}}_1 = \begin{bmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ . Примем  $\gamma = 0$  и сформируем алгоритм оценки сигнала помехи (11) в виде

$$\hat{\xi}(t) = \int_0^t \left( \begin{bmatrix} -3 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \hat{\xi}(s) - \begin{bmatrix} -3 & 1 & 0 \\ -3 & 0 & 1 \end{bmatrix} \mathbf{z}(s) \right) ds + \tilde{\mathbf{z}}(t), \quad (27)$$

где  $\tilde{\mathbf{z}}(t) = [z_1(t), z_2(t)]^T$ .

Наблюдатель зададим в виде (17). Так как  $\mathbf{E}_i = [0, 0, 1]^T$ , то  $\mathbf{E}_i^T \mathbf{B} = 3$  и  $\mathbf{E}_i^T \mathbf{A} = [-1, 0, 0]$ . Согласно (20) сигнал управления определится в виде

$$u(t) = -\frac{1}{3(1-\alpha)} (\bar{x}_i(t) - [-1, 0, 0] \hat{x}(t)), \quad (28)$$

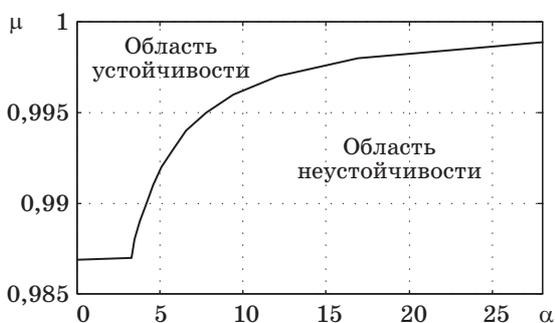
где  $\hat{x}(t) = \mathbf{z}(t) - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \hat{\xi}(t)$  из (16).

На рис. 1 изображены области устойчивости матрицы  $\mathbf{A}_e$ , заданной в (21), по параметрам  $\alpha$  и  $\mu$  с учетом множества возможных значений  $\Xi$ .

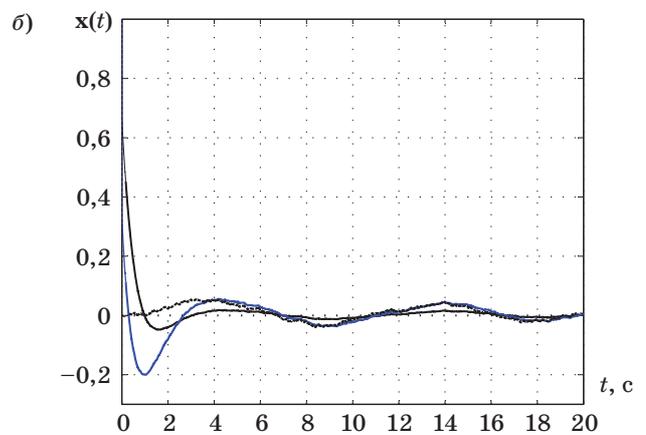
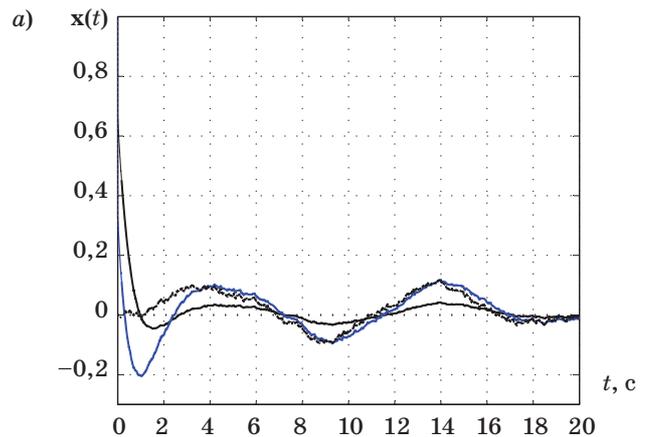
Выберем  $\alpha = 0,998$  и  $\mu = 0,05$  в (17) и (28). Зададим начальные условия в (26) в виде  $\mathbf{x}(0) = [1, 1, 1]^T$ . Пусть

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}, u, t) &= 5x_1(t) + 5x_2(t) + 5x_3(t) + \\ &+ 0,5u(t) + 0,1 + 2\sin 0,7t + d_1(t); \\ \xi_1(t) &= 1 + 10\sin 3t + d_2(t); \\ \xi_2(t) &= -2 + 7\cos 3t + d_3(t); \\ \xi_3(t) &= 0,01\sin 0,8t + d_4(t). \end{aligned} \quad (29)$$

В (29)  $d_1(t)$ ,  $d_2(t)$ ,  $d_3(t)$  и  $d_4(t)$  — случайные кусочно-постоянные функции, подчиненные равномерному закону распределения с нулевыми математическими ожиданиями, нулевыми дисперсиями и длительностями соответственно 0,07, 0,01, 0,03 и 0,1 с. Дополнительно  $|d_1(t)| \leq 5$ ,  $|d_2(t)| \leq 10$ ,



■ **Рис. 1.** Области устойчивости замкнутой системы по параметрам  $\mu$  и  $\alpha$   
 ■ **Fig. 1.** Stability domains of the closed-loop system under parameters  $\mu$  and  $\alpha$



■ **Рис. 2.** Переходный процесс по  $\mathbf{x}(t)$  при возмущении и помехе вида (29) (а) и (30) (б)  
 ■ **Fig. 2.** The transients on  $\mathbf{x}(t)$  under disturbance and measurement noise (29) (а) and (30) (б)

$|d_3(t)| \leq 12$  и  $|d_4(t)| \leq 0,05$ . Результаты переходных процессов по  $\mathbf{x}(t)$  показаны на рис. 2, а.

Пусть

$$\begin{aligned} f(\mathbf{x}, u, t) &= 5x_1(t) - 5x_2(t) + 5x_3(t) + \\ &+ 2u(t) + 0,2 + 2\sin 2t + d_1(t); \\ z_1 &= q_1(x_1); z_2 = q_2(x_2), z_3 = x_3, \end{aligned} \quad (30)$$

где  $q_1$  и  $q_2$  — функции квантования по уровню с интервалом квантования 0,5 и 1,3 соответственно. В работах [10, 11] отмечалось, что сигнал квантования по уровню можно представить в виде аддитивной помехи измерения. Результаты переходных процессов по  $\mathbf{x}(t)$  для недифференцирующих составляющих помехи представлены на рис. 2, б.

Из рис. 2 видно, что система управления обеспечивает компенсацию возмущений и помех измерения после 3 с с точностью 0,1 и 0,05 соответственно. При этом возмущение и помеха содержат сигналы с широким диапазоном частот.

Также, в отличие от расчетов в работе [8], расчет параметров в системе управления (17), (27) и (28), согласно утверждению, можно осуществлять на этапе проектирования (см. рис. 1), а не подбором параметров на этапе моделирования.

### Заключение

Получен алгоритм компенсации возмущений и помех измерения, действующих на линейные динамические объекты с неизвестными параметрами. Рассмотрен алгоритм компенсации помех, размерность которых равна размерности вектора состояния, при этом возмущение может присутствовать в любом уравнении модели объекта, в отличие от работы [8]. Также получены условия, которые позволяют рассчитывать коэффициенты алгоритма управления для обеспечения устойчивости замкнутой системы. Показано, что качество регулирования в установленном режиме существенно зависит от величины компоненты помехи, которая присутствует при синтезе системы компенсации возмущений. Результаты моделирования подтвердили результаты аналитических расчетов и эффективность системы управления.

Алгоритм компенсации помехи измерения получен при поддержке гранта Президента Российской Федерации (договор № 14.W01.16.6325-МД (МД-6325.2016.8)). Алгоритм компенсации возмущений получен при поддержке РФФИ (грант № 14-29-00142) в ИПМаш РАН. Другие результаты получены при финансовой поддержке грантов РФФИ (№ 16-08-00282, 16-08-00686, 17-08-01266), ведущих университетов Российской Федерации (субсидия 074-U01) и поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект 14.Z50.31.0031).

### ПРИЛОЖЕНИЕ

#### Доказательство утверждения

Сформируем уравнение замкнутой системы по переменным  $\mathbf{x}(t)$ ,  $\mathbf{e}(t)$  и  $\eta(t)$ . Вначале рассмотрим уравнение ошибки (13), которое характеризует качество оценивания сигнала  $\hat{x}_i(t)$  с использованием наблюдателя (17). Учитывая (24), продифференцируем  $\eta(t)$  по времени:

$$\dot{\eta}(t) = -\frac{1}{\mu}\eta(t) + \ddot{x}_i(t). \quad (\text{П.1})$$

Принимая во внимание (16), перепишем (П.1) как

$$\dot{\eta}(t) = -\frac{1}{\mu}\eta(t) + \ddot{x}_i(t) + \ddot{\xi}_i(t). \quad (\text{П.2})$$

С учетом (16) качество оценки  $\bar{x}_i(t)$  по отношению к  $\dot{x}_i(t)$  можно записать в виде

$$\begin{aligned} \bar{x}_i(t) - \dot{x}_i(t) &= (\bar{x}_i(t) - \hat{x}_i(t)) + (\hat{x}_i(t) - \dot{x}_i(t)) = \\ &= -\eta(t) + \dot{\xi}_i(t). \end{aligned} \quad (\text{П.3})$$

Выразим сигнал управления  $u(t)$  из (18) и (19) в виде

$$\begin{aligned} u(t) &= -\left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \left[ \dot{x}_i(t) - \mathbf{E}_i^T \mathbf{A} \mathbf{x}(t) - \mathbf{E}_i^T \mathbf{B} u(t) \right] - \\ &\quad - \left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \left[ \bar{x}_i(t) - \dot{x}_i(t) \right] + \left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \times \\ &\quad \times \mathbf{E}_i \mathbf{A} \left[ \hat{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{x}(t) \right] + u(t) [\alpha - 1]. \end{aligned} \quad (\text{П.4})$$

Принимая во внимание предположение 1, (П.1) и (П.3), перепишем (П.4) как

$$\begin{aligned} u(t) &= -\mathbf{c}_{01}^T \mathbf{x}(t) - c_{02} u(t) - c_{03} \varphi(t) - \\ &\quad - \left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \left[ -\eta(t) + \dot{\xi}_i(t) \right] + \\ &\quad + \left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \mathbf{E}_i \mathbf{A} \left[ \tilde{\mathbf{E}} \mathbf{e}(t) + \mathbf{E}_i \xi_i(t) \right] + u(t) [\alpha - 1]. \end{aligned} \quad (\text{П.5})$$

Выразим в (П.5) сигнал  $u(t)$  в виде

$$\begin{aligned} u(t) &= \frac{1}{2 - \alpha + c_{02}} \left( -\mathbf{c}_{01}^T \mathbf{x}(t) - c_{03} \varphi(t) - \right. \\ &\quad \left. - \left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \left[ -\eta(t) + \dot{\xi}_i(t) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \mathbf{E}_i^T \mathbf{A} \left[ \tilde{\mathbf{E}} \mathbf{e}(t) + \mathbf{E}_i \xi_i(t) \right] \right). \end{aligned} \quad (\text{П.6})$$

Принимая во внимание предположение 1 и (П.6), запишем выражение для  $u(t) + f(\mathbf{x}, u, t)$  в виде

$$\begin{aligned} u(t) + f(\mathbf{x}, u, t) &= \frac{1 - \alpha}{2 - \alpha + c_{02}} \left( \mathbf{c}_{01}^T \mathbf{x}(t) + c_{03} \varphi(t) \right) + \\ &\quad + \frac{1 + c_{02}}{2 - \alpha + c_{02}} \left( -\left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \left[ -\eta(t) + \dot{\xi}_i(t) \right] + \right. \\ &\quad \left. + \left(\mathbf{E}_i^T \mathbf{B}\right)^{-1} \mathbf{E}_i^T \mathbf{A} \left[ \tilde{\mathbf{E}} \mathbf{e}(t) + \mathbf{E}_i \xi_i(t) \right] \right). \end{aligned} \quad (\text{П.7})$$

Подставив (П.7) в (13) и принимая во внимание обозначения (21), получим

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{e}}(t) &= \tilde{\mathbf{A}}_{11} \mathbf{e}(t) + \tilde{\mathbf{B}}_1 \mathbf{x}(t) + \tilde{\mathbf{B}}_2 \varphi(t) + \\ &\quad + \tilde{\mathbf{B}}_3 \left[ -\eta(t) + \dot{\xi}_i(t) \right] + \tilde{\mathbf{B}}_4 \xi_i(t). \end{aligned} \quad (\text{П.8})$$

Теперь определим сигнал  $\ddot{x}_i(t)$  в (П.2). С учетом обозначений (21) подставим (П.7) в (1). В результате получим

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1 \left( -\eta_2(t) + \dot{\xi}_i(t) \right) + \\ &\quad + \mathbf{B}_2 \mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_3 \xi_i(t) + \mathbf{B}_4 \varphi(t). \end{aligned} \quad (\text{П.9})$$

Выделим  $i$ -ю строку в (П.9), умножив слева (П.9) на матрицу  $\mathbf{E}_i^T$ :

$$\dot{x}_i(t) = \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1 (-\eta(t) + \dot{\xi}_i(t)) + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \mathbf{e}(t) + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_3 \dot{\xi}_i(t) + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_4 \varphi(t). \quad (\text{П.10})$$

Принимая во внимание уравнения (П.2) и (П.8), продифференцируем (П.10):

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i(t) = & \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \left[ \mathbf{A}_1 \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_1 (-\eta(t) + \dot{\xi}_i(t)) + \right. \\ & \left. + \mathbf{B}_2 \mathbf{e}(t) + \mathbf{B}_3 \dot{\xi}_i(t) + \mathbf{B}_4 \varphi(t) \right] + \\ & + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1 \left( \frac{1}{\mu} \eta(t) - \ddot{x}_i(t) \right) + \\ & + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 (\tilde{\mathbf{A}}_{11} \mathbf{e}(t) + \tilde{\mathbf{B}}_1 \mathbf{x}(t) + \tilde{\mathbf{B}}_2 \varphi(t) + \\ & + \tilde{\mathbf{B}}_3 [-\eta(t) + \dot{\xi}_i(t)] + \tilde{\mathbf{B}}_4 \xi_i(t)) + \\ & + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_3 \dot{\xi}_i(t) + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_4 \dot{\varphi}(t). \end{aligned} \quad (\text{П.11})$$

Разрешим (П.11) относительно  $\ddot{x}_i(t)$  в виде

$$\begin{aligned} \ddot{x}_i(t) = & \left( 1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1 \right)^{-1} \left\{ \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1^2 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_1 \right) \mathbf{x}(t) + \right. \\ & + \left( -\mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1 \frac{1}{\mu} - \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_3 \right) \eta(t) + \\ & + \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_3 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_3 \right) \dot{\xi}_i(t) + \\ & + \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_2 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{A}}_{11} \right) \mathbf{e}(t) + \\ & + \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_3 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_4 \right) \xi_i(t) + \\ & \left. + \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_4 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_2 \right) \varphi(t) + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_4 \dot{\varphi}(t) \right\}. \end{aligned} \quad (\text{П.12})$$

Подставим (П.12) в (П.2) и перепишем (П.2) как

$$\begin{aligned} \dot{\eta}(t) = & \left[ -\frac{1}{\mu} + \left( 1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1 \right)^{-1} \left( -\mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1 + \right. \right. \\ & \left. \left. + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1 \frac{1}{\mu} - \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_3 \right) \right] \eta(t) + \dot{\xi}_i(t) + \\ & + \left( 1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_1 \right)^{-1} \left\{ \left[ \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1^2 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_1 \right] \mathbf{x}(t) + \right. \\ & + \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_1 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_3 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_3 \right) \dot{\xi}_i(t) + \\ & + \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_2 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{A}}_{11} \right) \mathbf{e}(t) + \\ & + \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_3 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_4 \right) \xi_i(t) + \\ & \left. + \left( \mathbf{E}_i^T \mathbf{A}_1 \mathbf{B}_4 + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_2 \tilde{\mathbf{B}}_2 \right) \varphi(t) + \mathbf{E}_i^T \mathbf{B}_4 \dot{\varphi}(t) \right\}. \end{aligned} \quad (\text{П.13})$$

Принимая во внимание уравнения (П.8), (П.9) и (П.13), запишем уравнение замкнутой системы в виде

$$\dot{\mathbf{x}}_e(t) = \mathbf{A}_e \mathbf{x}_e(t) + \mathbf{D} \mathbf{d}(t). \quad (\text{П.14})$$

Пусть существуют коэффициенты  $\alpha$  и  $\mu$  такие, что матрица  $\mathbf{A}_e$  — гурвицева. Следовательно, система (П.14) устойчива. Значит, вектор  $\mathbf{x}_e(t) = \left[ \mathbf{x}^T(t), \mathbf{e}^T(t), \eta(t) \right]^T$  предельно ограничен.

Тогда из (П.7) сигнал  $u(t)$  ограничен. Из (4) следует, что  $\mathbf{z}(t)$  ограничен. Из (12) следует, что  $\xi(t)$  ограничен. Сигнал  $\dot{\mathbf{x}}(t)$  ограничен из (16). Тогда из (20) сигнал  $\dot{x}_i(t)$  ограничен. Таким образом, все сигналы в замкнутой системе ограничены.

Найдем производную от (23) вдоль траекторий системы (П.14):

$$\dot{V} < -\mathbf{x}_e^T(t) \mathbf{Q} \mathbf{x}_e(t) + 2\mathbf{x}_e^T(t) \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{d}(t). \quad (\text{П.15})$$

Воспользуемся оценкой

$$2\mathbf{x}_e^T(t) \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{d}(t) \leq \chi \mathbf{x}_e^T(t) \mathbf{P} \mathbf{D} \mathbf{D}^T \mathbf{P} \mathbf{x}_e(t) + \chi^{-1} \bar{d}^2$$

и перепишем (П.15) в виде

$$\dot{V} < -\mathbf{x}_e^T(t) \mathbf{R} \mathbf{x}_e(t) + \chi^{-1} \bar{d}^2. \quad (\text{П.16})$$

Преобразуем (П.16) к виду

$$\dot{V} < -\rho V + \chi^{-1} \bar{d}^2. \quad (\text{П.17})$$

Разрешив неравенство (П.17) относительно  $V$ , получим

$$V(t) < \left( V(0) - \rho^{-1} \chi^{-1} \bar{d}^2 \right) e^{-\rho t} + \rho^{-1} \chi^{-1} \bar{d}^2. \quad (\text{П.18})$$

Принимая во внимание (23), перепишем (П.18) как

$$\begin{aligned} \lambda_{\min}(\mathbf{P}) |\mathbf{x}(t)|^2 & < \left( V(0) - \chi^{-1} \bar{d}^2 \right) e^{-\rho t} + \\ & + \rho^{-1} \chi^{-1} \bar{d}^2. \end{aligned} \quad (\text{П.19})$$

Из неравенства (П.19) следуют оценки для величины  $\delta$  в виде (22) и (25).

Покажем теперь, что существуют  $\alpha$  и  $\mu$ , при которых матрица  $\mathbf{A}_e$  будет гурвицевой. Рассмотрим  $\alpha \rightarrow 1$ . Тогда  $\frac{1-\alpha}{2-\alpha+c_{02}} \rightarrow 0$  и  $\frac{1+c_{02}}{2-\alpha+c_{02}} \rightarrow 1$ .

Таким образом, матрица  $\mathbf{A}_e$ , заданная в (21), не существенно зависит от  $c_{01}$ ,  $c_{02}$  и  $c_{03}$  при  $\alpha \rightarrow 1$ . Значит, существуют коэффициенты  $\alpha$  и  $\mu$  такие, что матрица  $\mathbf{A}_e$  — гурвицева.

## Литература

1. Guo G., Hill D. J., Wang Y. Nonlinear Output Stabilization Control for Multimachine Power Systems // *IEEE Trans. on Circuits and Systems. Part 1*. 2000. Vol. 47. N 1. P. 46–53.
2. Chen Y., Liu F., Mei S., Ma J. Toward Adaptive Robust State Estimation Based on MCC by using the Generalized Gaussian Density as Kernel Functions // *Electrical Power and Energy Systems*. 2015. Vol. 71. P. 297–304.
3. Поляк Б. Т., Топунов М. В. Подавление ограниченных внешних возмущений: управление по выходу // *Автоматика и Телемеханика*. 2008. № 5. С. 72–90.
4. Никифоров В. О. Нелинейная система управления с компенсацией внешних детерминированных возмущений // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 1997. № 4. С. 69–73.
5. Fedele G., Ferrise A. Biased Sinusoidal Disturbance Compensation with Unknown Frequency // *IEEE Transactions on Automatic Control*. 2013. Vol. 58. N 12. P. 3207–3212.
6. Буков В. Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. — Калуга: Изд-во научной лит-ры Н. Ф. Бочкаревой, 2006. — 720 с.
7. Проскурников А. В., Якубович В. А. Универсальные регуляторы в задачах оптимального управления с эталонной моделью при неизвестных внешних сигналах // *Изв. РАН. Теория и системы управления*. 2012. № 2. С. 49.
8. Цыгунов А. М. Робастное управление с компенсацией возмущений. — М.: Физматлит, 2012. — 300 с.
9. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления/под ред. Н. Д. Егупова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 744 с.
10. Baillieul J. Feedback Coding for Information-Based Control: Operating Near the Data Rate Limit // *Proc. 41st IEEE Conf. Decision Control, Las Vegas, Nevada, USA*. 2002. P. 3229–3236.
11. Delchamps D. F. Extracting State Information from a Quantized Output Record // *System Control Letters*. 1989. Vol. 13. P. 365–372.
12. Furtat I. B., Fradkov A. L., Liberzon D. Compensation of Disturbances for MIMO Systems with Quantized Output // *Automatica*. 2015. Vol. 60. P. 239–244.
13. Фуртат И. Б. Алгоритм робастного управления линейными объектами с векторными входами-выходами в условии насыщения сигнала управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. Т. 17. № 9. С. 579–587.

UDC 519.7

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.21

## Algorithm for Compensation of Measurement Noises and Disturbances

Furtat I. B.<sup>a,b</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, cainenash@mail.ru<sup>a</sup>Institute of Problems of Mechanical Engineering of RAS, 61, Bol'shoi Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>ITMO University, 49, Kronvervskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The theory and practice of automatic control pays special attention to the problem of compensating disturbances and measurement noises. Most technical and technological processes are subject to changes in their parameters during the operation. External influences also can have a negative impact on the process. The measurement signals contain errors whose values depend on the external environment and the characteristics of the measuring device (its type, absolute and relative errors, etc.). Currently, there are no papers discussing simultaneous compensation of disturbances and measurement noises. **Purpose:** We try to synthesize a new control algorithm which would simultaneously compensate the parametric and external disturbances, as well as the measurement noises. The parameters of this algorithm should be calculated according to certain conditions which we also have to specify. **Methods:** The method we use is based on the disturbance compensation principle. It allows you to find a law providing that the control signal value is opposite to the disturbance value. Such an approach allows you to control the plants without significantly increasing the control signal amplitude. **Results:** We have synthesized a linear system stabilization algorithm assuming that a signal equal to the sum of the plant state vector and the noise vector is available for measurement. Parametric and external disturbances can be present in any equation of the plant model. Sufficient conditions for calculating the parameters of the regulator have been obtained to ensure the stability of a closed-loop system. The results are analytically proved. The efficiency of the algorithm is demonstrated by a computer simulation. **Practical relevance:** Compared to the existing adaptive and robust control algorithms, the developed algorithm provides higher accuracy of control over technical systems under disturbances and measurement noises.

**Keywords** — Disturbance, Measurement Noise, Dynamic Compensation, Observer of Derivatives.

## References

1. Guo G., Hill D. J., Wang Y. Nonlinear Output Stabilization Control for Multimachine Power Systems. *IEEE Trans. on Circuits and Systems*, part 1, 2000, vol. 47, no. 1, pp. 46–53.
2. Chen Y., Liu F., Mei S., Ma J. Toward Adaptive Robust State Estimation Based on MCC by using the Generalized Gaussian Density as Kernel Functions. *Electrical Power and Energy Systems*, 2015, vol. 71, pp. 297–304.
3. Polyak B. T., Topunov M. V. Suppression of Limited External Disturbances: Output Control. *Avtomatika i Teleme-*
4. Никифоров В. О. Нелинейная система управления с компенсацией внешних детерминированных возмущений. *Izvestia RAN. Teoriia i sistemy upravleniia* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems], 1997, no. 4, pp. 69–73 (In Russian).
5. Fedele G., Ferrise A. Biased Sinusoidal Disturbance Compensation with Unknown Frequency. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2013, vol. 58, no. 12, pp. 3207–3212.

6. Bukov V. N. *Vlozhenie sistem. Analiticheskii podkhod k analizu i sintezu matrichnykh sistem* [Embedding Systems. Analytical Approach to the Analysis and Synthesis of Matrix Systems]. Kaluga, Izdatel'stvo nauchnoi literatury N. F. Bochkarevov Publ., 2006. 720 p. (In Russian).
7. Proskurnikov A. V., Yakubovich V. A. Universal Regulators in Optimal Control Problems with a Reference Model with Unknown External Signals. *Izvestiia RAN. Teoriia i sistemy upravleniia* [Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Theory and Control Systems], 2012, no. 2, pp. 49 (In Russian).
8. Tsykunov A. M. *Robastnoe upravlenie s kompensatsiei voz-mushchenii* [Robust Control with Compensation of Disturbances]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 300 p. (In Russian).
9. *Metody robastnogo, neironechetkogo i adaptivnogo upravleniia* [Methods of Robust, Neuro-Fuzzy and Adaptive Control]. Ed. N. D. Egupova. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2002. 744 p. (In Russian).
10. Baillieul J. Feedback Coding for Information-Based Control: Operating Near the Data Rate Limit. *Proc. 41st IEEE Conf. Decision Control*, 2002, Las Vegas, Nevada, USA, pp. 3229–3236.
11. Delchamps D. F. Extracting State Information from a Quantized Output Record. *System Control Letters*, 1989, vol. 13, pp. 365–372.
12. Furtat I. B., Fradkov A. L., Liberzon D. Compensation of Disturbances for MIMO Systems with Quantized Output. *Automatica*, 2015, vol. 60, pp. 239–244.
13. Furtat I. B. Algorithm of Robust Control of Linear Objects with Vector Inputs-Outputs in the Condition of Control Signal Saturation. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2016, vol. 17, no. 9, pp. 579–587 (In Russian).

**Научный журнал  
«ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ»  
выходит каждые два месяца.**

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 4800 рублей, для подписчиков стран СНГ — 5400 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05,

эл. почта: [press@crp.spb.ru](mailto:press@crp.spb.ru), [zajavka@crp.spb.ru](mailto:zajavka@crp.spb.ru),

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47,

эл. почта: [export@periodicals.ru](mailto:export@periodicals.ru), сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: [podpiska@delpress.ru](mailto:podpiska@delpress.ru),

сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: [kazan@komcur.ru](mailto:kazan@komcur.ru),

сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html> и др.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья)

вы можете подписаться на сайтах НЭБ: <http://elibrary.ru>;

РУКОНТ: <http://www.rucont.ru>; ИВИС: <http://www.ivis.ru/>

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2016 гг.

в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>),

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

и Киберленинки (<http://cyberleninka.ru/>

[journal/n/informatsionno-upravlyayuschiesistemy](http://journal/n/informatsionno-upravlyayuschiesistemy)).

# АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР КОМПЬЮТЕРНЫХ ПАРАЛИНГВИСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ЛЖИ В РЕЧИ ЧЕЛОВЕКА

А. Н. Величко<sup>а, б</sup>, магистрант

В. Ю. Будков<sup>а</sup>, канд. техн. наук

А. А. Карпов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** компьютерная паралингвистика анализирует невербальные аспекты человеческой коммуникации и речи, такие как естественные эмоции, интонации, особенности произношения, параметры голоса диктора, истинность речевых сообщений и т. д. Задача автоматического выявления истинности/ложности сообщений является актуальной в различных приложениях, многие современные исследования посвящены разработке математического и программного обеспечения для автоматизированных систем распознавания лжи в речи человека. **Цель:** анализ и представление достижений и разработок в области компьютерной паралингвистики, в частности, в автоматическом распознавании лжи в речи человека для определения недостатков существующих методов и путей их преодоления при создании новой автоматической системы. **Результаты:** анализ широкого спектра современной научно-технической литературы, описывающей результаты мировых научных исследований по данной тематике за последние десять лет, включая международные соревнования Computational Paralinguistic Challenge, показал, что применяются во многом схожие методы распознавания, однако алгоритмы обработки сигналов имеют различия, которые влияют на точность распознавания ложности/истинности речевых высказываний. Представлена обобщенная схема системы распознавания, ее основные составляющие, а также классификация наиболее эффективных методов, использующихся при разработке автоматических систем паралингвистического анализа естественной речи. На данный момент в распознавании лжи в речи человека существует масса нерешенных проблем технического и естественного характера, включая учет индивидуальных особенностей диктора (его пол, возраст, эмоциональную стабильность, национальные особенности и т. д.), преодоление которых позволит значительно улучшить функциональность системы.

**Ключевые слова** — компьютерная паралингвистика, речевые технологии, распознавание лжи в речи человека, машинное обучение.

## Введение

Паралингвистика — область науки, которая изучает невербальные аспекты человеческой коммуникации и речи: естественные эмоции, интонации, акценты, психофизиологические состояния, особенности произношения, параметры голоса диктора, ложность или истинность речевых сообщений и т. д. В основном современная паралингвистика рассматривает то, как произносится речь, нежели то, что произносится [1].

Хорошо известен факт, что наше физиологическое состояние очень тесно связано с эмоциональными переживаниями. Идея детекции лжи по речевому сигналу основывается на гипотезе о том, что ложь вызывает у человека состояние стресса, что и отражается на изменении параметров речи. Эффект Липпольда [2] заключается в том, что все мышцы человека, в том числе и голосовые связки, подвержены микроколебаниям с частотой 8–12 Гц, при этом в спокойном состоянии частота этих колебаний не превышает 10 Гц, а в стрессовом возрастает до 12 Гц.

С развитием технологий, позволяющих распознавать речь человека, многие организации

проявляют интерес к данной области, поскольку в современном мире достаточно остро стоит проблема распознавания лжи в речи человека. Ложь — это преднамеренный акт введения собеседника в заблуждение посредством передачи неверной или вводящей в заблуждение информации [3]. Ложная информация бывает преднамеренной (дезинформация) и непреднамеренной (заблуждение). Помимо отличий между самоориентированной ложью и ложью, ориентированной на других, часто приводится различие между явной ложью (полная ложь, диаметрально противоположная истине), преувеличением (сообщаемая информация или факты превосходят истинные данные) и тонкой ложью (сообщение практически истинно, но составлено для заблуждения; уклонение от ответа или умышленное опущение деталей).

Тема распознавания ложных речевых сообщений становится особенно актуальной, поскольку на данный момент большинство исследований на тему лжи опираются на визуальное ее проявление, т. е. на мимику, жесты, биометрических параметрах, что можно распознать при исследованиях с использованием полиграфа [4, 5].

Несмотря на популярность использования полиграфа, этот метод не является оптимальным, поскольку предъявляются особые условия для работы с аппаратом — и к месту исследований (комфортный температурный режим, оптимальная влажность, шумоизоляция и пр.), и к испытуемому (в первую очередь, наличие добровольного согласия на проведение испытаний, отсутствие соматических заболеваний, психических расстройств и пр.). Именно поэтому возникла заинтересованность в методах, не подразумевающих физического контакта с испытуемым, а именно в бесконтактных методах, исследующих речевую активность и невербальные сигналы. Однако стоит отметить, что данная задача является комплексной ввиду многих факторов, влияющих на анализ звукового сигнала: неоднозначность языка, индивидуальные особенности диктора (дефекты слуха, речи и пр.), наличие шумов при записи.

### Методы автоматического анализа паралингвистических явлений в речи

В современных системах паралингвистического анализа речи используются пространства признаков огромного размера (низкоуровневые описатели, Low Level Descriptors — LLD) для интегрального описания фраз, а не отдельных слогов и фонем (супрасегментные признаки). Эти же LLD-признаки используются для описания речевых сигналов в компьютерной паралингвистике [1, 3, 6]. Обычно наборы признаков включают в себя частоту основного тона (ЧОТ), форманты (резонансные частоты голосового тракта), мел-частотные кепстральные коэффициенты (Mel-Frequency Cepstral Coefficients — MFCC), модулированный спектр сигнала, коэффициенты перцептивного линейного предсказания (Relative Spectral Transform — Perceptual Linear Prediction — RASTA-PLP), энергетические признаки сигнала и их вариативности (так называемые джиттер и шиммер) и т. д. MFCC- и RASTA-PLP-признаки известны в автоматическом распознавании речи довольно давно и были внесены в распознавание паралингвистических явлений речи из этой задачи, недавно к ним добавились также частотные признаки речи (Line Spectral Frequency — LSF) [1]. Однако многие исследователи экспериментируют с наборами признаков, включая в них и другие признаки. Такие наборы признаков представлены, например, в работах [7, 8].

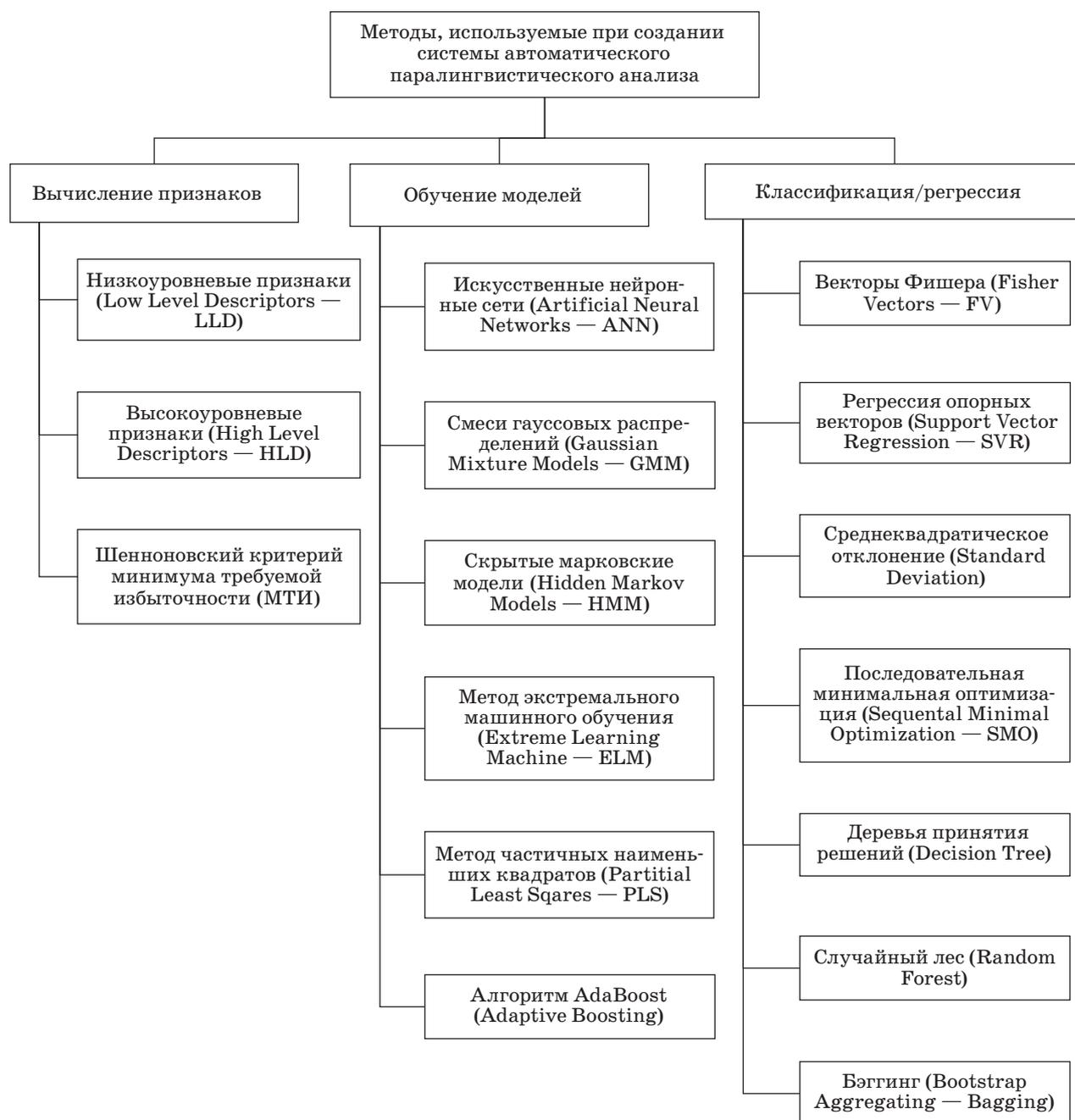
Наиболее распространенными методами моделирования и классификации паралингвистических явлений на сегодняшний день являются: искусственные нейронные сети, векторы Фишера (Fisher Vectors — FV), смеси гауссовых распре-

делений (Gaussian Mixture Models — GMM), регрессия опорных векторов, скрытые марковские модели (Hidden Markov Models — HMM), модель экстремального машинного обучения (Extreme Learning Machines — ELM), метод частичных наименьших квадратов, последовательная минимальная оптимизация (Sequential Minimal Optimization — SMO), случайный лес (Random Forest), бэггинг (Bagging, Bootstrap Aggregating), деревья принятия решений, среднеквадратичное отклонение, шенноновский критерий минимума требуемой избыточности (МТИ) [9, 10]. На рис. 1 приведен вариант классификации указанных методов.

При разработке математического и программного обеспечения паралингвистических систем многие исследователи рассматривают вопрос об использовании свободно доступного программного обеспечения для проведения экспериментов. При необходимости определить эмоциональное состояние личности может быть полезным такой программный продукт, как LIWC (Linguistic Inquiry and Word Count, <https://liwc.wpengine.com>), который является условно бесплатным программным обеспечением для анализа текстов, вычисления частотности использования слов человеком, определения эмоциональной нагрузки текста. Для вычисления признаков можно применять инструмент openSMILE (<http://audeering.com/technology/opensmile/>), использующийся во многих работах для извлечения признаков из аудиозаписей.

Набор акустических низкоуровневых признаков (LLD) в openSMILE состоит из 6373 супрасегментных признаков, включая 65 базовых низкоуровневых признаков, а также их варианты (рис. 2). Низкоуровневые признаки включают в себя множество характеристик: спектральные, кепстральные, энергезависимые и вокализованные. Эти акустические признаки считаются наиболее полными для паралингвистических исследований.

В качестве программных средств, реализующих алгоритмы извлечения и анализа данных, можно применять программный инструмент WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis, [www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/](http://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/)), представляющий собой набор средств визуализации и алгоритмов для анализа данных и решения задач прогнозирования. Для фонетического анализа речи можно использовать инструмент Praat ([www.fon.hum.uva.nl/praat/](http://www.fon.hum.uva.nl/praat/)). В качестве программных продуктов для анализа данных можно применять такие продукты, как KNIME и RapidMiner. KNIME (Konstanz Information Miner, [www.knime.org](http://www.knime.org)) представляет собой систему построения алгоритмов для анализа, преобразования и визуализации данных. Может интегрироваться с другими проектами, например с WEKA.

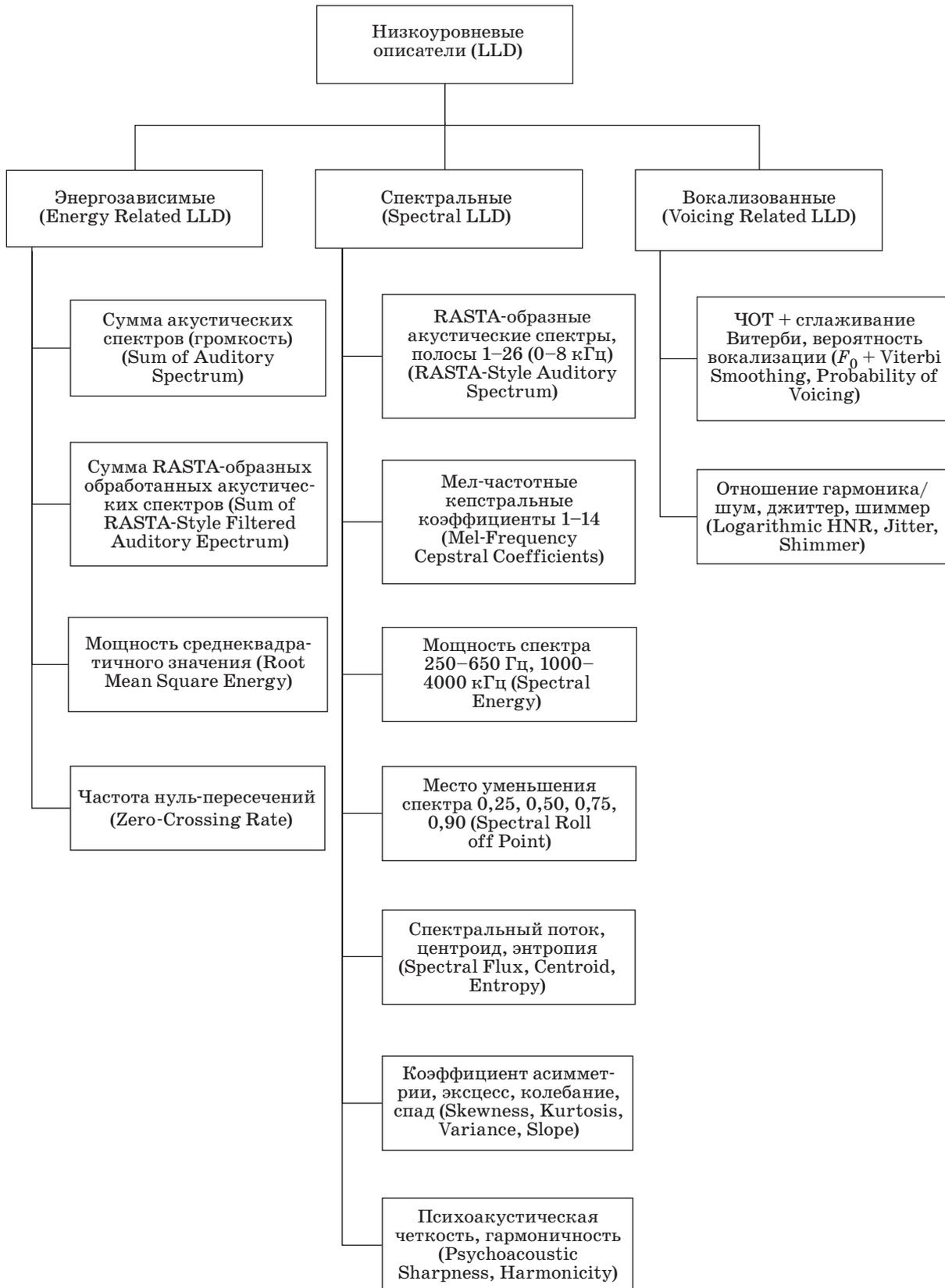


■ **Рис. 1.** Классификация основных методов паралингвистического анализа речи  
 ■ **Fig. 1.** Classification of major methods for paralinguistic speech analysis

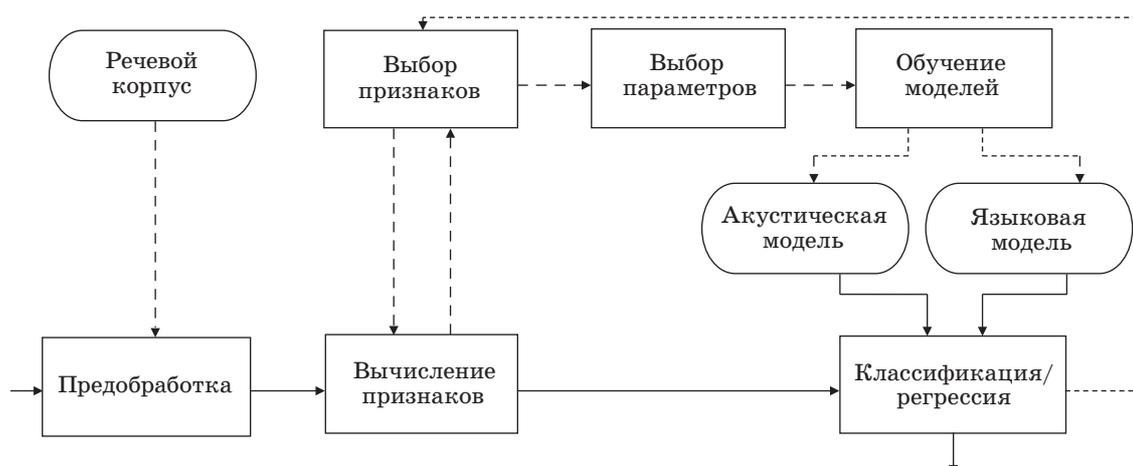
RapidMiner (<https://rapidminer.com>) — открытый программный продукт для проведения экспериментов в таких сферах, как машинное обучение и интеллектуальный анализ данных. Он может быть использован для интеллектуального анализа данных, текста, мультимедиа, потоков данных. Программный продукт интегрирует в себя операторы WEKA, имеет встроенный язык сценариев для выполнения массивных серий экспериментов.

Вышеописанные методы являются компонентами классической системы паралингвистического анализа речи, общая схема и основные этапы работы которой представлены на рис. 3 [1].

Для того чтобы построить модель паралингвистического анализа речи, необходимо собрать или подготовить речевую базу данных, на которой будет проводиться обучение моделей, тестирование (отладка) системы и классификация паралингвистических явлений. При сборе материала



■ **Рис. 2.** Низкоуровневые признаки в инструментарии openSMILE  
 ■ **Fig. 2.** Low level descriptors in openSMILE toolkit



■ **Рис. 3.** Обобщенная схема системы паралингвистического анализа речи  
 ■ **Fig. 3.** General scheme of a paralinguistic speech analysis system

ла для обработки речи, в том числе и содержащей ложь, существуют проблемы, связанные с анализом персональных данных диктора (пол, возраст, образование, эмоциональная стабильность/нестабильность, культурные и национальные отличия). Базы данных собираются, в основном, в изолированных условиях (в лаборатории), а не в естественных, что значительно влияет на качество речи (преувеличение, неточное отображение эмоций). При этом желательно, чтобы количество материала было достаточным для успешного проведения всех трех стадий работы системы (обучение, тестирование, классификация).

### Речевые базы данных с ложными речевыми сообщениями

Известны несколько общедоступных корпусов речи, содержащих как ложные, так и правдивые речевые сообщения дикторов. К примеру, в работе [3] использовался речевой корпус DSD (Descriptive Speech Database), разработанный в Университете Аризоны (США). Он состоит из аудиозаписей, включающих в себя 162 минуты речи 72 дикторов. В записи участвовали студенты университета, которые были поделены на две группы. Участники первой группы играли роль лжецов, которые «украли» ответы на экзамен из компьютера на кафедре. Вторая группа играла роль честных учеников, которые вернули листовку в тот же кабинет. Следующая фаза заключалась в том, что были проведены интервью с каждым участником. Участники, которые украли ключ, должны были лгать, что они этого не делали, в течение всего интервью, другая группа должна была говорить правду о своих действиях. Интервью состояло из подготовленного набора открытых вопросов, подразумевающих короткие

ответы (десять «фоновых» вопросов для основы, специальные вопросы о краже).

В работе [11] представлен корпус эмоциональной речи GEMEP (Geneva Multimodal Emotion Portrayals), который включает коллекцию аудио- и видеозаписей, содержащих информацию от 10 франкоговорящих актеров (5 женщин, 5 мужчин), которые изображают 18 эмоциональных состояний (восторг, изумление, злость, чуткость/отзывчивость, отвращение, отчаяние, гордость, стыд, беспокойство, интерес, радость, презрение, панический страх, удовольствие, облегчение, удивление, грусть), применяя различные вербальные средства и различные степени выражения (сильную или слабую).

В работе [12] использовался меньший по размерам речевой корпус — CSC (Columbia-SRI-Colorado), разработанный в Университете Колумбии (США) и состоящий из 32 часов аудиозаписей интервью 32 носителей стандартного американского языка (16 мужчин, 16 женщин). Организаторами было проведено интервью с каждым участником, также участникам было предложено выполнить серию заданий. Им было сказано, что их результаты сравнят с характеристикой одного из ведущих бизнесменов Америки. После им выдали подтасованные результаты и попросили сыграть снова, чтобы достичь наиболее близких результатов с заданной характеристикой. В четырех из шести заданий участники обманули интервьюеров.

В работе [13] авторы использовали корпус, собранный в Университете Ноттинггема (Великобритания) при участии 19 мужчин (студентов и преподавателей). У всех участников родной язык — английский, дикторы не имели каких-либо отклонений (слуховых, речевых и пр.). Пример опроса с оценкой был разработан для этого эксперимента. Участникам были выданы жетоны с тек-

стовой информацией о том, что они должны скрывать от интервьюера во время оценочного опроса. Интервью 1 с базовыми данными состояло из нейтральных и расслабляющих вопросов, составленных для того, чтобы иметь материал с истинными сообщениями. Следующие два интервью были составлены таким образом, чтобы задать как можно больше наводящих вопросов. Интервью 2 вызвало существенные затруднения при постановке обычных вопросов о социальной привлекательности и сокрытии информации. Интервью 3 было более провокационным из-за прямого опроса участников об их честности.

Авторы работы [14] считают, что поведение лжеца напрямую зависит от индивидуальных качеств, культурного уровня человека, содержания разговора и цены наказания в случае разоблачения. Именно поэтому данные, содержащие ложные сообщения, должны быть собраны в реальных условиях. Авторы придумали интересную игру (сценарий), в ходе которой был создан речевой корпус на мандаринском китайском языке. Есть две группы (А и Б). Каждый член группы А должен рассказать историю (реальную или блеф), а члены группы Б могут задать любые вопросы по этой истории. Истории членов группы А были разными, соответственно, задавались разные вопросы и получены разные ответы на них. Учитывая тот факт, что члены группы Б не знали, действительно ли автор пережил то, что рассказал в истории, они должны были решить, правда это или ложь, по ответам рассказчика. Если члены группы Б угадывали ответ, они выигрывали игру и получали награду, в противном случае выигрывала группа А. Если история — ложь, рассказчик должен сделать все возможное, чтобы скрыть это от остальных, чтобы выиграть игру. Члены группы Б могли задавать сколько угодно вопросов в надежде, что рассказчик начнет нервничать и путаться в событиях. Авторы отобрали каждую историю-блеф и фальшивые ответы как данные с ложными сообщениями. Затем была записана нейтральная речь людей, которым принадлежали эти истории, в нормальных условиях. Тематика разговоров могла включать представление себя, рассказ о хобби, жизни и прочее. Записи должны были быть длинными настолько, чтобы включить в них как можно больше слогов китайского мандаринского диалекта. В итоге авторы получили 50 записей участников, включающих речь 25 мужчин и 25 женщин 25–35 лет.

### Экспериментальные системы распознавания лжи в речи человека

В рамках международной конференции INTERSPEECH с 2009 г. проходят соревнования (де-факто чемпионат мира) по различным

направлениям компьютерной паралингвистики Computational Paralinguistics Challenge (ComParE). В 2016 г. впервые на соревнованиях появились следующие темы: распознавание лжи в речи, распознавание степени искренности человека, а также идентификация родного языка диктора по его англоязычной речи [15]. Исследователи, участвующие в данном соревновании, могли использовать собственные алгоритмы машинного обучения и наборы признаков в дополнение к представленному организаторами соревнований стандартному набору признаков (6373 признака, вычисленных посредством openSMILE). Также участникам предоставлялись обучающие/отладочные аудиозаписи. Для конкурса распознавания лжи и степени искренности в речи в качестве базового критерия оценки результатов применялся количественный показатель UAR (Unweighted Average Recall — среднее значение полноты). Среднее значение полноты — это мера измерения, которая лучше других подходит для данных с несбалансированными классами, поскольку она основывается на средней чувствительности и специфичности (mean of sensitivity and specificity). Преимущество ее в том, что она взвешивает каждый класс независимо от количества субъектов, которые он содержит. Пусть  $A$  — матрица ошибок (contingency matrix), где  $A_{ij}$  — это число субъектов класса  $I$ , который классифицируется как  $j$ , и пусть  $K$  будет количеством классов, тогда

$$UAR = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^K \frac{A_{ii}}{\sum_{j=1}^K A_{ij}}$$

В качестве речевого корпуса для соревнования была предложена база данных ложной речи DSD. Организаторы провели собственные испытания, где использовали свободное программное обеспечение openSMILE и WEKA, с помощью которых были выделены признаки, вошедшие в базовый набор параметров, а также предоставлена базовая реализация алгоритмов обработки аудиосигналов. Организаторы предоставили результаты испытаний базовой системы, которая показала значения UAR на отладочном и тестовом наборах данных 61,9 и 68,3 % соответственно, что далее использовалось в качестве минимальной планки [15].

Для участия в соревнованиях было зарегистрировано более 20 команд из разных стран мира, которые представили свои компьютерные паралингвистические системы для выявления лжи в речи, а также описывающие их статьи. Авторы работы [3] использовали базу данных DSD для того, чтобы с помощью программного обеспечения для распознавания речи CMU Sphinx (Carnegie

Mellon University) определить лингвистические составляющие: просодические признаки и типы ответов. Из транскрипций речи были вычислены два типа просодических признаков: обычные меры оценки речи и аудиопризнаки, основанные на парадигме переменной разрешающей способности. В ходе экспериментов с применением вычисленных признаков был получен результат 74,9 %.

В другой работе соревнования [6] был предложен новый набор признаков, состоящий из акустико-просодических, лексических, синтаксических и фонотактических признаков. Также было проведено оценивание каждого признака на полезность его для данного задания. В работе были использованы корпуса CSC и DSD. На этапе разработки при использовании предложенного набора признаков и базового набора соревнований получены результаты 67,7 и 62,2 % соответственно.

Некоторые исследователи предполагают [9–11], что ложь в речи может быть определена с помощью эмоциональных признаков. Эмоциональная насыщенность речи проявляется в темпе, тембре и громкости речи. О безразличии к излагаемой информации свидетельствует вялая и неэмоциональная речь. Если темп речи высокий, то можно предположить, что человек взволнован, тема разговора его глубоко волнует, он как бы пытается сказать больше, чтобы убедить в своей правоте. Тембр голоса — это характер звука голоса, его окраска, через которые также выражается отношение к теме разговора. Таким образом можно подробнее узнать личность говорящего: лексические признаки говорят об образовании, социальном статусе и возрасте; грамматические признаки свидетельствуют о том, насколько грамотен и образован человек; синтаксические признаки могут подчеркивать как недостаточные навыки построения фраз, так и чрезмерное возбуждение; стилистические признаки отражают навыки использования речи при общении.

Авторы работы [11] предположили, что ложь можно распознать, используя такие признаки эмоциональности, как интенсивность/сила эмоции (arousal), валентность/тон эмоции (valence), эмоциональная регуляция. При этом обучение проходило на речевом корпусе GEMEP при помощи классификатора k-ближайших соседей (k-Nearest-Neighbour — kNN). Для основной системы авторы совместили методы kNN, SVM (Support Vector Machine — метод опорных векторов), SMO. Для получения окончательных результатов система была опробована на корпусе соревнований DSD. Были проведены исследования с использованием разработанного набора признаков, в результате которых комбинация наборов эмоциональных признаков и базовых LLD-признаков (ComParE-2013) показала значение UAR 68,9 %.

В работе [7] исследовался потенциал информативных признаков, основанных на автоматическом распознавании фонов в речи (фон — минимальная звуковая единица речи, рассматриваемая вне связи с функцией смысловоразличения). Транскрипции речи были использованы для обработки звуков (фонем, пауз тишины, заполненных пауз) и соответствующих им длительностей. Авторы предложили высокоуровневый набор признаков, в который входят четыре группы: гласные, фонемы, псевдослоги и паузы. Из них отобрали 29 статических признаков и соответствующие им длительности, скорость речи и соотношения. Также выбрали подходящий, предложенный организаторами соревнования, набор акустических признаков и совместили эти два набора. Для работы был выбран корпус DSD, методы SVM с функцией линейного ядра (linear kernel function), SMO. Отдельно от набора признаков соревнований признаки, основанные на автоматическом распознавании фонов в речи, показали результат 58,6 %. Однако вместе с ним результаты UAR оказались 66,7 % на этапе разработки и 69,3 % — на этапе тестирования.

В работе [16] авторы предложили использовать FV для описания низкоуровневых признаков в высказываниях. Преимущество векторов Фишера в том, что этот метод требует намного меньшего количества составляющих в смеси гауссовых распределений, чем, например, модель «мешка слов» (Bag-of-Words — BoW) и не требует обучения на очень большом корпусе, как в случае универсальной фоновой модели (Universal Background Model — UBM). Кроме того, была использована каскадная нормализация и ELM. Наилучшие результаты UAR составили 75,2 и 66,6 % для отладочного и тестового наборов данных соответственно.

Авторы работы [17] предположили, что существует связь между распознаванием лжи и пониманием степени искренности в речи. Они продемонстрировали подход к решению этой задачи: объединение корпусов из заданий соревнования для определения лжи и искренности. Авторы сделали вывод, что метод, базирующийся на том, что ложь и искренность — «две стороны одной монеты», не показал ожидаемых результатов. Однако они смогли использовать взаимодействие между этими явлениями. Для экспериментов был выбран набор признаков соревнования и использован алгоритм SMO для обучения SVM. С помощью метода маркировки ошибочных данных авторы показали, что самообучающийся классификатор способен выбирать подходящие примеры из другого задания, которые дополняют уже существующие данные.

В рамках конкурса также были представлены работы по улучшению алгоритма для системы рас-

познавания лжи в речи. Авторы работы [18] предложили подход с использованием поверхностной нейронной сети (Shallow Neural Networks) в двух вариантах архитектуры: выборочная регрессия и ранжированная нейронная сеть (sampling-based regression and ranking neural networks) и анкерная регрессия и ранжированная нейронная сеть (anchor-based regression and ranking neural network). Также они описали способ, который одновременно минимизирует регрессию и потери в классификации. Был использован набор признаков, предоставленный организаторами конкурса. В результате экспериментов обе архитектуры нейронных сетей, предложенные исследователями, показали потенциал.

Известен также ряд работ по определению лжи в речи, выполненных до соревнований INTERSPEECH 2016 Computational Paralinguistic Challenge. Так, в работе [12] сделан фокус на психологической стороне лжи, а не на визуальном или биометрическом ее проявлении. Автор считает, что главной проблемой изучения лжи является то, что на речь диктора может влиять множество факторов. Дикторы могут испытывать различные эмоции в зависимости от причины, по которой они лгут. Возраст и культура человека также играют важную роль. Было описано исследование с использованием деревьев принятия решений для предсказания лжи. Были вычислены признаки, включающие слоги, слова, предложения, короткие предложения и «простые» предложения; эталоны слов и сложности предложений; индикаторы спецификации и выразительности; «неформальные» эталоны, основанные на ошибках, которые были автоматически распознаны. Лучшие результаты с деревом принятия решений были получены из 20 перекрестных проверок, запущенных на малом наборе данных, они показали точность 70 %. В ходе исследования был разработан корпус CSC, описанный выше.

В работе [13] авторы изучили свойства речи людей, которые лгали во время опроса. В эксперименте участвовало 19 человек. Собранные данные были проанализированы с использованием диапазона параметров речи, включая скорость речи (Speaking Rate — SR), время начала ответа (Response Onset Time — ROT), частоту и длительность пауз. Полученные результаты показали заметное ускорение темпа речи, уменьшение времени начала ответа, уменьшение длительности хезитаций во время произнесения лжи.

Авторы работы [14] описали применение дробного преобразования Фурье (Fractional Fourier Transform — FrFT) для получения признаков, необходимых для определения ложности сообщения. Если психоэмоциональное состояние человека влияет только на частотные характеристики речевого сигнала, то можно использовать обычное

оконное преобразование Фурье, но его будет недостаточно, если в сигнале изменяется только фаза. Поэтому вместо стандартных MFCC-признаков в данной работе были применены дробные мелкепстральные коэффициенты (Fractional Mel Cepstral Coefficient — FrCC). 25 мужчин и 25 женщин были участниками эксперимента, результаты которого показывают, что при выборе оптимального порядка FrFT для FrCC-признаков точность распознавания ложных речевых сообщений выше, чем при применении MFCC-признаков, при этом FrCC лучше кластеризуются. При использовании модели линейного дискриминантного анализа (Linear Discriminant Analysis — LDA) и FrCC-признаков средняя точность распознавания ложных речевых сообщений для мужчин и женщин составила 59,9 и 56,2 % соответственно. Для MFCC-признаков точность была меньше на 3,2 и 5,9 % соответственно. Использование НММ увеличило точность до 71 и 70,2 %. Результаты показали, что ложная информация действительно может быть выявлена из речевого сигнала с довольно высокой точностью.

Авторы работы [8] определяли ложь, используя как акустические, просодические и лексические признаки речи диктора, так и информацию о поле диктора, его этнической принадлежности и личностных факторах. Был собран корпус из записей диалогов 126 пар испытуемых, в сумме составляющий 93,8 часа речи. В ходе экспериментов были опробованы два метода: случайный лес и бэггинг. Авторы объединили методы случайного леса и метода J48 (имплементация алгоритма дерева решений C4.5 (C4.5 decision tree algorithm)). Было вычислено 14 акустико-просодических признаков для данного эксперимента: минимум, максимум, середина, медиана, среднеквадратичное отклонение значения ЧОТ, средний абсолютный спад, минимум интенсивности, максимум интенсивности, средняя интенсивность, среднеквадратичное отклонение интенсивности, дрожание, шумы, коэффициент гармоник и шума. Авторы использовали два метода нормализации. Первый заключается в нормализации признаков диктора с использованием среднего значения ЧОТ и среднеквадратичного отклонения признаков диктора в течение обеих частей сессии. Авторы назвали это сессией нормализации. Второй метод заключается в применении данных основной части эксперимента, в которой собраны 3–4-минутные фрагменты речи каждого участника (правдивые) до того, как они встретили партнера. Для того чтобы уловить отклонение диктора от произнесенной правды, авторы нормализовали речь дикторов во время произнесения лжи, используя признаки, выделенные из исходных данных. Авторы предположили, что эта нормализация, названная «нормализацией исходных

данных», будет полезной для распознавания лжи. Они использовали метод z-нормализации для обеих нормализаций. После проведения испытаний выяснилось, что метод случайного леса оказался более точным в определении лжи и показал точность распознавания 61,23 % на сыром наборе акустико-просодических признаков, 63,03 % при использовании сессионной нормализации и 32,79 % при использовании нормализации исходных данных, в то время как метод бэггинга при тех же испытаниях показал результаты 58, 65, 61, 19, 31, 01 % соответственно. Затем авторы совместили сессионную нормализацию, показавшую лучшие результаты на первом испытании, результаты теста по личностному пятифакторному опроснику NEO-FFI (Neuroticism-Extraversion-Openness Five-Factor Inventory), а также информацию о поле и родном языке дикторов. В ходе второго эксперимента результаты применения методов для распознавания лжи улучшились: точность распознавания составила 65,86 % при использовании метода случайного леса и 63,9 % при использовании метода бэггинга.

К изучению влияния эмоциональных признаков на ложь также обращались авторы работ [9, 10]. «Фонетический детектор лжи» является официально зарегистрированной программой для ЭВМ [10], которая предназначена для тестирования эмоционального состояния личности по голосу. Ее основной принцип действия — автоматическая оценка качества речи диктора на базовом, фонетическом, уровне по общесистемному шенноновскому критерию МТИ речевого сигнала. Авторы считают, что проблема современных систем, основывающихся на принципе последовательного членения голосового сигнала на короткие отрезки данных и их последующем сопоставлении с эталоном, в том, что они не учитывают человеческий фактор: диктор (в силу особенностей слуха или речи) может быть не в состоянии воспроизвести эталон, к тому же один и тот же диктор не всегда может воспроизвести эталон несколько раз одинаково. Для решения данной задачи было предложено записывать несколько эталонов.

В работе [19] были выявлены индивидуальные различия: некоторые люди повышают высоту голоса (ЧОТ), когда лгут, тогда как другие, наоборот, понижают; некоторые склонны к смеху во время произнесения лжи, другие же смеются, когда говорят правду. Также было определено, что помимо акустико-просодических признаков работу классификации улучшают дополнительные данные: пол, родной язык, персональные данные. Для исследования использовался корпус, часть которого была специально размечена для данной задачи. Корпус состоит из диалогов, длящихся 3–4 мин, где испытуемые отвечали на

простые открытые вопросы. Из него были выделены акустико-просодические и лексические признаки, после чего проводилось обучение классификаторов определению пола, родного языка и личности говорящего. Также был проведен тест NEO-FFI, который определил открытость, доброжелательность, добросовестность, эмоциональность и экстраверсию участников. Для обработки сигнала был использован программный инструмент Praat, а для выделения лексических признаков — LIWC. Исследователи использовали различные методы машинного обучения, и наиболее успешным оказался AdaBoost в сочетании с акустико-просодическими признаками и LIWC-признаками, был достигнут результат 61 % точности распознавания лжи.

В работе [20] представлена специализированная методика для выявления параметров речевого сигнала, отражающих истинность передаваемой информации. Использовались такие признаки, как: наличие вокализации звуков, ЧОТ, интенсивность основного тона, динамика изменения и девиация ЧОТ, динамика изменения интенсивности основного тона, отношение интенсивности гармоник к интенсивности основного тона. Для проведения исследования был разработан сценарий, состоящий из последовательности вопросов (нейтральные, контрольные, значимые). Для каждого ответа производится расчет признаков, после чего признаки значимых и контрольных ответов сравниваются и оцениваются следующим образом: присваивается значение 0 баллов, если различий в реакции нет; 1, если выявлены заметные различия; 2, если различия сильные; 3, когда различия ярко выражены. В случае если реакция на значимый вопрос была сильнее, чем на контрольный, балл принимает отрицательное значение, и наоборот, если реакция на контрольный вопрос сильнее, чем на значимый, то ставится положительная оценка. Результат общего теста авторы получали суммированием всех оценок. Полученные результаты показали, что вполне возможно использование данной системы для определения лжности в речи человека в режиме реального времени, в процессе межличностного общения.

Авторы патента РФ зарегистрировали способ определения искренности/неискренности по результатам трехкратной оценки эмоционально-психологических свойств и состояний человека по одному и тому же фрагменту видеозаписи методом психологического шкалирования [21]. В основе предложенного способа лежит идея о том, что при искреннем высказывании говорящий использует комплекс всех форм и элементов невербального поведения (мимика, жесты, интонация голоса — все работает согласованно). На первом этапе эксперты (не менее 10 человек, об-

ладающих эмоциональным слухом не менее 80 % по тесту В. П. Морозова, а также знающие основы выразительных движений человека) оценивают только по аудиосигналу, на втором — только по видеосигналу, на третьем — по обоим сигналам одновременно. Далее вычисляется коэффициент соответствия средних значений оценок экспертов при использовании вычисления ранговой корреляции по Спирмену. Оценку искренности/неискренности производят путем усреднения оценок всех психологических свойств и состояний говорящего.

### Заключение

Наличие многочисленных работ на тему определения лжи в речевых сообщениях свидетельствует о том, что на сегодняшний день тема является актуальной для различных приложений, например: предотвращение «телефонного терроризма»; биометрические исследования на полиграфе, проводимые правоохранительными органами и специальными службами; анализ поведения абонентов и операторов в диалоговых системах, установленных в контакт-центрах, в банковской сфере в ходе интервью при рассмотрении вопросов выдачи кредитов гражданам и т. д.

В статье представлен аналитический обзор компьютерных паралингвистических систем для

автоматического распознавания лжи в речи человека, а также обобщенная схема автоматического паралингвистического анализа речи и классификация методов обработки аудиосигналов. Приведена информация о международных соревнованиях по компьютерной паралингвистике Computational Paralinguistic Challenge, представлена задача распознавания лжи в речи человека, которая ставилась в рамках последних соревнований, проходивших в США в 2016 г. Приведено описание речевой базы данных, критерии оценки систем, описание и анализ работ, представленных на конкурс.

Нерешенными на данный момент для задачи распознавания лжи в речи человека являются проблемы как технического характера (наличие аудишумов, низкое качество сигнала в телефонном канале), так и естественного (высокая вариативность спонтанной речи, неоднозначность языка). Также важно учитывать индивидуальные особенности диктора, такие как физическое состояние, пол, возраст, эмоциональную стабильность/нестабильность, культурные и национальные отличия и т. д.

Данное исследование проводится при поддержке РФФИ (проекты № 16-37-60085 и 16-37-60100), Совета по грантам Президента РФ (гранты № МК-7925.2016.9 и МД-254.2017.8), а также бюджетной темы № 0073-2014-0005.

### Литература

1. Карпов А. А., Кайа Х., Салах А. А. Актуальные задачи и достижения систем паралингвистического анализа речи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2016. Т. 16. № 4. С. 581–592. doi:10.17586/2226-1494-2016-16-4-581-592
2. Горшков Ю. Г., Дорофеев А. В. Речевые детекторы лжи коммерческого применения // ИНФОРМОСТ. «Радиоэлектроника и Телекоммуникации». 2003. № 6(30). С. 13–15.
3. Montacé C., Caraty M.-J. Prosodic Cues and Answer Type Detection for the Deception Sub-Challenge // Proc. INTERSPEECH-2016, San Francisco, USA, 2016. P. 2016–2020.
4. Будков В. Ю., Савельев А. И., Вольф Д. А. Методика исследования параметров речевого сигнала, отражающая истинность передаваемой информации // Докл. ТУСУР. 2016. Т. 19. № 2. С. 56–60. doi:10.21293/1818-0442-2016-19-2-56-60
5. Басов О. О., Карпов А. А., Сайтов И. А. Методологические основы синтеза полимодальных инфокоммуникационных систем государственного управления. — Орел: Академия ФСО РФ, 2015. — 271 с.
6. Levitan S. I., An G., Ma M., Levitan R., Rosenberg A., Hirschberg J. Combining Acoustic-Prosodic, Lexi-

- cal, and Phonotactic Features for Automatic Deception Detection// Proc. INTERSPEECH-2016, San Francisco, USA, 2016. P. 2006–2010.
7. Herms R. Prediction of Deception and Sincerity from Speech using Automatic Phone Recognition-based Features// Proc. INTERSPEECH-2016, San Francisco, USA, 2016. P. 2036–2040.
8. Levitan S. I., An G., Wang M., Mendels G., Hirschberg J., Levine M., Rosenberg A. Cross-Cultural Production and Detection of Deception from Speech// Proc. ACM Workshop on Multimodal Deception Detection, Seattle, USA, 2015. P. 1–8.
9. Родькина О. Я., Никольская В. А. К проблеме распознавания психоэмоционального состояния человека по речи с использованием автоматизированных систем // Информационные технологии. 2016. № 10(22). С. 728–733.
10. Савченко В. В., Васильев Р. А. Анализ эмоционального состояния диктора по голосу на основе фонетического детектора лжи // Научные ведомости Белгородского государственного университета. 2014. Вып. 32/1. № 21(192). С. 186–195.
11. Amiriparian S., Pohjalainen J., Marchi E., Pugachevskiy S., Schuller B. Is Deception Emotional? An Emotion-Driven Predictive Approach// Proc. INTERSPEECH-2016, San Francisco, USA, 2016. P. 2011–2015.

12. Hirschberg J. Detecting Deceptive Speech: Requirements, Resources and Evaluation// Proc. LREC-2008, Marrakech, Morocco, 2008. <http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2008/keynotes/Hirschberg.pdf> (дата обращения: 30.03.2017).
13. Kirchhubel C., Stedmon A., Howard D. M. Analyzing Deceptive Speech// Proc. EPCE-2013. Springer LNCS. 2013. Vol. 8019. P. 134–141. doi:10.1007/978-3-642-39360-0\_15
14. Pan X., Zhao H., Zhou Y. The Application of Fractional Mel Cepstral Coefficient in Deceptive Speech Detection // PeerJ. 2015. <https://doi.org/10.7717/peerj.1194> (дата обращения: 30.03.2017). doi:10.7717/peerj.1194
15. Schuller B., Steidl S., Batliner A., Hirschberg J., Burgoon J. K., Baird A., Elkins A., Zhang Y., Coutinho E., Evanini K. The INTERSPEECH 2016 Computational Paralinguistics Challenge: Deception, Sincerity & Native Language // Proc. INTERSPEECH-2016, San Francisco, USA, 2016. P. 2001–2005.
16. Kaya H., Karpov A. Fusing Acoustic Feature Representations for Computational Paralinguistics Tasks// Proc. INTERSPEECH-2016, San Francisco, USA, 2016. P. 2046–2050.
17. Zhang Y., Weninger F., Ren Z., Schuller B. Sincerity and Deception in Speech: Two Sides of the Same Coin? A Transfer- and Multi-Task Learning Perspective// Proc. INTERSPEECH-2016, San Francisco, USA, 2016. P. 2041–2045.
18. Lee H.-S., Tsao Y., Lee C.-C., Wang H.-M., Lin W.-C., Chen W.-C., Hsiao S.-W., Jeng S.-K. Minimization of Regression and Ranking Losses with Shallow Neural Networks on Automatic Sincerity Evaluation// Proc. INTERSPEECH-2016, San Francisco, USA, 2016. P. 2031–2035.
19. Levitan S. I., Levitan Y., An G., Levine M., Rosenberg A., Levitan R., Hirschberg J. Identifying Individual Differences in Gender, Ethnicity, and Personality from Dialogue for Deception Detection// Proc. NAACL-HLT-2016, San Diego, USA, 2016. P. 40–44.
20. Раисов М. Э., Мещеряков Р. В. Полиграф на основе речевого ввода // Научная сессия ТУСУР-2009. Томск: В-Спектр, 2009. Ч. 3. С. 344–346.
21. Пат. 2293518 РФ. Способ оценки искренности/неискренности говорящего / Морозов В. П., Морозов П. В. — № 2005124844/14; заявл. 04.08.04; опубл. 20.02.07, Бюл. № 5. — 19 с.

UDC 621.391:004.934.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.30

#### Analytical Survey of Computational Paralinguistic Systems for Automatic Recognition of Deception in Human Speech

Velichko A. N.<sup>a,b</sup>, Master Student, [velichko.a.n@mail.ru](mailto:velichko.a.n@mail.ru)

Budkov V. Y.<sup>a</sup>, PhD, Tech., [budkov@iias.spb.su](mailto:budkov@iias.spb.su)

Karpov A. A.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, [karpov@iias.spb.su](mailto:karpov@iias.spb.su)

<sup>a</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Computational paralinguistics analyzes non-verbal aspects of human communication and speech, such as natural emotions, intonations, pronunciation features, speaker’s voice parameters, truth of a message, etc. The problem of automatic detection of truth/deception in spoken messages has importance in many practical applications. There are a great number of contemporary studies devoted to the development of software for automated systems of human speech deception detection. **Purpose:** We analyze and discuss the achievements and developments in the field of computational paralinguistics, particularly deception detection in human speech, in order to figure out the drawbacks of the available methods and define the ways to overcome them in developing a new automatic system. **Results:** The analysis of a wide spectrum of state-of-the-art scientific and technical literature discussing the results of the world-wide scientific research in this field for the last ten years, including International Computational Paralinguistic Challenge (ComParE) has shown that the researchers apply similar methods for deception/truth detection. However, the signal processing algorithms have some differences which can affect the accuracy of the deception recognition. We present a generalized scheme of a recognition system, its main components, as well as a classification of the most efficient methods used in the development of automatic systems for paralinguistic analysis of natural speech. At present, human speech deception detection has a lot of unresolved problems, both of technical and natural types, including taking into account individual features of a speaker (gender, age, emotional stability, national specificity, etc.). Overcoming these problems can significantly improve the system functionality.

**Keywords** — Computational Paralinguistics, Speech Technologies, Human Speech Deception Detection, Machine Learning.

#### References

1. Karpov A. A., Kaya H., Salah A. A. State-of-the-Art Tasks and Achievements of Paralinguistic Speech Analysis Systems. *Nauchno-tekhnicheskii vestnik informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki* [Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics], 2016, vol. 16, no. 4, pp. 581–592 (In Russian). doi:10.17586/2226-1494-2016-16-4-581-592
2. Gorshkov Y. G., Dorofeev A. V. Commercial Speech Deception Detectors. *INFORMOST. "Radioelektronika i Telekomunikatsii"*, 2003, no. 6(30), pp. 13–15 (In Russian).
3. Montacé C., Caraty M.-J. Prosodic Cues and Answer Type Detection for the Deception Sub-Challenge. *Proc. INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2016–2020.

4. Budkov V. Y., Savielev A. I., Volf D. A. Technique of Studying Speech Signal Parameters Reflecting on the Truth of the Transmitted Information. *Doklady TUSUR* [Proc. of TSUCSR], 2016, vol. 19, no. 2. pp. 56–60 (In Russian). doi:10.21293/1818-0442-2016-19-2-56-60
5. Basov O. O., Karpov A. A., Saitov I. A. *Metodologicheskie osnovy sinteza polimodal'nykh infokommunikatsionnykh sistem gosudarstvennogo upravleniya* [Methodological Basis for Synthesis of Polymodal Infocommunication Systems for State Administration]. Orel, Akademiia FSO RF Publ., 2015. 271 p. (In Russian).
6. Levitan S. I., An G., Ma M., Levitan R., Rosenberg A., Hirschberg J. Combining Acoustic-Prosodic, Lexical, and Phonotactic Features for Automatic Deception Detection. *Proc. INTERSPEECH-16*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2006–2010.
7. Herms R. Prediction of Deception and Sincerity from Speech using Automatic Phone Recognition-based Features. *Proc. INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2036–2040.
8. Levitan S. I., An G., Wang M., Mendels G., Hirschberg J., Levine M., Rosenberg A. Cross-Cultural Production and Detection of Deception from Speech. *Proc. ACM Workshop on Multimodal Deception Detection*, Seattle, USA, 2015, pp. 1–8.
9. Rodkina O. Ya., Nikolskaya V. A. To the Problem of Person's High Emotional State Recognition by his Speech. *Informatsionnye tekhnologii* [Information Technologies], 2016, no. 10(22), pp. 728–733 (In Russian).
10. Savchenko V. V., Vasilyev R. A. The Analysis of the Emotional Condition of the Announcer on the Voice on the Basis of the Phonetic Lie Detector. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta* [Belgorod State University Scientific Bulletin], 2014, iss. 32/1, no. 21(192), pp. 186–195 (In Russian).
11. Amiriparian S., Pohjalainen J., Marchi E., Pugachevskiy S., Schuller B. Is Deception Emotional? An Emotion-Driven Predictive Approach. *Proc. INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2011–2015.
12. Hirschberg J. Detecting Deceptive Speech: Requirements, Resources and Evaluation. *Proc. LREC-2008*, Marrakech, Morocco, 2008. Available at: <http://www.lrec-conf.org/proceedings/lrec2008/keynotes/Hirschberg.pdf> (accessed 30 March 2017).
13. Kirchhubel C., Stedmon A., Howard D. M. Analyzing Deceptive Speech. *Proc. EPCE-2013*, Springer LNCS, 2013, vol. 8019, pp. 134–141. doi:10.1007/978-3-642-39360-0\_15
14. Pan X., Zhao H., Zhou Y. The Application of Fractional Mel Cepstral Coefficient in Deceptive Speech Detection. *PeerJ*, 2015. Available at: <https://doi.org/10.7717/peerj.1194> (accessed 30 March 2017). doi:10.7717/peerj.1194
15. Schuller B., Steidl S., Batliner A., Hirschberg J., Burgooon J. K., Baird A., Elkins A., Zhang Y., Coutinho E., Evanini K. The INTERSPEECH 2016 Computational Paralinguistics Challenge: Deception, Sincerity & Native Language. *Proc. INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2001–2005.
16. Kaya H., Karpov A. Fusing Acoustic Feature Representations for Computational Paralinguistics Tasks. *Proc. INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2046–2050.
17. Zhang Y., Weninger F., Ren Z., Schuller B. Sincerity and Deception in Speech: Two Sides of the Same Coin? A Transfer- and Multi-Task Learning Perspective. *Proc. INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2041–2045.
18. Lee H.-S., Tsao Y., Lee C.-C., Wang H.-M., Lin W.-C., Chen W.-C., Hsiao S.-W., Jeng S.-K. Minimization of Regression and Ranking Losses with Shallow Neural Networks on Automatic Sincerity Evaluation. *Proc. INTERSPEECH-2016*, San Francisco, USA, 2016, pp. 2031–2035.
19. Levitan S. I., Levitan Y., An G., Levine M., Rosenberg A., Levitan R., Hirschberg J. Identifying Individual Differences in Gender, Ethnicity, and Personality from Dialogue for Deception Detection. *Proc. NAACL-HLT-2016*, San Diego, USA, 2016, pp. 40–44.
20. Raisov M. E., Meshcheryakov R. V. Polygraph Based on Speech Input. *Nauchnaia sessiia TUSUR-2009*, Tomsk, vol. 3, pp. 344–346 (In Russian).
21. Morozov V. P., Morozov P. V. *Sposob otsenki iskrennosti/neiskrennosti govoriashchego* [A Method for Estimating Sincerity-Insincerity of a Speaker]. Patent RU, no. 2293518, 2007.

## УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные авторитетно. С одной стороны, это ускоряет процесс обработки данных, с другой — различия в транслитерации ФИО, неточные данные о месте работы, области научного знания и т. д. приводят к тому, что в базах оказывается несколько авторских страниц для одного и того же человека. В результате для всех по отдельности считаются индексы цитирования, снижая рейтинг ученого.

Для идентификации авторов в сетях Thomson Reuters проводит регистрацию с присвоением уникального индекса (ID) для каждого из авторов научных публикаций.

Процедура получения ID бесплатна и очень проста: входите на страницу <http://www.researcherid.com>, слева под надписью «New to ResearcherID?» нажимаете на синюю кнопку «Join Now It's Free» и заполняете короткую анкету. По указанному электронному адресу получаете сообщение с предложением по ссылке заполнить полную регистрационную форму на ORCID. Получаете ID.

# ВОССТАНОВЛЕНИЕ ГРАНИЦ КАДРА ПРИ СТАБИЛИЗАЦИИ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ ФОНА И ОЦЕНКИ ЗНАЧИМОСТИ ОБЪЕКТОВ

**В. В. Буряченко<sup>а</sup>**, канд. техн. наук

**М. Н. Фаворская<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**А. Г. Зотин<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

**А. И. Пахирка<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Сибирский государственный университет науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск, РФ

**Постановка проблемы:** цифровая стабилизация видеопоследовательностей часто применяется в системах обработки видеопоследовательностей и видеонаблюдения для улучшения качества итогового материала. При этом одной из основных проблем является потеря граничных областей кадра при его масштабировании до стабилизированного состояния. Исследования альтернативных подходов восстановления границ кадра до сих пор не привели к появлению эффективного алгоритмического решения, обеспечивающего достаточное качество кадра. **Цель:** разработка эффективного алгоритма, позволяющего выполнить восстановление границ изображения при стабилизации видеопоследовательностей на основе модели фона, оценки значимых объектов в кадре и многополосного смешивания краев кадра и восстанавливаемых регионов. **Результаты:** разработан алгоритм восстановления границ кадра при стабилизации видеопоследовательности на основе разделения сцены на фон и значимые объекты, формирования буферного кадра и применения шивки изображения на границах кадра для видеопоследовательностей, содержащих неравномерное движение камеры и объектов, а также многоплановую сцену. **Практическая значимость:** результаты работы протестированы с использованием общедоступной базы данных Sports Videos for Wild, которая содержит большое число видеопоследовательностей, снятых движущейся видеокамерой, а также видеопоследовательностей L1 Robust Optimal Camera Path, известных в работах по стабилизации движения. Применение разработанного алгоритма позволяет уменьшить масштабирование кадра и потери изображения при стабилизации до 3–5 % при наличии сложных видов движения и структуры сцены.

**Ключевые слова** — стабилизация видеопоследовательности, оценка значимости объектов, оценка точечных особенностей, построение модели фона, компенсация движения, восстановление границ изображения.

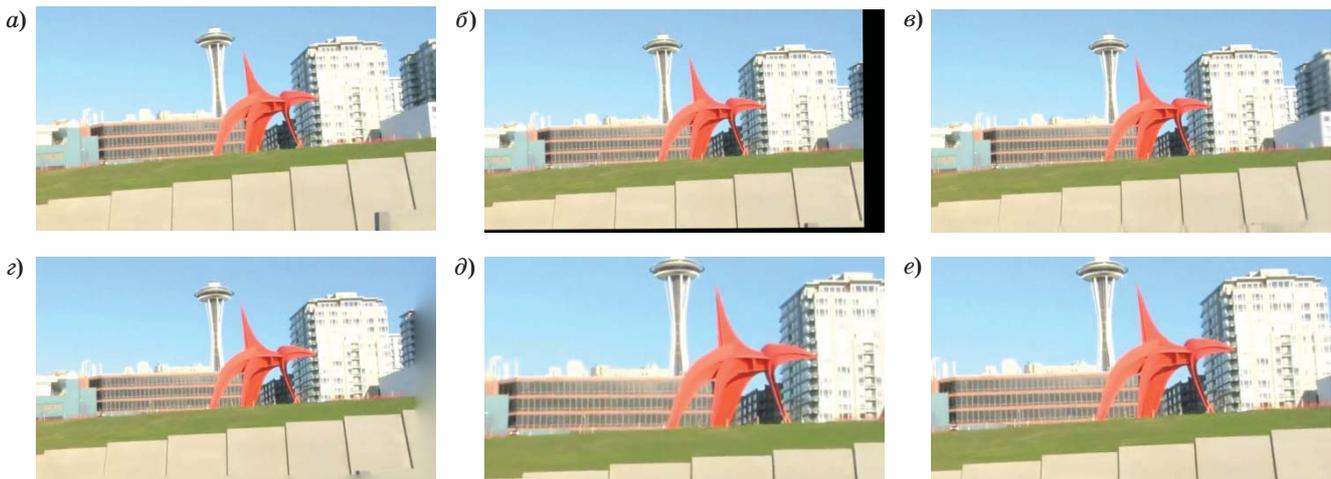
## Введение

Стабилизация видеопоследовательности, являющаяся одним из важнейших способов видеообработки, используется для устранения нежелательных вибраций камеры на видеопоследовательности. Современные алгоритмы стабилизации имеют ряд недостатков, которые часто не позволяют применять их при профессиональной обработке изображений и видеопоследовательностей или в домашних условиях. В результате смещения положения кадра при стабилизации видеопоследовательности возникают участки, которые отсутствуют на оригинальном изображении. Последним этапом большинства известных алгоритмов стабилизации является устранение подобных участков и преобразование кадра к стандартному виду в целях заполнения отсутствующих областей на изображении.

## Основные подходы к восстановлению границ

В литературе предложено три основных подхода к восстановлению изображения при стабилизации. Первый подход основан на заполнении граничных участков известными текстурными

элементами, имеющимися на соседних областях кадра [1–3]. Также применяются алгоритмы восстановления текстур, позволяющие заполнить пустые области при наличии текстуры на соседних областях изображения [4–7]. Второй подход основан на применении размытия границ изображения в области, которая является промежуточной между стабилизированным кадром и восстановленными регионами [8]. Подобный метод применяется в некоторых современных видеоредакторах, выполняющих стабилизацию (Deshaker, Adobe After Effects). В работе [10] предложено сегментировать видеопоследовательность на два слоя, содержащих передний план и фон изображения, после чего восстанавливать каждый слой индивидуально. Такой метод требует наличия длительной видеопоследовательности или, по крайней мере, отдельного движущегося объекта на большом количестве кадров. Matsushita (Мацущита) и другие авторы в работах [8, 9] предложили распространять локальное движение из известных областей на отсутствующие, при этом заполняя области даже в случае, если они являются динамическими. Этот метод не имеет недостатков предыдущих методов, а именно размытия границ кадра и образования разрывов регионов между известными и неизвестными областями, однако дает значитель-



■ **Рис. 1.** Методы восстановления границ для видеопоследовательности Gleicher4.avi [5], кадр 43: *a* — оригинальное изображение; *б* — стабилизированное изображение без восстановления границ; *в* — применение мозаики для заполнения отсутствующих регионов; *г* — заполнение пустых областей и применение размытия границ; *д* — переориентация изображения к объекту интереса; *е* — масштабирование изображения

■ **Fig. 1.** Methods for restoration of borders for video sequence Gleicher4.avi [5], frame 43: *a* — original image; *б* — stabilized image without border restoration; *в* — application of mosaic for filling of absent regions; *г* — filling of empty areas and application of border blur; *д* — image reorientation relative to the object of interest; *е* — image scaling

ные негативные эффекты при наличии быстро движущихся объектов и низкой частоте кадров. Третий подход заключается в использовании нескольких предыдущих кадров для выполнения интерполяции и совмещения известных областей с отсутствующими участками на текущем кадре [10, 11]. На рис. 1, *a–e* показаны основные подходы к заполнению границ изображения при стабилизации видеопоследовательностей.

При этом, несмотря на разнообразие и достаточно хорошие результаты рассмотренных методов, в современных коммерческих алгоритмах стабилизации для восстановления границ изображения применяется альтернативный подход, а именно масштабирование кадра. Данный метод частично устраняет наличие артефактов стабилизации, которые возникают в сложных случаях динамических видеопоследовательностей или при наличии быстро движущихся объектов в сцене за счет потери полезной информации в кадре на 20–30 % и ухудшения качества видеопоследовательности.

### Восстановление границ кадра при стабилизации

Авторами предложен алгоритм восстановления границ изображения, основанный на разделении кадра на несколько областей и использовании информации из соседних кадров видеопоследовательности. Первым этапом алгоритма является оценка заметности (saliency) объектов [12]. В дальнейшем объекты, которые имеют высокий

уровень заметности, исключаются из обработки для восстановления границ, потому что они могут принадлежать объектам переднего плана, которые имеют другой уровень смещения между кадрами или движутся с небольшой скоростью относительно фона изображения. Тем не менее заметные объекты могут быть использованы для стабилизации изображения, потому что они являются хорошим ориентиром для выбора ключевых кадров и компенсации движения.

Построение карты заметности объектов осуществляется на основе вычисления карт интенсивности и цвета. Подход для построения карты заметности основан на гауссовом подходе [13]. Он состоит из четырех основных шагов:

— построение гауссовой пирамиды  $U$ , содержащей несколько слоев нижнего уровня  $U_1, U_2, \dots, U_n$ . Первый слой  $U_1$  имеет разрешение  $w \times h$  пикселей. Разрешение следующего слоя уменьшается на  $(w/2^{n-1}) \times (h/2^{n-1})$  и вычисляется дискретизацией с использованием гауссова фильтра с маской  $5 \times 5$  пикселей;

— построение обратной гауссовой пирамиды  $D_n$ , значения которой вычисляются путем повышающей дискретизации с использованием гауссова фильтра маской  $5 \times 5$  пикселей;

— выполнение поэтапного деления  $U_1$  и  $D_1$ , для того чтобы получить матрицу минимальных отношений  $M$  соответствующих значений  $U_i$  и  $D_i$ :

$$M_{x,y} = \min \left( \frac{D_{k,x,y}}{U_{k,x,y}}, \frac{U_{k,x,y}}{D_{k,x,y}} \right), k \in [0, \dots, n]; \quad (1)$$

— карта заметности  $S_{(in)}$  для пиксела с координатами  $x, y$  вычисляется как обратное значение  $M_{xy}$  по формуле

$$S_{(in)x,y} = (1 - M_{x,y}). \quad (2)$$

Все значения  $S_{(in)}$  нормированы в диапазоне  $[0...1]$ , что позволяет объединять полученные значения с другими подходами вычисления заметности, например, с использованием контраста или других цветовых моделей.

Оценка наличия движущихся объектов на граничных участках кадра осуществляется путем расчета глобального движения кадра, которое также используется для стабилизации изображения [14]. Отдельные блоки изображения на границах кадра принадлежат движущимся объектам, если их направление и модуль вектора движения отличаются от глобального движения кадра. Такие области также исключаются при восстановлении границ.

Для реконструкции данных на границах видеопоследовательности предлагается использовать слияние данных нескольких кадров, что в свою очередь позволит использовать минимальные вычислительные ресурсы. Для восполнения недостающей визуальной информации ис-

пользуется текущий кадр и  $N$  сформированных буферных кадров, полученных ранее с учетом стабилизации. Количество используемых кадров последовательности определяется в зависимости от имеющихся вычислительных ресурсов и длительности сцены.

### Основные этапы алгоритма

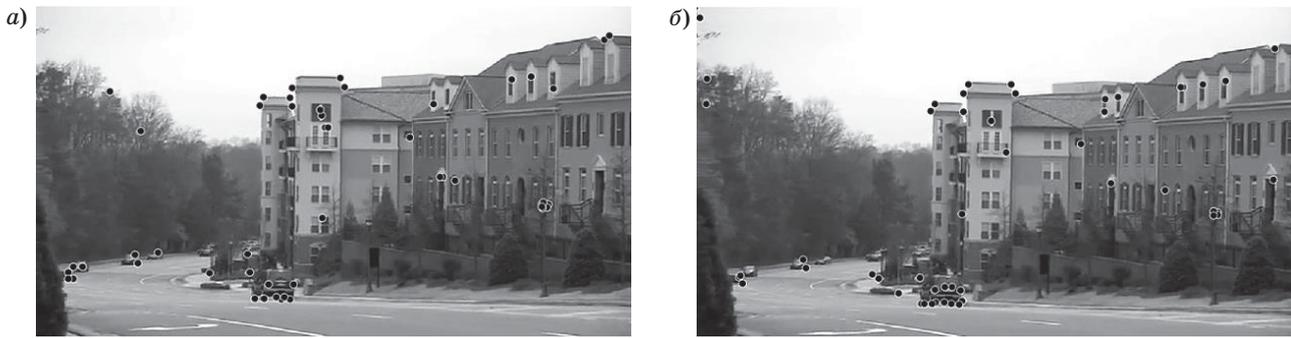
В обобщенной форме предлагаемый алгоритм можно представить в виде следующих основных шагов (рис. 2).

Первым этапом алгоритма является вычисление особых точек и векторов локального и глобального движения для выполнения стабилизации изображения [11]. Оценка точечных соответствий выполняется на основе алгоритма FAST (Function Analysis System Technique) [15] для текущего  $F(t)$  и последующего  $F(t + 1)$  кадров видеопоследовательности (рис. 3).

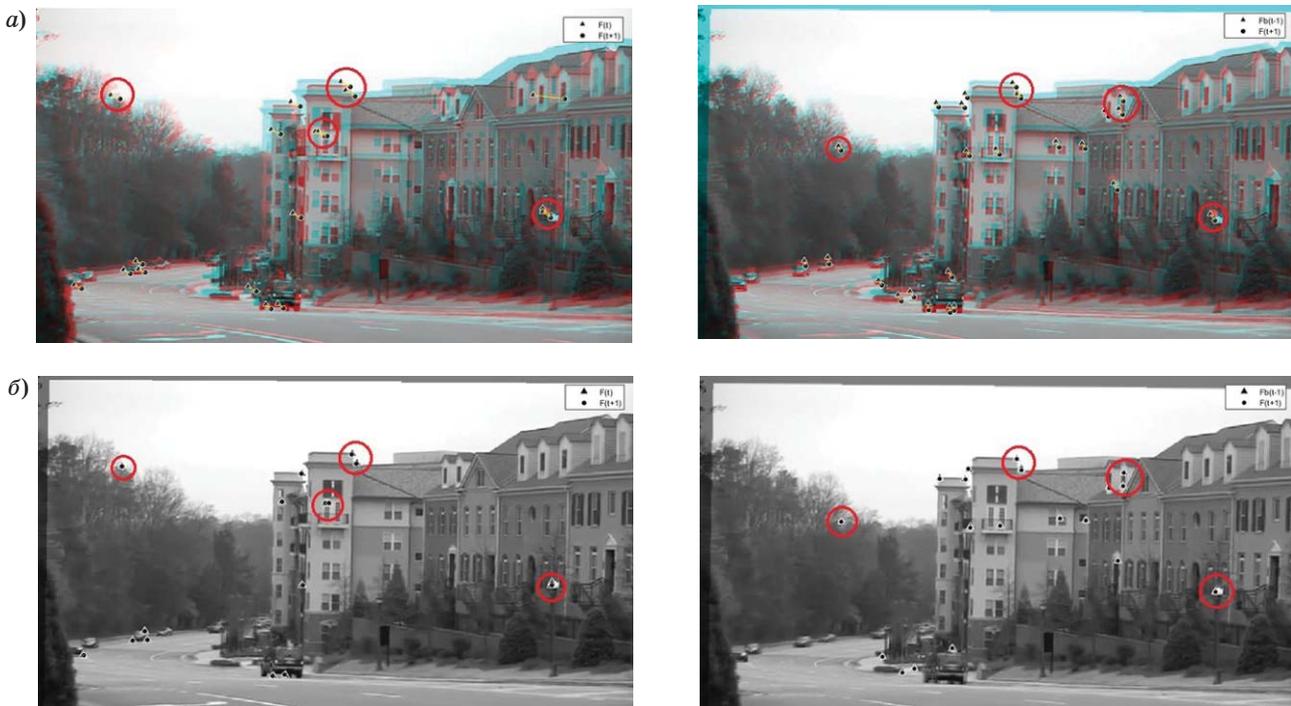
Вторым этапом алгоритма является определение опорных точек в сцене. Для буферного кадра выполняется вычисление заметности  $S_{(in)}$  объектов, что позволяет отделить участки кадра, относящиеся к переднему плану, при восстановлении границ. В качестве опорных выбираются четыре особые точки, которые принадлежат фоновому



■ Рис. 2. Общая схема алгоритма восстановления информации на границах кадра  
 ■ Fig. 2. Flow-chart of algorithm for data restoration in frame borders



■ **Рис. 3.** Пример расчета особых точек для видеопоследовательности 00081 MTS-shaky original.avi [5]: *a* — кадр  $F(t)$ ; *б* — кадр  $F(t + 1)$   
 ■ **Fig. 3.** Example of keypoints' location for video sequence 00081 MTS-shaky original.avi [5]: *a* — frame  $F(t)$ ; *б* — frame  $F(t + 1)$



■ **Рис. 4.** Пример сопоставления кадров на основе опорных точек, кадры 25 и 50 видеопоследовательности 00081 MTS-shaky original.avi [5]: *a* — сопоставление опорных точек: слева изображены точечные соответствия между соседними кадрами  $F(t)$  —  $\blacktriangle$  и  $F(t+1)$  —  $\bullet$ , справа показаны соответствия между буферным кадром  $F_B(t-1)$  и следующим кадром  $F(t+1)$ , цветом выделены несоответствия между положением объектов в кадрах; *б* — определение областей перекрытия для соответствующих кадров: выделена совпадающая область изображения на различных кадрах  
 ■ **Fig. 4.** Example of frames' correspondence based on the keypoints, frames 25 and 50 from video sequence 00081 MTS-shaky original.avi [5]: *a* — the keypoints' correspondence: keypoints' correspondence between the adjacent frames  $F(t)$  —  $\blacktriangle$  and  $F(t+1)$  —  $\bullet$  are depicted in left, the correspondence between buffer frame  $F_B(t-1)$  and following frame  $F(t+1)$  are shown in right, the non-correspondences in objects' position in frames are marked by color; *б* — definition of areas' overlapping in frames: the overlapping area are marked in different frames

изображению кадра (задний план), при этом находятся на некотором расстоянии от границ кадра и значительном удалении друг от друга (не менее 5 и 10 % от размера кадра по осям  $Ox$  и  $Oy$  соответственно). При выборе особых точек одним

из критериев является соответствие векторам движения. На рис. 4, *a* представлены особые точки, из которых формируются наборы из четырех опорных точек, участвующих в дальнейших вычислениях.



■ **Рис. 5.** Пример обработки стабилизированного кадра видеопоследовательности 00081 MTS-shaky original.avi [5]: *a* — кадрирование; *б* — реконструкция границ кадра  
 ■ **Fig. 5.** Example of processing of the stabilized frame from video sequence 00081 MTS-shaky original.avi [5]: *a* — framing; *б* — reconstruction of frame borders

На третьем этапе алгоритма для определения необходимого смещения при стабилизации вычисляются коэффициенты аффинного и перспективного преобразований  $kF_i$ ,  $i \in [0, \dots, 8]$ . Вычисление коэффициентов происходит на основе опорных точек для текущего  $F(t)$  и буферного  $F_B(t - 1)$  кадров, а также для текущего и последующего  $F(t + 1)$  кадров. Трансформация текущего кадра выполняется согласно коэффициентам трансформации  $kF$  с учетом поправки на глобальное движение  $F_{LMV}$  (в случае движения камеры), где  $F_{LMV}$  — значения локальных векторов движения. Пример результатов трансформации представлен на рис. 5, *a* и *б*.

Заполнение недостающих областей выполняется путем формирования буферного кадра  $F_B(t)$  с учетом наложения областей для граничных фрагментов кадров. Для этого определяются области перекрытия с использованием буферных кадров  $F(t - i)$ , где  $i = 1 \dots N$  (рис. 4, *б*). Далее буферный кадр  $F_B(t)$  записывается в выходной поток, при этом зоны с высоким уровнем движения или заметности исключаются из обработки (см. рис. 5, *a*).

Заполнение отсутствующих зон в кадре выполняется путем слияния визуальных зон методом многополосного смешивания для кадров  $F_B(t)$  и  $F(t + 1)$  с учетом аффинных преобразований. В связи с тем, что на границах кадра может содержаться существенная информация, связанная с движением объектов, размер зоны слияния ограничивается 10 – 20 пикселями в зависимости от разрешения видеопоследовательности.

Идея многополосного смешивания заключается в совмещении низких частот в широком пространственном диапазоне и высоких частот в узком диапазоне. Весовая функция в евклидовом пространстве для изображения обозначается как  $W(x, y) = w(x)w(y)$ . Веса смешивания инициализируются нахождением набора точек  $j$  для каждого изображения  $i$  с использованием выражения

$$W_{\max}^i(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{если } W^i(x, y) = \\ & = \arg \max_j W^j(x, y); \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (3)$$

После этого выполняется размытие весовой карты для каждого диапазона в целях формирования различных весовых коэффициентов отдельных диапазонов. Высокочастотная версия изображения формируется по формуле

$$\begin{aligned} B_{\sigma}^i(x, y) &= I^i(x, y) - I_{\sigma}^i(x, y); \\ I_{\sigma}^i(x, y) &= I^i(x, y)g_{\sigma}(x, y), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $B_{\sigma}^i(x, y)$  — пространственная частота в диапазоне длины волны  $\lambda \in [0, \sigma]$ ;  $I^i(x, y)$  — изображение в текущем диапазоне;  $I_{\sigma}^i(x, y)$  — гауссова свертка изображения;  $g_{\sigma}(x, y)$  — гауссов фильтр со стандартным отклонением  $\sigma$ .

Для текущего диапазона изображения должны быть свернуты с соответствующими максимальными весовыми функциями:

$$W_{\sigma}^i(x, y) = W_{\max}^i(x, y)g_{\sigma}(x, y), \quad (5)$$

где  $W_{\sigma}^i(x, y)$  — весовой коэффициент смешивания для длины волны  $\lambda \in [0, \sigma]$ .

Каждый диапазон совмещается с использованием изображений более низких частотных диапазонов и весовых коэффициентов:

$$\begin{aligned} B_{(k+1)\sigma}^i(x, y) &= I_{k\sigma}^i(x, y) - I_{(k+1)\sigma}^i(x, y); \\ I_{(k+1)\sigma}^i(x, y) &= I_{k\sigma}^i(x, y)g_{\sigma'}(x, y); \\ W_{(k+1)\sigma}^i(x, y) &= W_{k\sigma}^i(x, y)g_{\sigma'}(x, y), \end{aligned} \quad (6)$$



■ **Рис. 6.** Пример стабилизированной последовательности с реконструкцией границ кадра: *a* — стабилизированная последовательность кадров; *б* — стабилизированная последовательность с реконструированными границами кадров  
 ■ **Fig. 6.** Example of stabilized video sequence with reconstruction of frame borders: *a* — stabilized sequence of frames; *б* — stabilized sequence of frames with reconstructed frame borders

где  $\sigma'$  — гауссово стандартное отклонение:  $\sigma' = \sqrt{2k+1}\sigma$ .

В результате последующие диапазоны имеют одинаковые длины волн, и окончательно значение интенсивности пиксела для каждого диапазона вычисляется по формуле

$$I_{k\sigma}^{multi}(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N B_{k\sigma}^i(x, y) W_{k\sigma}^i(x, y)}{\sum_{i=1}^N W_{k\sigma}^i(x, y)}, \quad (7)$$

где  $N$  — количество отдельных диапазонов изображений.

Последним этапом алгоритма является слияние данных из буферных кадров с использованием цветовой модели  $YUV$ . Отсутствующие на изображении зоны восстанавливаются на основе данных из буферных кадров  $F_B(t-i)$  и кадра  $F(t+1)$  с поправкой на движение камеры. Заполнение производится путем вычисления значения  $I_{k\sigma}^{multi}(x, y)$  (7), при этом исключается усреднение значений в области пикселей в случае выявления движущегося объекта. При невозможности использовать информацию из соседних кадров заполнение недостающих областей осуществляется путем интерполяции  $F_{int}$  значений соседних пикселей (см. рис. 5, б). Общий набор правил для получения значения пиксела восстанавливаемой области следующий:

$$\begin{aligned} &\text{если } (LMV_{x,y} \leq 0,1 \times LMV_{tr}), \\ &\quad \text{то } F_{(t+1)x,y} = F_{Bx,y}; \\ &\text{если } (LMV_{x,y} > 0,1 \times LMV_{tr}) \\ &\quad \text{и } (x + LMV_x \leq w, y + LMV_y \leq h), \\ &\quad \text{то } F_{(t+1)x,y} = F_{B(x+LMV_x, y+LMV_y)}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &\text{если } (LMV_{x,y} > 0,1 \times LMV_{tr}) \\ &\quad \text{или } (S_{(in)x,y} > S_{tr}), \\ &\quad \text{то } F_{(t+1)x,y} = I_{k\sigma}^{multi}(x, y), \end{aligned} \quad (8)$$

где  $LMV(x, y)$  — вектор движения для блока пикселей кадра  $F$  с координатами  $x, y$ ;  $LMV_{tr}$  — порог определения движения;  $w$  и  $h$  — ширина и высота кадра видеопоследовательности;  $S_{tr}$  — порог заметности объектов кадра  $t$ :

$$S_{tr} = \frac{\sum_x \sum_y S_{(in)x,y}}{w \times h}, \quad x \in (0, \dots, w), y \in (0, \dots, h). \quad (9)$$

Пример фрагмента стабилизированной последовательности кадров с последующей реконструкцией данных на границах кадра показан на рис. 6, *a* и *б*.

Представленный алгоритм дополнительной обработки при осуществлении программной стабилизации видеопоследовательностей дает возможность на основе нескольких кадров частично восстановить границы изображения после кадрирования последовательности. Таким образом, осуществляемая реконструкция границ при стабилизации позволяет сократить уменьшение области наблюдаемой сцены. Однако при больших уровнях дрожания камеры и невозможности полностью восстановить границы кадра с использованием соседних кадров применяемая интерполяция пикселей становится визуально заметной в некоторых случаях, например, при наличии сложных текстур или объектов со сложной контурной структурой.

### Экспериментальные исследования

Эксперименты проводились с применением видеопоследовательностей, представленных в таблице. В общей сложности проанализировано 50 видеопоследовательностей из базы данных SVW (Sports Videos in the Wild) [6], которая состоит более чем из 500 видеопоследовательностей, для которых известна их принадлежность к определенному виду спорта, уровень движения в кадре, а также диапазон кадров, содержащих движение оператора. Также анализировались видеопоследовательности, полученные из набора данных L1 Robust Optimal Camera Paths [5], содержащие сложную структуру сцены, движущиеся объекты и дрожание видеокамеры.

В результате разделения кадра на области, принадлежащие движущимся объектам, заметным объектам и фону изображения, становится возможным заполнить отсутствующие участки кадра при стабилизации достоверными фраг-

ментами кадра, в которых будут отсутствовать объекты переднего плана и движущиеся мелкие объекты. Оставшиеся области кадра заполняются путем восстановления текстуры на основе уже заполненных участков кадра, восстановленных на изображении. Пример результата стабилизации изображения и восстановления границ для сложной сцены, содержащей движущийся объект, а также сложную структуру фона, представлен на рис. 7, а–е.

Были проведены эксперименты, позволяющие оценить возможность отслеживания движущихся объектов на основе выделения значимых объектов переднего плана и фон позволяет точнее выполнять восстановление границ кадра в связи с тем, что объекты, имеющие высокую значимость на изображении, исключаются из обработки.

Так, потери информации на границах кадра при масштабировании изображения становятся существенно меньшими (рис. 8). Отметим, что

- Описание исходных данных экспериментов
- Description of dataset for experiments

Название	Разрешение, пикс.	Количество кадров	Виды движения	Объекты переднего плана	Априорная информация о границах движения
basketball_10191.mp4 (SVW)	640 × 360	120	Статичная камера, неравномерное движение объектов	Несколько объектов	Есть, границы движения для каждого из кадров
gymnastic_5511.mp4 (SVW)	640 × 360	300	Нестабильная камера, движение значимого объекта в кадре	Один объект интереса	То же
diving_4140.mp4 (SVW)	640 × 360	180	Один движущийся объект, быстрое смещение камеры	То же	– " –
sam_1.avi (Grundmann, [5])	630 × 360	330	То же	– " –	Номера кадров, содержащих движение
00081MTS-shaky original.avi [5]	640 × 360	1230	Движущиеся объекты, медленное смещение камеры	Несколько объектов интереса	То же
Gleicher4.avi (Grundmann, [5])	640 × 360	400	Неравномерное движение камеры, сложная структура фона	Один объект интереса	– " –
new_gleicher.avi (Grundmann, [5])	480 × 270	360	То же	Один объект интереса	– " –



- **Рис. 7.** Этапы алгоритма восстановления границ изображения для видеопоследовательности Sam\_1.avi [5]: *a* — оригинальный кадр; *b* — стабилизированное положение кадра с отсутствующими участками; *c* — нахождение заметности объектов; *d* — выделение движущихся объектов; *e* — восстановление границ кадра; *e* — увеличенные участки изображения со сложной структурой
- **Fig. 7.** Stages of algorithm for restoration of frame borders for video sequence Sam\_1.avi [5]: *a* — original frame; *b* — the stabilized frame position with the absent areas; *c* — detection of salient objects; *d* — restoration of frame borders; *e* — enlarged frame areas with complicated structure



- **Рис. 8.** Сравнение потерь информации на границах кадра при масштабировании изображения. Результаты представлены для базы видеопоследовательностей Sports Videos in the Wild [6]
- **Fig. 8.** Comparison of information losses in frame borders under image scaling. Results are represented for video dataset Sports Videos in the Wild [6]

полученные данные по стабилизации и восстановлению границ являются средними значениями для каждой видеопоследовательности.

### Заключение

Разработанный алгоритм позволяет выполнять восстановление границ кадра при стабилизации

с учетом сложной структуры сцены, наличия движущихся объектов в кадре, при этом учитывая изменение положения объектов на нескольких кадрах видеопоследовательности. Оценка заметности объектов и разделение сцены на фон и движущиеся объекты также могут быть использованы для повышения качества стабилизации изображения или применения алгоритмов видеоаналитики.

Проведенное сравнение алгоритма с другими известными методами восстановления границ показало отсутствие артефактов, возникающих в сложных сценах, и меньшие потери информации при масштабировании изображения. Обработка одного кадра размером  $1280 \times 720$  пикселей с учетом алгоритма стабилизации занима-

ет около 40 мс. Время работы алгоритма можно уменьшить, одновременно обрабатывая несколько кадров на стадиях оценки движения и заметности объектов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 16-07-00121 А.

## Литература

1. Matsushita Y., Ofek E., Ge W., Tang X., Shum H.-Y. Full-Frame Video Stabilization with Motion Inpainting // *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)*. 2006. Vol. 7. P. 1150–1163.
2. Davis J. Mosaics of Scenes with Moving Objects // *Proc. of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition/ IEEE Computer Society*. 1998. P. 354–360.
3. Litvin A., Konrad J., Karl W. Probabilistic Video Stabilization using Kalman Filtering and Mosaicking // *Proc. of IS&T/SPIE Symp. on Electronic Imaging, Image and Video Communications*. 2003. Vol. 1. P. 663–674.
4. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints // *International Journal of Computer Vision*. 2004. Vol. 60(2). P. 91–110.
5. Grundmann M., Kwatra V., Essa I., Grundmann M. Auto-directed Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Paths // *Proc. CVPR*. 2011. P. 225–232.
6. Safdarnejad S., Xiaoming L., Lalita U., Brooks A., Wood J., Craven D. Sports Videos in the Wild (SVW): A Video Dataset for Sports Analysis, Automatic Face and Gesture Recognition (FG) // *11th IEEE Intern. Conf. and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition*. 2015. Vol. 1. P. 1–7.
7. Favorskaya M. N., Damov M. V., Zotin A. G. Accurate Spatio-Temporal Reconstruction of Missing Data in Dynamic Scenes // *Pattern Recognition Letters*. 2013. Vol. 34(14). P. 1694–1700.
8. Matsushita Y., Ofek E., Ge W., Tang X., Shum H.-Y. Full-Frame Video Stabilization // *Computer Vision and Pattern Recognition*. 2005. P. 50–57.
9. Hu R., Shi R., Shen I., Chen W. Video Stabilization using Scale-Invariant Features // *11th Intern. Conf. Information Visualization*. 2007. P. 871–877.
10. Jia J., Wu T., Tai Y., Tang C. Video Repairing: Inference of Foreground and Background under Severe Occlusion // *Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition*. 2004. P. 364–371.
11. Favorskaya M. N., Jain L., Buryachenko V. V. Digital Video Stabilization in Static and Dynamic Scenes // *Computer Vision in Control Systems-1: Mathematical Theory*. — Springer, 2015. Vol. 73. P. 261–309.
12. Favorskaya M. N., Buryachenko V. V. Fast Salient Object Detection in Non-stationary Video Sequences Based on Spatial Saliency Maps // *Smart Innovation, Systems and Technologies*. 2016. Vol. 55. P. 121–132.
13. Katramados I., Breckon T. P. Real-time Visual Saliency by Division of Gaussians // *IEEE Intern. Conf. on Image Processing*. 2011. P. 1741–1744.
14. Favorskaya M. N., Buryachenko V. V. Fuzzy-Based Digital Video Stabilization in Static Scenes / G. A. Tsihrintzis, M. Virvou, L. C. Jain, R. J. Howlett, T. Watanabe (Eds.) // *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services in Practice. SIST*. — Springer, 2015. Vol. 36. P. 63–83.
15. Rosten E., Drummond T. Fusing Points and Lines for High Performance Tracking // *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Computer Vision*. 2005. Vol. 2. P. 1508–1511.

UDC 004.932

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.42

### Restoration of Frame Borders under Stabilization based on Background Model Building and Salient Objects Estimation

Buryachenko V. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, buryachenko@sibsau.ru

Favorskaya M. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, favorskaya@sibsau.ru

Zotin A. G.<sup>a</sup>, PhD, Associate Professor, zotin@sibsau.ru

Pahirka A. I.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, pahirka@sibsau.ru

<sup>a</sup>Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, 31, Krasnoyarsky Rabochy Ave., 660037, Krasnoyarsk, Russian Federation

**Introduction:** Digital video stabilization is often used in video processing systems and video surveillance in order to improve a quality of final video sequences. One of the main challenges deals with a loss of border regions of a frame during its scaling. The investigations in a framework of the alternative approaches for frame border restoration did not lead to reasonable algorithmic solution providing the required quality of frame. **Purpose:** The goal is to develop an effective algorithm providing a frame border restoration under video

stabilization based on the background model, estimation of the salient objects in a frame, and multi-band blending the border frame and reconstructed regions. **Results:** An algorithm has been developed for frame border restoration after stabilization stage. It is based on splitting the scene into a background model and salient objects, forming an intermediate buffer frame and stitching the frame borders for video sequences including a non-uniform movement of the camera and objects, as well as a multilevel scene. **Practical relevance:** The results were tested using a common dataset Sports Videos for Wild with a large number of video sequences obtained by a moving camera, and also video sequences L1 Robust Optimal Camera Path commonly used as video stabilization test material. The implementation of the developed algorithm allows the decrease in the frame scaling and frame losses down to 3-5% even in the cases of complex movement and complex structure of a scene.

**Keywords** — Video Stabilization, Saliency Model, Feature-Point Detection, Background Detection, Motion Compensation, Frame Border Restoration.

## References

1. Matsushita Y., Ofek E., Ge W., Tang X., Shum H.-Y. Full-Frame Video Stabilization with Motion Inpainting. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2006, vol. 7, pp. 1150–1163.
2. Davis J. Mosaics of Scenes with Moving Objects. *Proc. of IEEE Computer Vision and Pattern Recognition*, 1998, pp. 354–360.
3. Litvin A., Konrad J., Karl W. C. Probabilistic Video Stabilization using Kalman Filtering and Mosaicking. *Proc. of IS&T/SPIE Symp. on Electronic Imaging, Image and Video Communications*, 2003, vol. 1, pp. 663–674.
4. Lowe D. G. Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *Intern. Journal of Computer Vision*, 2004, vol. 60, no. 2, pp. 91–110.
5. Grundmann M., Kwatra V., Essa I. Auto-Directed Video Stabilization with Robust L1 Optimal Camera Paths. *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition*, 2011, pp. 225–232.
6. Safdarnejad S. M., Xiaoming L., Lalita U., Brooks A., Wood J., Craven D. Sports Videos in the Wild (SVW): A Video Dataset for Sports Analysis, Automatic Face and Gesture Recognition (FG). *11th IEEE Intern. Conf. and Workshops on Automatic Face and Gesture Recognition*, 2015, vol. 1, pp. 1–7.
7. Favorskaya M. N., Damov M. V., Zotin A. G. Accurate Spatio-Temporal Reconstruction of Missing Data in Dynamic Scenes. *Pattern Recognition Letters*, 2013, vol. 34, no. 14, pp. 1694–1700.
8. Matsushita Y., Ofek E., Ge W., Tang X., Shum H.-Y. Full-Frame Video Stabilization. *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, pp. 50–57.
9. Hu R., Shi R., Shen L., Chen W. Video Stabilization using Scale-Invariant Features. *11th Intern. Conf. Information Visualization*, 2007, pp. 871–877.
10. Jia J., Wu T., Tai Y., Tang C. Video Repairing: Inference of Foreground and Background under Severe Occlusion. *Proc. IEEE CVPR*, 2004, pp. 364–371.
11. Favorskaya M. N., Jain L. C., Buryachenko V. V. Digital Video Stabilization in Static and Dynamic Scenes. In: *Computer Vision in Control Systems-1: Mathematical Theory*. M. N. Favorskaya, L. C. Jain (Eds.). ISRL. Springer, 2015, vol. 73, pp. 261–310.
12. Favorskaya M. N., Buryachenko V. V. Fast Salient Object Detection in Non-Stationary Video Sequences Based on Spatial Saliency Maps. In: *Smart Innovation, Systems and Technologies*. G. De Pietro, L. Gallo, R. J. Howlett, L. C. Jain (Eds.). Springer, 2016, vol. 55, pp. 121–132.
13. Katramados I., Breckon T. P. Real-time Visual Saliency by Division of Gaussians. *IEEE Intern. Conf. on Image Processing*, 2011, pp. 1741–1744.
14. Favorskaya M. N., Buryachenko V. V. Fuzzy-Based Digital Video Stabilization in Static Scenes. In: *Intelligent Interactive Multimedia Systems and Services in Practice*. G. A. Tsihrintzis, M. Virvou, L. C. Jain, R. J. Howlett, T. Watanabe (Eds.). SIST. Springer, 2015, vol. 36, pp. 63–83.
15. Rosten E., Drummond T. Fusing Points and Lines for High Performance Tracking. *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Computer Vision*, 2005, vol. 2, pp. 1508–1511.

## ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

*Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.*

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (ius.spb@gmail.com).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

*Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.*

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КАРТ ГЛУБИНЫ ДЛЯ НЕПОДВИЖНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ

**Н. Н. Красильников<sup>а</sup>**, доктор техн. наук, профессор

**О. И. Красильникова<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,  
Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** создание карты глубины является центральным элементом технологии конвертации двумерного изображения в стереоскопическое изображение, однако способы ее изготовления фирмами, специализирующимися в области конвертации изображений, не разглашаются. **Цель исследования:** разработка метода получения пространственных координат объектов, представленных на двумерных изображениях, и разработка на их основе технологии построения карты глубины. **Методы:** для решения поставленной проблемы были использованы законы бинокулярного зрения, методы и алгоритмы трехмерной графики, а также экспериментальные исследования. **Результаты:** разработана технология изготовления карт глубины, которая состоит из следующих последовательно выполняемых операций. Сначала двумерное изображения сегментируется на фрагменты простых поверхностей, аппроксимирующих объекты изображенной сцены с их последующим разделением на две группы. Затем определяются пространственные координаты каждой из аппроксимирующих поверхностей путем анализа исходного двумерного изображения. Далее, исходя из критического значения экранного паралакса, определяется оптимальное значение координаты глубины экрана, на который проецируется стереоскопическое изображение. После этого на карте глубины выполняется заливка аппроксимирующих поверхностей оттенками серого, которые определяются координатам глубины объектов. Показано, что для создания эффекта реальности изображаемой сцены необходимо, чтобы размеры проекций объектов, координаты глубины которых совпадают с координатой глубины экрана, равнялись размерам самих объектов, а это, как правило, требует применения больших экранов, расположенных на значительном удалении от зрителя. В кинотеатрах это условие выполняется, а при просмотре 3D-фильмов на экранах 3D-телевизоров нет, что приводит к возникновению эффекта театра марионеток. **Практическая значимость:** разработанная технология позволяет при конвертации двумерных изображений и кинофильмов в стереоскопический (3D) формат создавать карты глубины на основании расчетов, избегая трудоемкого подбора параметров.

**Ключевые слова** – стереоскопическое изображение, карта глубины.

### Введение

Проблема определения координаты глубины реального объекта, представленного на единственном двумерном изображении, возникает, в частности, при конвертации этого изображения в стереоскопический формат. Как правило, эта проблема имеет решение, что следует из повседневного жизненного опыта, в чем нетрудно убедиться. Действительно, при монокулярном наблюдении окружающего пространства легко определяются расстояния до окружающих нас объектов. Объясняется это тем, что центральная проекция наблюдаемой сцены на сетчатку глаза, как правило, содержит необходимую информацию для восстановления утраченной при проекции координаты глубины. Эта информация используется специальными зрительными механизмами, к числу которых, в частности, относятся: механизм, основанный на том, что удаленные объекты кажутся меньших размеров, чем объекты, расположенные близко; механизм, использующий свойство центральной проекции, заключающееся в том, что удаленные объекты расположены на изображении ближе к линии горизонта, чем объекты, расположенные ближе к зрителю, а также ряд других [1–3]. Использование этой особенности центральной

проекции позволяет восстанавливать утраченную при проецировании информацию о глубине сцены, представленной на 2D-изображении, создавая так называемую карту глубины.

### Сегментация 2D-изображения на аппроксимирующие поверхности

Карта глубины представляет собой черно-белое (grayscale) двумерное изображение силуэтов объектов исходного изображения, на котором яркость каждого из силуэтов определяет его координату глубины. Карту глубины можно рассматривать как предельный случай векторной полигональной модели 3D-изображения обращенных к камере оболочек объектов сцены, когда размер полигона вырождается в один пиксель. Будучи спроецированным на эти оболочки, 2D-изображение создает виртуальную 3D-сцену. Таким образом, 2D-изображение совместно с картой глубины описывают 3D-сцену, и хотя часто карта глубины применяется при использовании стереоскопического метода отображения трехмерного пространства, ее роль значительно шире и она имеет самостоятельное значение.

Обратим внимание также на то, что при использовании карты глубины совместно с 2D-изображением для создания стереоскопического

(3D) изображения посредством яркости  $L$  каждого пикселя карты глубины представляют значение экранного параллакса  $p$ , а не самой координаты глубины:

$$L = A_0 + A_1 p/b, \quad (1)$$

где  $A_0$  и  $A_1$  — постоянные коэффициенты;  $b$  — расстояние между зрачками глаз зрителя (база). Экранный параллакс, однозначно связанный с координатой глубины виртуального объекта  $d_{ob}$  на 3D-изображении известным соотношением

$$p = \frac{b(d_{ob} - d_{sc})}{d_{ob}}, \quad (2)$$

где  $d_{sc}$  — расстояние от зрителя до экрана, обладает тем преимуществом, что имеет более компактную шкалу значений, чем шкала координаты глубины  $d_{ob}$  [4]. При этом значения коэффициентов  $A_0$  и  $A_1$  выбирают равными  $A_0 = 127$  и  $A_1 = -127$ . Таким образом:

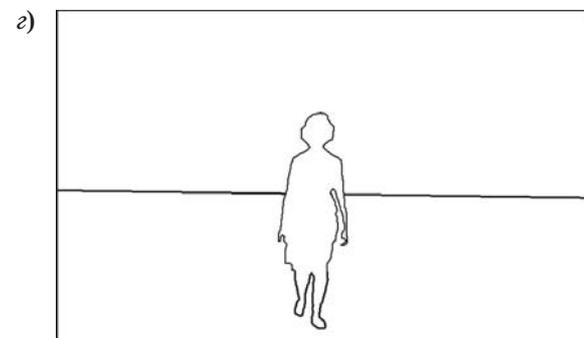
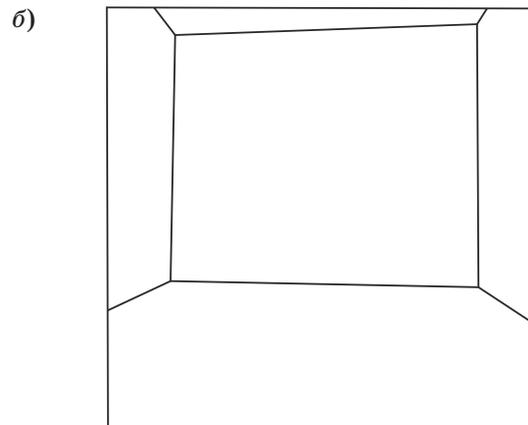
$$L = 127(1 - p/b) \quad (3)$$

и, соответственно:

$$p/b = 1 - L/127, \quad (4)$$

где  $L$  — яркость, которая представляется номером квантового уровня. При таком выборе коэффициентов  $A_0$  и  $A_1$  максимально используется диапазон яркостей карты глубины. При создании карты глубины наиболее удаленные объекты обычно относят к фону, а их экранный параллакс приравнивается значению экранного параллакса бесконечно удаленных объектов, т. е. равным базе  $b$ , что соответствует  $L = 0$ . Для наиболее близко расположенных объектов яркость на карте глубины обычно устанавливается равной уровню квантования 255.

На практике, как правило, используют приближенные карты глубины, при создании которых поверхности объектов сцены на 2D-изображении аппроксимируют небольшим количеством простых поверхностей, например, плоскостей, гауссовых поверхностей, фрагментов цилиндрических поверхностей или фрагментов поверхностей эллипсоидов [5]. С этой целью исходное 2D-изображение сегментируется на фрагменты, каждый из которых представляется одной из



■ **Рис. 1.** Исходное 2D-изображение (а, в) и схема, поясняющая его разделение на фрагменты аппроксимирующих поверхностей (б, г)  
 ■ **Fig. 1.** The original 2D image (a, в) and the diagram explaining its division into fragments of approximating surfaces (б, г)

таких поверхностей. В случае неподвижных изображений процесс этот, как правило, выполняется вручную посредством так называемого метода ротоскопирования, при котором последовательно обрисовывается каждый объект. Выделенные при этом фрагменты могут представлять собой изображения как отдельных объектов сцены, так и их групп.

Объекты сцены условно можно разделить на две группы. К первой группе относятся объекты, формирующие пространство сцены, например, стены, потолок и пол интерьера, поверхность дорожного покрытия улицы, стены стоящих по бокам домов и т. п. Особенность этих объектов заключается в том, что они имеют большую протяженность по глубине и если они аппроксимируются плоскостями, то нанесенные на них параллельные линии сходятся в точку схода при бесконечном удалении. Ко второй группе относятся объекты, заполняющие сцену, например, предметы мебели, люди, деревья, автомобили, фонарные столбы и т. д. Особенность этих объектов состоит в том, что, во-первых, они имеют небольшую протяженность по глубине и могут быть аппроксимированы фрагментами плоскостей, параллельными плоскости исходного 2D-изображения, или фрагментами плоскостей, расположенными под небольшим углом к этой плоскости, это так называемые «плоские объекты». Во-вторых, эти аппроксимирующие фрагменты плоскостей опираются на горизонтальную или близкую к ней поверхность, например, на пол помещения, на поверхность земли и т. д., а не парят в воздухе.

Отмеченная особенность объектов исходного 2D-изображения проявляется при определении координат глубины различных частей этих объектов. В первом случае всегда имеется направление, перемещение по которому, не выходя за пределы фрагмента, соответствует изменению координаты глубины представленного на 2D-изображении фрагмента сцены. Во втором случае такое направление отсутствует.

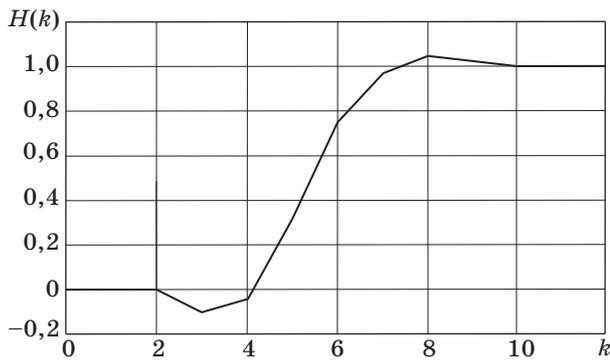
В качестве примера на рис. 1, *a–г* приведены исходные 2D-изображения и схемы, поясняющие их разделение на фрагменты аппроксимирующих поверхностей. На рис. 1, *a* объекты: пол, потолок и стены интерьера — аппроксимируются фрагментами плоскостей, которые соответствуют двум горизонтальным и трем вертикальным поверхностям сцены. На рис. 1, *в* объект — небосвод — аппроксимируется фрагментом сферы, а объекты поле и фигура девушки, идущей по полю, аппроксимируются фрагментами плоскостей. При этом первые два объекта являются протяженными по глубине, а третий имеет малую протяженность, это так называемый «плоский» объект.

### Допустимая величина геометрических погрешностей при сегментации

Геометрические погрешности, допущенные при изготовлении карт глубины, заключающиеся в расхождении границ силуэтов с границами отображаемых ими объектов, проявляются на стереоскопических изображениях двойко. Если размеры силуэтов объектов на карте глубины превышают размеры соответствующих им объектов на 2D-изображении, то на стереоскопическом изображении узкие области пространства, окружающего такие объекты, смещаются по глубине к этим объектам, и появляются ореолы, заполненные деталями фона, на котором они наблюдаются. В противном случае если размеры силуэтов объектов на карте глубины оказываются меньше размеров соответствующих им объектов на 2D-изображении, то на стереоскопическом изображении узкие области объектов, примыкающие к их контурам изнутри, отсоединяются от них и смещаются по глубине к областям окружающего их пространства, например к фону.

Для оценки допустимого уровня погрешностей этого типа были выбраны шесть 2D-изображений различного сюжетного содержания и, соответственно, различной структуры, а также соответствующие им карты глубины. Далее карты глубины были подвергнуты следующим преобразованиям. Вначале из каждой карты глубины посредством графического редактора PhotoShop были изготовлены версии, геометрические размеры которых были уменьшены в  $n$  раз, где  $n = 2, 4, 8, 16, 32$  и  $64$  раза соответственно, а затем сохранены в памяти. При уменьшении линейного размера карты глубины количество отсчетов (пикселей), которым она представляется, также сокращается пропорционально величине этого уменьшения. После этого каждая из уменьшенных версий карт глубины с уменьшенным количеством отсчетов посредством этого же редактора была восстановлена до своего первоначального размера, при этом недостающие отсчеты восстанавливались редактором путем интерполяции. Описанное преобразование вносило в карты глубины погрешности, которые выражались в размытии резких световых границ. На рис. 2 приведена диаграмма, иллюстрирующая это размытие для случая  $n = 2$ . Из графика, на котором по оси ординат отложена относительная величина яркостного перепада, а по оси абсцисс — номера отсчетов, следует, что зона размытия составляет 3 отсчета.

При  $n = 4$  зона размытия возрастает до шести отсчетов. Далее для каждой пары «2D-изображение — преобразованная карта глубины» были получены соответствующие им стереоскопические изображения в анаглифном формате.



■ **Рис. 2.** Иллюстрация размытия световой границы,  $n = 2$   
 ■ **Fig. 2.** Illustration of the blurring of the light edge for the case, when  $n = 2$

Естественно, что чем в большее количество раз при описанных выше преобразованиях уменьшаются размеры карты глубины, тем большие геометрические погрешности она содержит и, соответственно, тем больший уровень искажений возникает в стереоскопическом изображении, которое получается с использованием этой карты глубины.

Для оценки величины геометрических погрешностей, допущенных при изготовлении карты глубины, приводящих к заметным зрительным искажениям на стереоскопическом изображении, было разработано специальное приложение, посредством которого на экран монитора для просмотра выводились одновременно два стереоскопических изображения в анаглифном формате: эталонное, полученное с использованием неискаженной карты глубины, и искаженное, полученное с использованием карты глубины, содержащей геометрические искажения. Зритель при выполнении эксперимента рассматривал и сравнивал между собой оба стереоскопических изображения через анаглифные очки. Перед выводом стереоскопических изображений на экран зрителю сначала предъявлялись «стирающие», шумовые изображения. При выводе эталонного и искаженного изображений на экран их взаимное расположение (справа, слева) было случайным, неизвестным зрителю. Время предъявления изображений для их сравнения при выполнении эксперимента устанавливалось на один из интервалов, которые равнялись 10 и 20 с соответственно, после чего оба изображения с экрана удалялись.

Задача зрителя состояла в определении, какое из двух предъявленных изображений, правое или левое, имеет более высокое качество, т. е. является эталонным. В зависимости от принятого решения зритель должен был нажать одну из кнопок, расположенных в нижней части окна приложения, соответственно, справа или слева.

- Зависимость относительного количества  $P$  правильных решений зрителя для разных значений кратности изменения размеров карты глубины  $n$
- Dependence of the relative number  $P$  of correct decisions of the viewer for different values of the multiplicity of the change in the size of the depth map  $n$

$n$	$P$ при времени наблюдения	
	10 с	20 с
2	0,5108	0,538833
4	0,5922	0,6075
8	0,6443	0,685167
16	0,7543	0,751833
32	0,8105	0,825167
64	0,7933	0,819667

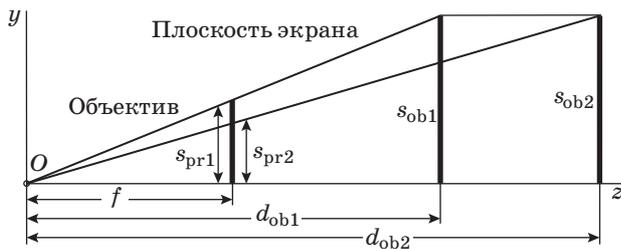
С каждой парой стереоскопических изображений (эталонное — искаженное) зритель выполнял по 20 сравнений, при этом приложение автоматически вычисляло относительное количество  $P$  правильных решений зрителя и выводило эту величину на экран. Полученные данные записывались экспериментатором. В экспериментах приняли участие 11 человек. В таблице приведены результаты измерений, усредненные по шести изображениям и 11 зрителям.

Из таблицы видно, что при  $n = 2$  зрители не отличают стереоскопические изображения, полученные при использовании искаженной карты глубины, у которой зона размытости световых границ составляет 3 отсчета (пикселя), от стереоскопических изображений, которые получены с использованием неискаженной карты глубины. Из этого следует, что в качестве максимально приемлемой геометрической погрешности при изготовлении карт глубины можно рекомендовать погрешность  $\pm 2$  пикселя. Анализ карт глубины, опубликованных в Интернете, дает примерно такое же значение геометрической погрешности.

### Определение пространственных координат аппроксимирующих поверхностей и выбор координаты глубины экрана

Для определения пространственных координат и размеров объектов, представленных на исходном 2D-изображении, необходимо знание фокусного расстояния объектива камеры, которой сделано это изображение.

Фокусное расстояние объектива определяет его поле зрения и в простейшем случае может быть прочитано на его корпусе. При этом следует иметь в виду, что фокусное расстояние, обозначенное на корпусе объектива камеры, приведено к изображению размером  $36 \times 24$  мм. При использовании изображений, предварительно



■ **Рис. 3.** Модель камеры с передней плоскостью изображения и два объекта в виде отрезков прямых, расположенные в координатной плоскости  $yz$ , расстояние между которыми известно  
 ■ **Fig. 3.** The camera model with front image plane and two objects in the form of straight lines located in a coordinate plane  $yz$ , the distance between which is known

увеличенных в  $K$  раз, необходимо использовать эффективное фокусное расстояние, увеличенное в это же число раз.

Если фокусное расстояние камеры, посредством которой получено 2D-изображение, не известно, его следует определить по самому изображению. Это можно сделать, если на изображении имеются по крайней мере два объекта, опирающихся на горизонтальную поверхность, например на дорожное покрытие, для которых известны размеры и расстояние между ними по глубине  $\Delta d$ . Примером могут служить фотографии, на которых представлено 2D-изображение городской улицы с автомобилями, трамваями, зданиями и другими объектами, имеющими заметную протяженность в направлении всех трех координат, которую можно приближенно оценить. Поясним сказанное рис. 3, на котором представлена модель камеры с передней плоскостью изображения и два объекта в виде отрезков прямых длиной  $s_{ob1}$  и  $s_{ob2}$ , расположенных в координатной плоскости  $yz$ , расстояние между которыми известно и равно  $\Delta d$ :

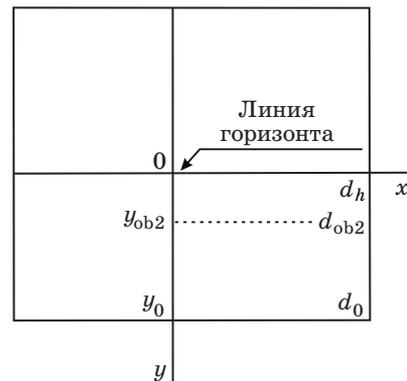
$$\Delta d = d_{ob2} - d_{ob1}, \quad (5)$$

где  $d_{ob1}, d_{ob2}$  — координаты глубины этих объектов. Для определения координат глубины в рассматриваемом случае составим очевидные пропорции

$$\frac{s_{ob1}}{s_{pr1}} = \frac{d_{ob1}}{f}, \quad (6)$$

$$\frac{s_{ob2}}{s_{pr2}} = \frac{d_{ob2}}{f}, \quad (7)$$

где  $s_{pr1}$  и  $s_{pr2}$  — проекции объектов. Решая совместно уравнения (5)–(7), находим значение фокусного расстояния камеры



■ **Рис. 4.** Исходное 2D-изображение, на котором показана система координат  $x, y$  и положение линии горизонта  
 ■ **Fig. 4.** The original 2D image, which shows the coordinate system  $x, y$  and the position of the horizon line

$$f = \frac{s_{pr2} \Delta d}{s_{ob2} \left( 1 - \frac{s_{ob1} s_{pr2}}{s_{ob2} s_{pr1}} \right)}. \quad (8)$$

Обратим внимание, что в данном случае найдено эффективное фокусное расстояние камеры, при этом координаты глубины объектов находятся как

$$d_{ob1} = f \frac{s_{ob1}}{s_{pr1}}; \quad (9)$$

$$d_{ob2} = f \frac{s_{ob2}}{s_{pr2}}. \quad (10)$$

Границы исходного 2D-изображения, его система координат  $x, y$  и положение на нем линии горизонта показаны на рис. 4. Кроме того, на рисунке использованы следующие обозначения: координата глубины линии горизонта  $d_h$ , координата глубины ближайшей к камере части горизонтальной поверхности  $d_0$ , на которой расположены объекты, а также координата глубины одного из объектов, в данном случае  $d_{ob2}$ .

Нетрудно видеть, что координата  $y$  любого точечного объекта на 2D-изображении и его координата глубины  $d$  в отображаемом пространстве связаны соотношением

$$d = \frac{y_0 d_0}{y}. \quad (11)$$

Другими словами, координата глубины изменяется обратно пропорционально координате  $y$ , благодаря чему на фотографии железнодорожного пути рельсы, оставаясь прямыми, сходятся на

горизонте в точку. Величина  $d_0$  находится путем подстановки в формулу (11) значений  $d_{ob2}$  и  $y_{ob2}$  и решения получившегося уравнения относительно  $d_0$ :

$$d_0 = \frac{y_{ob2} d_{ob2}}{y_0}.$$

Таким образом, полученная формула позволяет определить координату глубины любого объекта путем подстановки в нее координаты точки опоры его на горизонтальную поверхность  $y$ . Размеры объектов находятся по формуле

$$s_{ob} = \frac{s_{pr} d_{ob}}{f}.$$

После того как определены координата глубины, соответствующая нижней границе изображения  $d_0$ , и положение линии горизонта, координата глубины которой  $d_h \rightarrow \infty$ , следует перейти к выбору расстояния до экрана (координаты глубины экрана), на который будет выводиться стереоскопическое изображение,  $d_{sc}$ . При выборе расстояния от зрителя до экрана  $d_{sc}$  потребуем, чтобы при воспроизведении стереоскопического изображения отсутствовали бы такие неприятные артефакты, как ощущение дискомфорта,

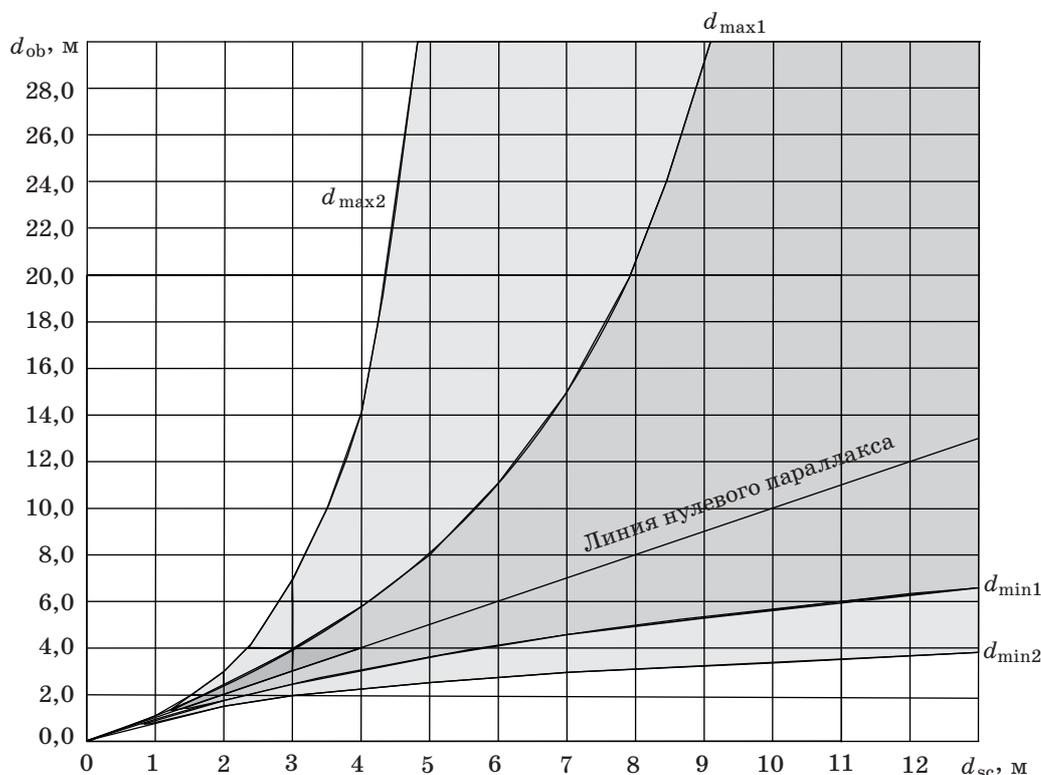
двоение изображения и пр. [6]. Для этого, как было показано в работе [7], необходимо, чтобы координаты глубин объектов, воспроизводимых в виртуальном пространстве, не выходили за пределы интервала  $d_{min} - d_{max}$ :

$$d_{min} = \frac{d_{sc}}{1 + \frac{d_{sc} \operatorname{tg} |\alpha_{cr}|}{b}}; \quad (12)$$

$$d_{max} = \frac{d_{sc}}{1 - \frac{d_{sc} \operatorname{tg} |\alpha_{cr}|}{b}}, \quad (13)$$

где  $|\alpha_{cr}|$  — абсолютная величина критического значения углового размера экранного параллакса [7, 8]. На рис. 5 в виде кривых приведены зависимости граничных значений  $d_{min}$  и  $d_{max}$  от  $d_{sc}$  для двух значений  $|\alpha_{cr}|$ , равных 17 и 40 соответственно.

Из рассмотрения графика на рис. 5 следует, что чем более жесткие требования предъявляются к стереоскопическому изображению в отношении возникновения артефактов в виде ощущений дискомфорта и двоения изображения, выражающиеся в уменьшении критического значения экранного параллакса, тем большее следует выбирать расстояние до экрана  $d_{sc}$ . Беглый анализ



■ **Рис. 5.** Зависимости граничных значений  $d_{min}$  и  $d_{max}$  от  $d_{sc}$  для двух значений  $|\alpha_{cr}|$ , равных 17 и 40' соответственно  
 ■ **Fig. 5.** Dependences of the boundary values  $d_{min}$  and  $d_{max}$  on  $d_{sc}$  for two values of  $|\alpha_{cr}|$  equal to 17 and 40' respectively

3D-фильмов показал, что в большинстве случаев их создатели ориентируются на значения  $|\alpha_{cr}| < 40$  угл. мин, хотя встречаются значения, достигающие до 120 угл. мин и более [7, 8].

При выборе расстояния до экрана необходимо обеспечить представление на стереоскопическом изображении заднего плана с минимальными искажениями по глубине. Учитывая изложенное, потребуем, чтобы координата глубины  $d_{max}$  равнялась бы координате глубины линии горизонта  $d_h$ , т. е. чтобы

$$d_{max} = d_h, \quad (14)$$

при этом по определению  $d_h \rightarrow \infty$ . Решая совместно (13) и (14) относительно  $d_{sc}$  с учетом того, что  $d_h \rightarrow \infty$ , находим

$$d_{sc} = b / \operatorname{tg} |\alpha_{cr}|. \quad (15)$$

Значение  $d_{min}$  получим путем подстановки найденного значения  $d_{sc}$  в формулу (12), что дает

$$d_{min} = d_{sc} / 2. \quad (16)$$

После этого необходимо проверить, попадает ли в интервал допустимых значений координата глубины нижней части изображения  $d_0$  путем ее сравнения с координатой глубины  $d_{min}$ . В случае, если окажется, что  $d_0 < d_{min}$ , необходимо либо отказаться от конвертации всего изображения в 3D-формат, «отрезав» его нижнюю часть, либо сознательно пойти на искажения правильной передачи его глубины.

Перейдем теперь к определению экранного параллакса, для чего обратимся к формуле (11). Учитывая, что  $d_0 = d_{min}$ , а  $d_{min}$  согласно (16), равно  $d_{sc} / 2$ , запишем

$$d_{ob} = \frac{y_0 d_{sc}}{2y}. \quad (17)$$

Делая подстановку  $d_{ob}$  в формулу (2) и решая получившееся уравнение относительно экранного параллакса, запишем

$$p = b \left( 1 - \frac{2y}{y_0} \right). \quad (18)$$

Таким образом, величина экранного параллакса по мере перемещения от линии горизонта в сторону нижней границы изображения линейно изменяется от максимального положительного значения  $b$  до максимального по абсолютной величине отрицательного значения  $b$ . Из этого следует, что плоскость, на которой расположены объекты исходного изображения, на карте глубины может быть залита посредством ли-

нейной градиентной заливки, при этом яркость линии горизонта должна быть представлена нулевым (или близким к нулю) уровнем квантования, а яркость нижней границы карты глубины — уровнем квантования 255 (или близким к нему).

### Заливка аппроксимирующих поверхностей

После разделения 2D-изображения на аппроксимирующие поверхности следует приступить к заливке выделенных контурами областей. Начинать надо с протяженных объектов, для которых делается градиентная заливка. Например, в случае изображения, показанного на рис. 1, в, следует сделать линейную градиентную заливку фрагмента плоскости, которым аппроксимируется поле, и радиальную градиентную заливку фрагмента сферы, которым аппроксимируется небосвод. При этом целесообразно минимальную яркость взять равной или близкой нулевому уровню квантования по яркости, а максимальную — равной или близкой 255-му уровню квантования по яркости. Такой выбор обеспечит максимальное количество уровней квантования экранных параллаксов. После заливки выделенных фрагментов поверхностей, аппроксимирующих протяженные объекты, следует перейти к заливке фрагментов поверхностей, аппроксимирующих «плоские» объекты. Как правило, это вертикально ориентированные объекты, например, люди, столбы, деревья и т. д. Особенность их заливки заключается в том, что яркость силуэта заливаемой фигуры должна совпадать с яркостью поверхности, на которой эта фигура стоит. На рис. 1, в таким фрагментом является выделенная контуром фигура девушки, идущей по полю, которая аппроксимируется плоскостью. На рис. 6 показана



■ **Рис. 6.** Карта глубины изображения, приведенного на рис. 1, в, после заливки  
 ■ **Fig. 6.** The depth map of the image shown in Fig. 1, в, after the filling

карта глубины изображения, представленного на рис. 1, в, после заливки.

### Конвертация 2D-изображения в 3D-формат и представление стереоскопических изображений на малом экране

Заключительным этапом подготовки к конвертации 2D-изображения в 3D-формат является перевод всех найденных ранее размеров из единиц длины в количество пикселей. В результате предыдущих расчетов была получена формула (18), представляющая зависимость величины экранного параллакса  $p$  от координаты  $y$  для горизонтальной поверхности, на которой стоят объекты сцены, например поверхности земли:

$$p = b \left( 1 - \frac{2y}{y_0} \right).$$

В этой формуле значения переменных в ее правой части известны и представлены в единицах длины, а следовательно, и рассчитанное по этой формуле значение экранного параллакса также выражается в этих же единицах, например в метрах, где  $b = 0,065$  м. Однако реально на экране компьютера имеется изображение, представленное в виде матрицы пикселей, размеры которого определены числом строк и числом пикселей в строке. Поэтому всю дальнейшую обработку изображения и, в частности, установку экранных параллаксов необходимо выполнять, используя в качестве единицы измерения количество пикселей. При этом величина экранного параллакса  $p$  и базы  $b$  также должны быть представлены количеством пикселей. Для этого необходимо определить значение базы также в пикселях  $b_{\text{пик}}$ . С этой целью вначале определяется ширина 2D-изображения в пикселях на экране монитора  $n_{\text{пик}}$ . Затем определяется ширина  $w_0$  ближайшей к камере части сцены, отображаемой на 2D-изображении, в метрах, что, как правило, несложно сделать, ориентируясь на размеры знакомых объектов. Принимая во внимание, что, согласно (18), при  $y = y_0$  экранный параллакс  $p = -b$ , составим очевидную пропорцию

$$\frac{b_{\text{пик}}}{b} = \frac{n_{\text{пик}}}{w_0},$$

откуда

$$b_{\text{пик}} = b \frac{n_{\text{пик}}}{w_0}. \quad (19)$$

Полученный результат следует округлить.

И, наконец, необходимо определить геометрические размеры проекции на экран конвертируе-

мого 2D-изображения, а также его карты глубины, полагая, что  $d_0 = d_{\text{min}}$ .

Размеры объектов, приведенные к экрану, определяются путем изменения масштаба исходного 2D-изображения в  $K_0$  раз:

$$K_0 = d_{\text{sc}} / f, \quad (20)$$

где  $f$  — эффективное фокусное расстояние.

Для того чтобы для зрителя виртуальное 3D-пространство, создаваемое стереоскопическим изображением, было бы не отличимо от реального 3D-пространства, необходимо отсутствия конфликта между зрительными механизмами, посредством которых зрительная кора оценивает его глубину. Если это условие не обеспечивается, возникают различного рода артефакты. Один из таких артефактов возникает, когда размер изображения, выводимого на экран, не соответствует тому, который бы должен быть. Проиллюстрируем это следующим примером.

Известно, что при наблюдении сцены, содержащей объекты, размеры  $s_{\text{об}}$  которых знакомы зрителю, одним глазом, зрительная система без труда оценивает их удаленность  $d_{\text{об}}$ , основываясь на размере их проекций  $s_{\text{пр}}$  на сетчатку глаза и фокусном расстоянии оптики глаза  $f$ :

$$d_{\text{об}} = \frac{s_{\text{об}} f}{s_{\text{пр}}}.$$

В случае наблюдения стереоскопического изображения двумя глазами зрительной системе по-прежнему известны  $s_{\text{пр}}$ ,  $f$ . Однако в этом случае зрительная система приоритет отдает данным  $d_{\text{об}}$ , полученным посредством бинокулярного зрения на основании определения параллакса. Поскольку при этом оценка координаты глубины механизмом зрения, основанным на оценке масштаба проекции, и механизмом стереоскопического зрения различаются, то зрительная кора устраняет это расхождение, принимая результаты оценки первым механизмом недостоверными и «назначая» объекту другой размер, равный

$$s_{\text{об}} = \frac{s_{\text{пр}} d_{\text{об}}}{f}.$$

Применительно к наблюдению стереоскопического изображения на малом экране, соответственно в уменьшенном масштабе, зритель увидит объекты в уменьшенном размере, а глубину сцены сокращенной, т. е. возникает эффект театра марионеток. С этим случаем мы встречаемся при наблюдении стереоскопических изображений на экранах 3D-телевизоров. Выходом из создавшегося положения может служить применение 3D-очков (по существу, стереоскопов), в ко-

торых посредством специальной оптики достигается эффект демонстрации стереоскопических изображений на большом экране в необходимом масштабе [9].

### Заключение

Методы получения и демонстрации 3D-изображений являются одним из направлений интенсивного развития информационных технологий. Следует отметить, что стереоскопический формат демонстрации 3D-изображений хотя и обладает рядом существенных недостатков, тем не менее применяется в настоящее время, поскольку для его реализации созданы сравнительно несложные устройства отображения. Можно предположить, что следующим этапом развития технологии демонстрации 3D-изображений будет переход от стереоскопического метода демонстрации 3D-изображений к голографическому методу, свободному от недостатков стереоскопического метода, однако в настоящее время трудно

оценить время появления голографических дисплеев, поскольку их разработка связана с большими технологическими трудностями.

Обращаясь к области применения 3D-изображений и видео, заметим, что она не ограничивается развлекательной индустрией. Эти технологии уже сейчас используются для 3D-визуализации и реконструкции предметов культурного наследия. Они могут быть также применены для релаксации экипажей, работающих в замкнутых пространствах, например, экипажей космических кораблей, атомных подводных лодок и т. п., где клаустрофобия является одним из факторов, ограничивающих допустимое время работы [10–12].

Естественно также ожидать, что появление технологии 3D-изображений в конечном итоге приведет к возникновению нового вида искусства со своими приемами подачи идей, подобно тому, как изобретение братьев Люмьер привело к появлению искусства кинематографии, которое отличается от театрального искусства.

### Литература

1. Красильников Н. Н. Метод формирования 3D-изображения сцены по одной фотографии // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3. С. 2–7.
2. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Метод конвертации 2D-изображения в стереоскопическое 3D-изображение // Оптический журнал. 2014. № 2(82). С. 20–28.
3. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Определение координаты глубины по 2D-изображению // Оптический журнал. 2011. № 12(78). С. 30–33.
4. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Методы конвертации 2D-изображений и видео в стереоскопический формат // Информационно-управляющие системы. 2015. № 5. С. 18–25. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.18
5. Пат. 2600524 РФ. Способ конвертации 2D-изображения в квазистереоскопическое 3D-изображение / Красильников Н. Н., Красильникова О. И. (РФ). — № 2014129256; заявл. 15.07.2014; зарегистр. 29.09.2016.
6. Почему от 3D болит голова. Ч. 4. Параллакс // <https://geektimes.ru/post/248970/> (дата обращения: 05.01.2017).
7. Красильников Н. Н. Влияние расстояния наблюдения на глубину пространства, воспроизводимую стереоскопическим изображением // Оптический журнал. 2016. № 8(83). С. 68–76.
8. Красильников Н. Н., Красильникова О. И. Исследование критического значения экранного параллакса // Информационно-управляющие системы. 2016. № 2. С. 19–25. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.19
9. Портал для избранных. Oculus Rift Development Kit 2. <http://www.hi-fi.ru/magazine/video/portal-dlya-izbrannykh-oculus-rift-development-kit-2/> (дата обращения: 05.01.2017).
10. Клаустрофобия. Причины, симптомы и признаки, лечение, профилактика патологии. <http://www.polismed.com/articles-klaustrofobija-prichiny-simptomu-i-priznaki-lechenie-profilaktika-patologii.html> (дата обращения: 10.04.2017).
11. Константинов А. Как подводники выдерживают трехмесячное пребывание под водой. <http://www.online812.ru/2010/07/29/007/> (дата обращения: 10.04.2017).
12. Приложение к статье «Проблемы редактирования 3D-изображений и видео». [http://cv.guap.ru/krasilnikov\\_nn/files/pril007](http://cv.guap.ru/krasilnikov_nn/files/pril007) (дата обращения: 09.04.2017).

UDC 612.843.721

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.52

**Technology of Making Depth Maps for Still Images**Krasilnikov N. N.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, NNKrasilnikov@yandex.ruKrasilnikova O. I.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, OIKrasilnikova@yandex.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The creation of a depth map is a central element in the technology of converting a two-dimensional image into a stereoscopic one, but the companies specializing in image conversion never disclose their depth map manufacturing methods. **Purpose:** We need to develop a method of obtaining spatial coordinates of objects presented on two-dimensional images in order to use them for the development of a depth map construction technology. **Methods:** To solve the problem, we used the binocular vision laws, methods and algorithms of three-dimensional graphics, and experimental studies. **Results:** We have developed a technology of depth map production which consists of the following sequentially executed operations. First, a two-dimensional image is segmented into fragments of simple surfaces which approximate the objects of the scene and subsequently divide them into two groups. Then, the spatial coordinates of each of the approximating surfaces are determined by analyzing the original two-dimensional image. Further, proceeding from the critical value of the on-screen parallax, the optimal value is determined for the depth coordinate of the screen onto which a stereoscopic image is projected. After this, on the depth map the approximating surfaces are filled with shades of gray which are determined by the depth coordinates of the objects. It is shown that to create the effect that the depicted scene is real, it is necessary that the sizes of the projections of the objects whose depth coordinates coincide with the depth coordinate of the screen are equal to the sizes of the objects themselves, and this, as a rule, requires the use of a large screen located at a considerable distance from the viewer. This condition is satisfied in cinemas, but not when watching a 3D movie on a 3D-TV screen, which leads to the puppet-theater effect. **Practical relevance:** In the conversion of two-dimensional images and film files into a stereoscopic (3D) format, the developed technology allows you to create depth maps on the base of calculations, avoiding laborious selection of parameters.

**Keywords** — Stereoscopic Image, Depth Map.

**References**

1. Krasilnikov N. N. The Method of Generating a 3D-Image Scene Based on a Single Photograph. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 3, pp. 2–7 (In Russian).
2. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. The Method of Converting a 2D Image into a Stereoscopic 3D Image. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2014, no. 2(81), pp. 68–74 (In Russian).
3. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. Determining the Depth Coordinate from a 2D Image. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2011, no. 12(78), pp. 787–789 (In Russian).
4. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. Methods of Converting 2D Images and Videos into Stereoscopic Format. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 5(78), pp. 18–25 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.18.
5. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. *Sposob konvertatsii 2D-izobrazhenija v kvazistereoskopicheskoe 3D-izobrazhenie* [The Method of Converting a 2D Image into a Quasi-stereoscopic 3D Image]. Patent RF, no. 2600524, 2016.
6. *Pochemu ot 3D bolit golova*. Ch. 4. *Parallaks* [Why Headache from 3D. Part 4. Parallax]. Available at: <https://geektimes.ru/post/248970/> (accessed 05 January 2017).
7. Krasilnikov N. N. Effect of Viewing Distance on Spatial Depth Reproduced by a Stereoscopic Image. *Opticheskii zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2016, no. 8(83), pp. 502–507 (In Russian).
8. Krasilnikov N. N., Krasilnikova O. I. Study of Critical Values of On-Screen Parallax. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 2, pp. 19–25 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.2.19
9. *Portal dlia izbrannykh. Oculus Rift Development Kit 2* [The Portal for the Elite. Oculus Rift Development Kit 2]. Available at: <http://www.hi-fi.ru/magazine/video/portal-dlya-izbrannykh-oculus-rift-development-kit-2/> (accessed 05 January 2017).
10. *Klaustrofobiia. Prichiny, simptomy i priznaki, lechenie, profilaktika patologii* [Claustrophobic. Causes, Symptoms and Signs, Treatment, Prevention of Disease]. Available at: <http://www.polimed.com/articles-klaustrofobiia-prichiny-simptomy-i-priznaki-lechenie-profilaktika-patologii.html> (accessed 10 April 2017).
11. Konstantinov A. *Kak podvodniki vyderzhivaiut trekhmesiachnoe prebyvanie pod vodoi* [How do Submariners Survive a Three-Month Stay under Water]. Available at: <http://www.online812.ru/2010/07/29/007/> (accessed 10 April 2017).
12. *Prilozhenie k stat'e «Problemy redaktirovaniia 3D-izobrazhenii i video»* [The Appendix to the Article «Problems of Editing 3D Images and Video»]. Available at: [http://cv.guap.ru/krasilnikov\\_nn/files/pril007](http://cv.guap.ru/krasilnikov_nn/files/pril007) (accessed 09 April 2017).

УДК 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.62

## НЕЧЕТКОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ БАТАРЕЕЙ

**М. В. Бураков**<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент

**В. Ф. Шишлаков**<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** солнечная батарея является одним из основных инструментов для создания возобновляемых источников энергии. Нелинейные характеристики солнечной батареи как объекта управления требуют совершенствования алгоритмов управления для эффективной выработки энергии в условиях меняющейся внешней среды. **Цель исследования:** разработка имитационной модели солнечной батареи для синтеза и исследования нечеткого алгоритма управления точкой максимальной мощности. **Результаты:** рассмотрены варианты моделирования солнечной батареи с помощью библиотеки физического моделирования в Simscape и с помощью графического программирования в Simulink. Модели были использованы при синтезе системы управления точкой максимальной мощности солнечного модуля. Исследованы два варианта управления: алгоритм возмущения и наблюдения и нечеткое логическое управление. Показано, что нелинейный закон управления, обеспечиваемый нечетким регулятором, позволяет сократить время переходного процесса, исключив колебания выходной мощности. **Практическая значимость:** применение нечеткого управления может оказаться полезным при проектировании систем управления широким кругом объектов солнечной энергетики.

**Ключевые слова** — солнечная батарея, моделирование, метод возмущения и наблюдения, нечеткое управление.

### Введение

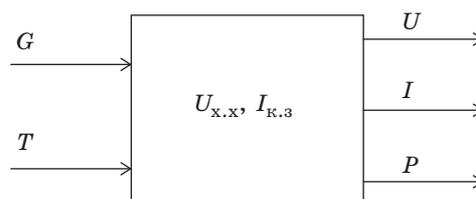
Использование возобновляемых источников электрической энергии является перспективным направлением современной энергетики [1, 2]. В рамках этого направления солнечная энергия занимает ключевые позиции в силу своей практической неисчерпаемости и доступности во всех точках поверхности Земли. Солнечная энергетика стремительно завоевывает позиции на мировом энергетическом рынке. Фотоэлектрические системы способны непосредственно преобразовывать энергию солнечной радиации в электрическую энергию без выброса вредных веществ в атмосферу. Они отличаются высокой надежностью, поскольку не имеют подвижных частей. Солнечные батареи пригодны как для выработки энергии в больших масштабах, так и для решения проблем энергообеспечения отдельных зданий, энергоснабжения автономных подвижных объектов, при создании солнечных холодильных систем и во многих других приложениях [3–5]. Вариации солнечной активности могут быть достаточно точно прогнозируемы, но главный недостаток солнечной энергетике заключается в зависимости от погодных и климатических условий. Для обеспечения стабильной выработки электроэнергии необходимо управлять работой солнечной батареи, поскольку мощность, генерируемая солнечной батареей, зависит от ее напряжения, значение которого на выходе постоянно изменяется в соответствии с освещенностью, временем суток, температурой панели. Контроллер солнечной батареи должен работать в режиме обеспечения максимальной выходной мощности

при вариациях температуры и солнечной радиации.

В настоящее время известны различные методы отслеживания точки максимальной мощности. Наиболее распространенным является метод возмущения и наблюдения [6, 7]. Перспективным для решения этой задачи является использование нечеткой логики [8, 9] и искусственных нейронных сетей [10]. В настоящей работе выполнено сравнение метода возмущения и наблюдения с алгоритмом нечеткого управления точкой максимальной мощности. При анализе методов управления используются имитационные компьютерные модели, разработанные средствами пакета MatLab.

### Математическое моделирование солнечной батареи

Фотоэлектрический элемент (ФЭ) может быть представлен в виде функционального блока, имеющего внешние, внутренние и выходные параметры (рис. 1). К внешним параметрам относят освещенность и температуру ФЭ ( $G$  и  $T$ ). К вну-



■ **Рис. 1.** Параметры ФЭ

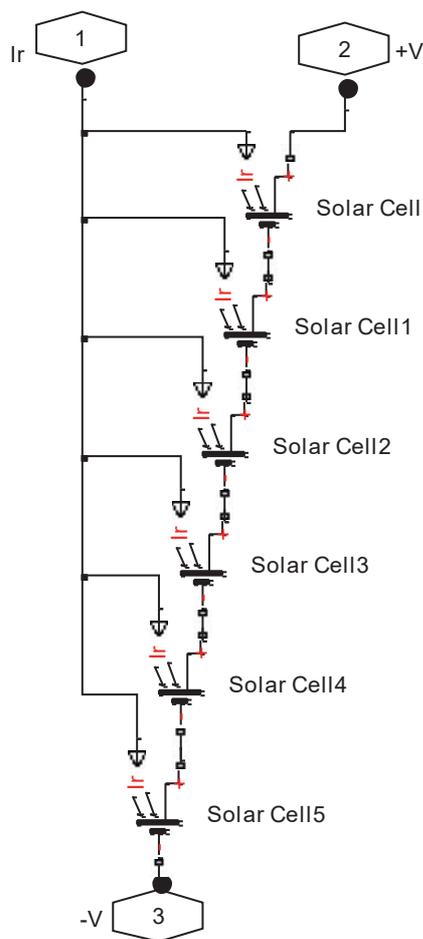
■ **Fig. 1.** Photocell parameters

тренним параметрам относят напряжение холостого хода ( $U_{x,x}$ ) и ток короткого замыкания ( $I_{к.з}$ ). Выходные параметры — выходное напряжение ( $U$ ), ток нагрузки ( $I$ ) и выходная мощность ( $P$ ).

Основной характеристикой ФЭ является вольт-амперная характеристика — зависимость между током нагрузки и напряжением при постоянных значениях температуры и интенсивности поступающего солнечного излучения.

Имитационное моделирование солнечных батарей необходимо для синтеза систем управления, позволяющих эффективно вырабатывать энергию в условиях меняющейся внешней среды. Пакет MatLab обладает широкими возможностями для моделирования систем солнечной энергетики. Решить поставленную задачу можно двумя способами: с использованием Simulink MatLab или с помощью Simscape MatLab [11, 12].

Simulink MatLab является графическим языком программирования, который позволяет представить динамическую систему в виде набора блоков, описываемых определенными математическими зависимостями. Библиотека Simscape



■ **Рис. 2.** Объединение ФЭ в Simscape  
 ■ **Fig. 2.** Combining photocells in Simscape

позволяет использовать физический язык моделирования, в котором имитационная модель объекта формируется с помощью библиотеки физических компонентов, которые взаимодействуют друг с другом путем обмена энергией через двунаправленные порты связи. Одновременное использование Simulink и Simscape позволяет выполнить верификацию имитационной модели солнечной батареи.

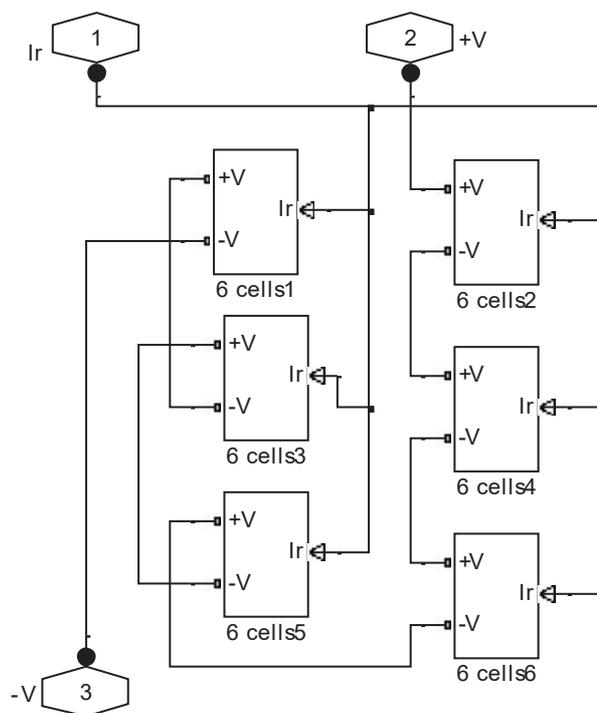
Для получения большого выходного напряжения ФЭ подключаются последовательно, а для достижения большого выходного тока ячейки соединяются параллельно. Модель ФЭ в библиотеке Simscape имеет три контакта: уровень солнечной радиации и токовые вход и выход. Последовательное соединение шести ФЭ показано на рис. 2.

Аналогично можно сформировать массив из 36 ФЭ, входящих в состав стандартного солнечного модуля (рис. 3).

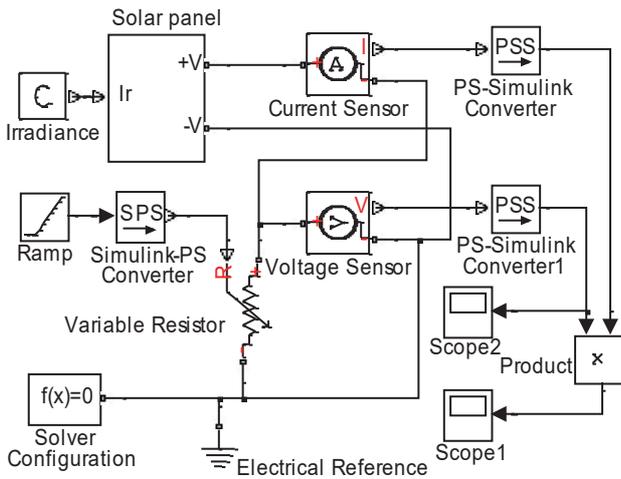
Схема исследования солнечной батареи в Simscape, с помощью которой можно получить вольт-амперную и мощностную характеристики солнечного модуля, представлена на рис. 4.

Полученные в результате вычислительного эксперимента зависимости показаны на рис. 5, а и б.

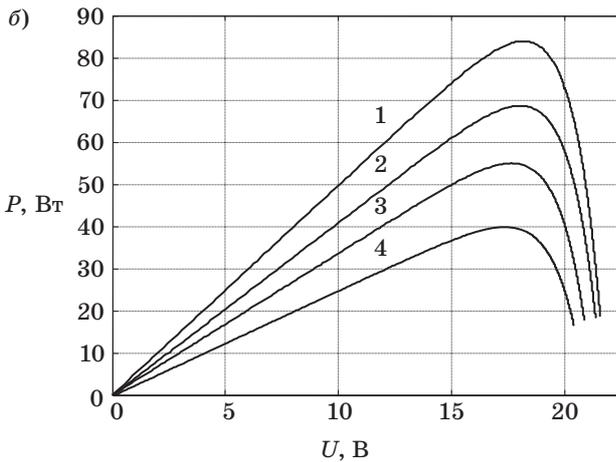
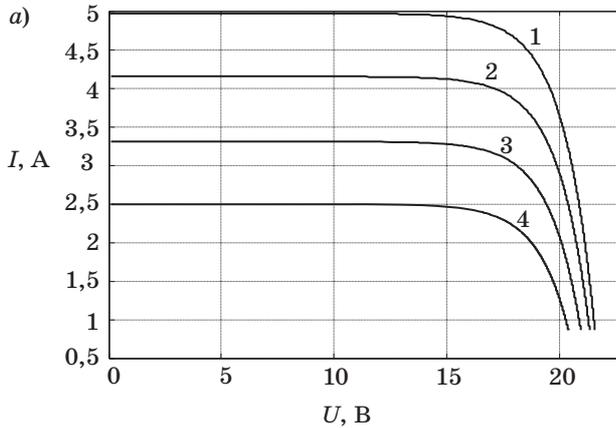
Полученные характеристики являются основными для солнечного модуля, однако могут представлять интерес также температурные зависимости, которые нельзя получить, используя мо-



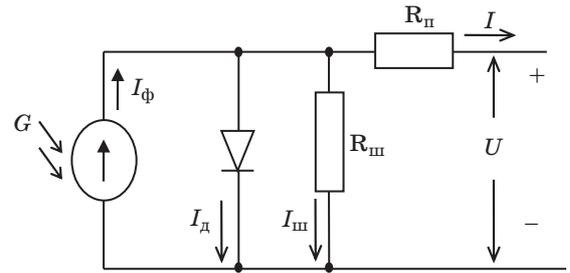
■ **Рис. 3.** Солнечный модуль  
 ■ **Fig. 3.** The solar module



■ **Рис. 4.** Блок-схема эксперимента в Simscape  
 ■ **Fig. 4.** Block diagram of the experiment in Simscape



■ **Рис. 5.** Вольт-амперная (а) и мощностная (б) характеристика солнечного модуля при различных значениях освещенности: 1 — 1200 Вт/м<sup>2</sup>; 2 — 1000 Вт/м<sup>2</sup>; 3 — 800 Вт/м<sup>2</sup>; 4 — 600 Вт/м<sup>2</sup>  
 ■ **Fig. 5.** Volt-ampere (a) and power (b) characteristic of the solar module for various values of illumination: 1 — 1200 W/m<sup>2</sup>; 2 — 1000 W/m<sup>2</sup>; 3 — 800 W/m<sup>2</sup>; 4 — 600 W/m<sup>2</sup>



■ **Рис. 6.** Электрическая схема замещения ФЭ:  $G$  — солнечное излучение;  $R_н$  и  $R_ш$  — последовательное и параллельное (шунтирующее) сопротивление (паразитные параметры ФЭ)  
 ■ **Fig. 6.** Electrical circuit of photocell replacement:  $G$  — Solar radiation;  $R_н$ ,  $R_ш$  — series and shunt resistance

дель ФЭ в Simscape. Для исследования влияния температуры на параметры солнечного модуля можно использовать язык графического моделирования, опирающийся на аналитическое описание системы.

Математическая модель ФЭ [13, 14] основана на анализе структуры, представленной на рис. 6.

В соответствии с первым законом Кирхгофа можно записать

$$I = I_{\phi} - I_d - I_{ш}, \quad (1)$$

где  $I_{\phi}$  — фототок;  $I_d$  — ток диода;  $I_{ш}$  — ток шунтирующего сопротивления.

По второму закону Кирхгофа

$$I_{ш} = \frac{U + IR_{ш}}{R_{ш}}. \quad (2)$$

Величина тока, протекающего через  $p-n$ -переход (через диод), зависит от приложенного к нему напряжения согласно формуле

$$I_d = I_0 \left( \exp \left( \frac{q(U + IR_{ш})}{AkT} \right) - 1 \right), \quad (3)$$

где  $I_0$  — обратный ток насыщения;  $q$  — заряд электрона;  $U$  — выходное напряжение;  $A$  — диодный фактор (константа идеальности);  $I$  — выходной ток;  $k$  — постоянная Больцмана;  $T$  — абсолютная температура ФЭ, К.

Величина фототока описывается формулой

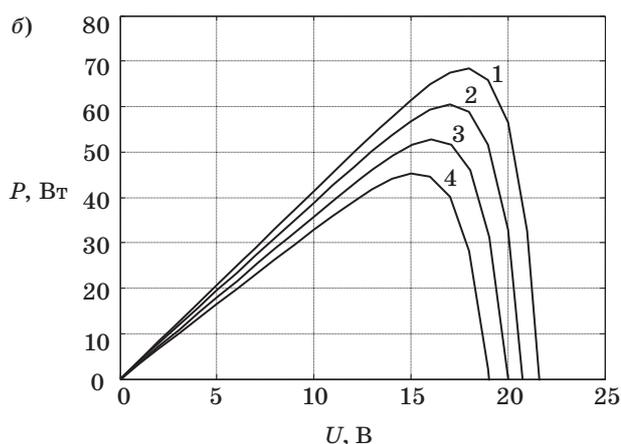
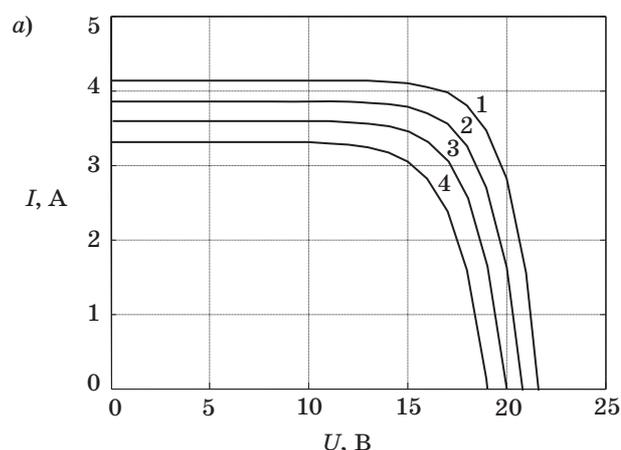
$$I_{\phi}(T_H) = \frac{G}{G_H} I_{к.э}(T_H);$$

$$I_{\phi}(T) = I_{\phi}(T_H) (1 + T_k (T_H - T)), \quad (4)$$

где  $T_H$  — номинальная температура, 25 °C;  $G$  — освещенность солнечного элемента, Вт/м<sup>2</sup>;  $G_H$  —

■ **Таблица 1.** Параметры фотоэлектрического модуля  
 ■ **Table 1.** Parameters of the photoelectric module

Параметр	Значение
Последовательное сопротивление $R_{\Pi}$	0,001 Ом
Заряд электрона $q$	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Постоянная Больцмана $k$	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Фактор идеальности диода $A$	1,6
Температурный коэффициент $T_k$	0,68 мА
Параллельное сопротивление $R_{\text{ш}}$	1 Ом
Номинальная освещенность $G_{\text{н}}$	1000 Вт/м <sup>2</sup>
Номинальная температура $T_{\text{н}}$	25 °С
Количество последовательно соединенных ячеек $N$	36



■ **Рис. 7.** Вольт-амперная характеристика (а) и изменение мощности (б) солнечной батареи при различных значениях температуры: 1 — 25 °С; 2 — 35 °С; 3 — 45 °С; 4 — 55 °С

■ **Fig. 7.** Volt-ampere characteristic (a) and change in the power (b) of a solar battery for different temperature values: 1 — 25 °С; 2 — 35 °С; 3 — 45 °С; 4 — 55 °С

номинальная освещенность, Вт/м<sup>2</sup>;  $T$  — температура окружающей среды;  $T_k$  — температурный коэффициент фототока.

Температурный коэффициент вычисляется по формуле

$$T_k = \frac{I_{\text{к.з}}(T_2) - I_{\text{к.з}}(T_1)}{T_2 - T_1}$$

Подставляя (2)–(4) в (1), получаем выражение для описания тока солнечного элемента

$$I = I_{\text{к.з}} \frac{G}{G_{\text{н}}} (1 + T_k(T - T_{\text{н}})) - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(U + IR_{\Pi})}{AkT} \right) - 1 \right) - \frac{U + IR_{\Pi}}{R_{\text{ш}}} \quad (5)$$

Можно считать, что  $R_{\text{ш}}$  стремится к бесконечности, тогда в (5) можно пренебречь последним слагаемым:

$$I = I_{\text{к.з}} \frac{G}{G_{\text{н}}} (1 + T_k(T - T_{\text{н}})) - I_0 \left( \exp \left( \frac{q(U + IR_{\Pi})}{AkT} \right) - 1 \right), \quad (6)$$

где  $I_0$  — обратный ток насыщения, описываемый формулой

$$I_0 = I_0(T_{\text{н}}) \left( \frac{T}{T_{\text{н}}} \right)^3 \exp \left( \left( \frac{qE_g}{Ak} \right) \left( \frac{1}{T_{\text{н}}} - \frac{1}{T} \right) \right), \quad (7)$$

где  $E_g$  — полоса пропускания диода.

Обратный ток насыщения при номинальной температуре рассчитывается по формуле

$$I_0(T_{\text{н}}) = \frac{I_{\text{к.з}}(T_{\text{н}})}{\exp \left( \frac{qU_{\text{х.х}}(T_{\text{н}})}{AkT_{\text{н}}} \right) - 1} \quad (8)$$

При моделировании были приняты параметры, соответствующие солнечному модулю NP65GK (табл. 1).

Формулы (1)–(8) позволяют собрать в Simulink модель солнечного модуля и выполнить вычислительные эксперименты при любых заданных условиях.

Влияние температуры на вольт-амперную и мощностную характеристики солнечной батареи исследовано на рис. 7, а и б.

Результаты моделирования показывают, что характеристики солнечного модуля существенно нелинейны и обнаруживают сильную зависимость от внешних условий — солнечной радиации и температуры окружающей среды.

**Управление точкой максимальной мощности**

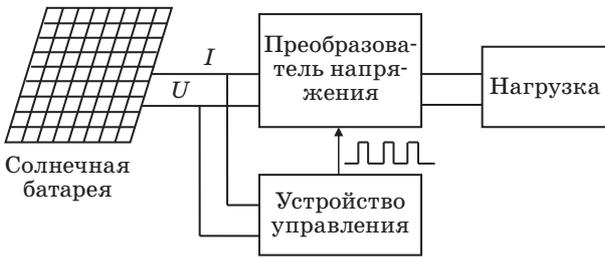
Принцип управления точкой максимальной мощности солнечной батареи иллюстрирует рис. 8.

На выходе устройства управления располагается широтно-импульсный модулятор, который изменяет скважность импульсов, поступающих на преобразователь напряжения.

Задача обеспечения максимальной мощности может решаться с помощью метода возмущения и наблюдения, который предполагает уменьшение или увеличение скважности управляющих импульсов  $D$  с последующей оценкой изменения выходной мощности [8, 9]. Если в момент времени  $k$  мощность  $P(k)$  и напряжение  $U(k)$  больше, чем в предыдущий момент времени, то  $D$  увеличивается на  $\Delta D$ , иначе уменьшается на  $\Delta D$ . Величина  $\Delta D$  подбирается экспериментально.

Закон управления можно описать с помощью правил:

- если  $\Delta P < 0$  и  $U(k) > U(k - 1)$ , то  $D(k + 1) = D(k) - \Delta D$ ;
- если  $\Delta P < 0$  и  $U(k) < U(k - 1)$ , то  $D(k + 1) = D(k) + \Delta D$ ;



■ Рис. 8. Система управления солнечной батареей  
 ■ Fig. 8. Solar battery control system

- если  $\Delta P > 0$  и  $U(k) < U(k - 1)$ , то  $D(k + 1) = D(k) - \Delta D$ ;
- если  $\Delta P > 0$  и  $U(k) > U(k - 1)$ , то  $D(k + 1) = D(k) + \Delta D$ .

Реализация алгоритма возмущения и наблюдения в MatLab представлена на рис. 9.

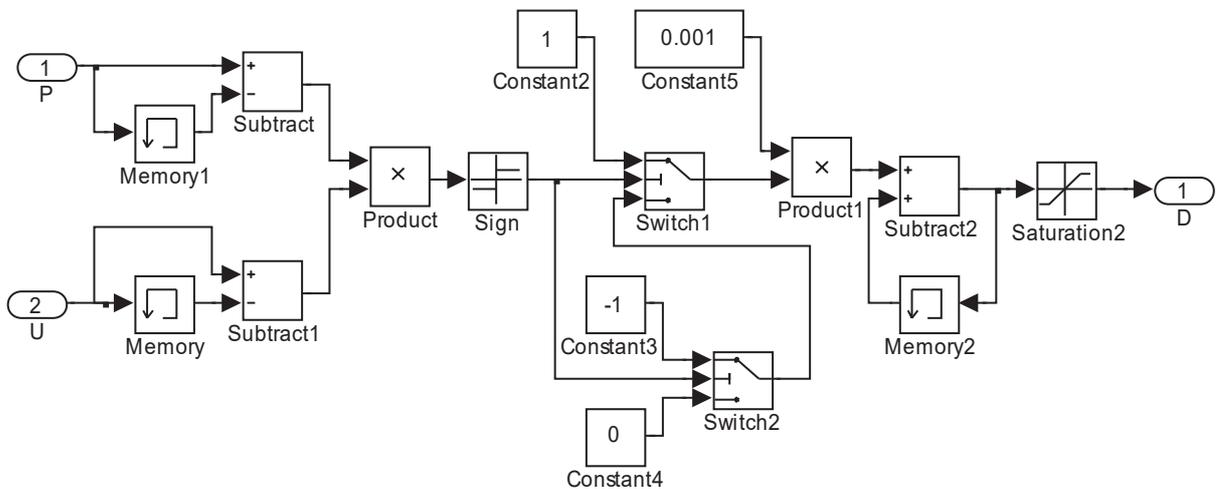
Нетрудно заметить, что метод возмущения и наблюдения является, по существу, разновидностью метода подъема по градиенту. Скважность изменяется дискретно, поэтому выбор  $\Delta D$  оказывает заметное влияние на переходные процессы. Уменьшение значения  $\Delta D$  приводит к росту длительности переходного процесса, увеличение  $\Delta D$  вызывает колебания тока и напряжения (рис. 10).

Добиться переменного шага при изменении скважности импульсов позволяет использование нелинейного закона управления, реализуемого с помощью нечеткого логического регулятора (НЛР).

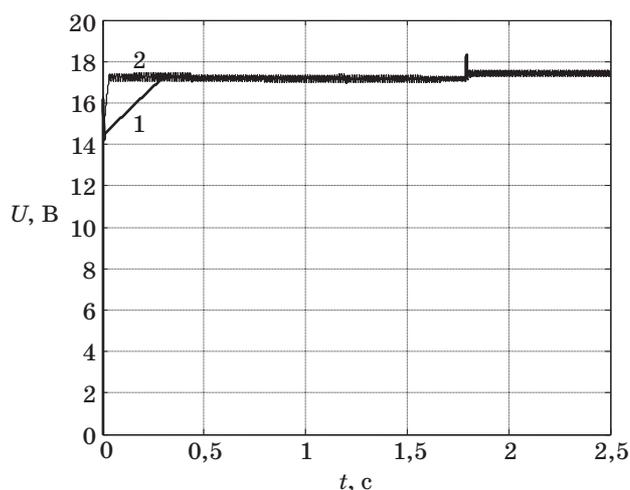
Основой нечеткого логического управления являются продукционные правила, связывающие нечеткие посылки и заключения. Для многих объектов эти правила неочевидны, и для их синтеза требуется применять процедуры обучения [15–17]. Однако в рассматриваемой задаче правила управления могут быть сформулированы эвристически.

В задаче нечеткого управления точкой максимальной мощности солнечной батареи можно выбрать такие же входные и выходные переменные, что и в методе возмущения и наблюдения: входами НЛР являются приращение напряжения  $\Delta U(k)$  и приращение мощности  $\Delta P(k)$ , а выходом — приращение скважности импульсов  $\Delta D(k)$ .

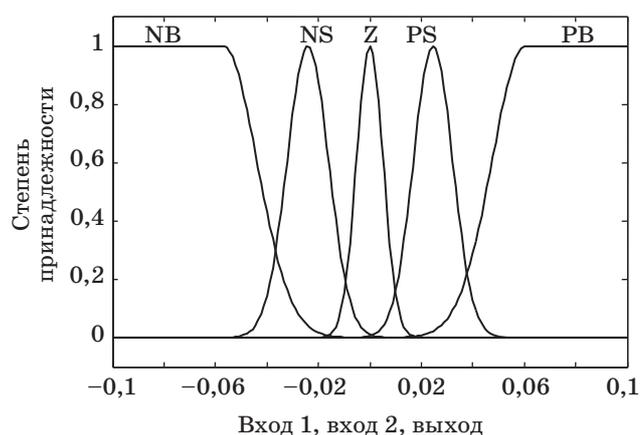
Для описания входов и выходов НЛР будем использовать лингвистические переменные с термами: {NB, NS, Z, PS, PB}, где NB — «negative



■ Рис. 9. Блок-схема алгоритма возмущения и наблюдения в Simulink MatLab  
 ■ Fig. 9. Block diagram of the perturb and observe algorithm in Simulink MatLab



■ **Рис. 10.** Изменение выходного напряжения при  $\Delta D = 0,01$  (линия 1) и  $\Delta D = 0,1$  (линия 2)  
 ■ **Fig. 10.** Change in the output voltage at  $\Delta D = 0,01$  (line 1) and at  $\Delta D = 0,1$  (line 2)



■ **Рис. 11.** Лингвистическое описание входов и выхода НЛП  
 ■ **Fig. 11.** Linguistic description of inputs and output of fuzzy logic controller

big», NS — «negative small», Z — «zero», PB — «positive big», PS — «positive small» (рис. 11).

Структура НЛП представлена на рис. 12.

При составлении управляющих правил используется принцип изменения скважности импульсов с переменным шагом: при малых изменениях мощности изменение скважности замедляется, а при больших — растет.

Например:

1. Если напряжение сильно увеличилось и мощность тоже сильно увеличилась, то следует продолжать сильно увеличивать напряжение, т. е. сильно уменьшить скважность.

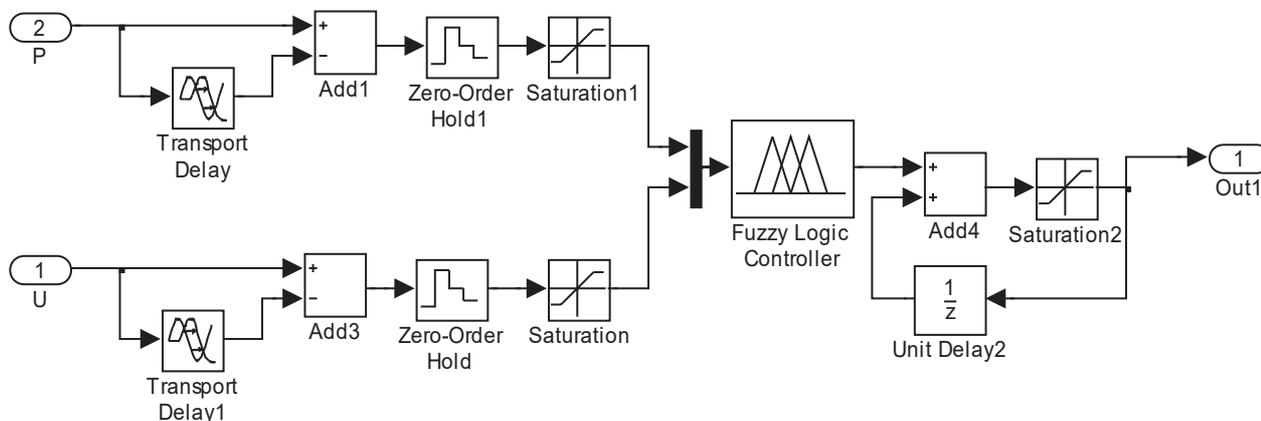
2. Если напряжение сильно увеличилось, а мощность слегка увеличилась, то следует слегка увеличивать напряжение, т. е. слегка уменьшить скважность.

Управляющие правила могут быть сведены в табл. 2.

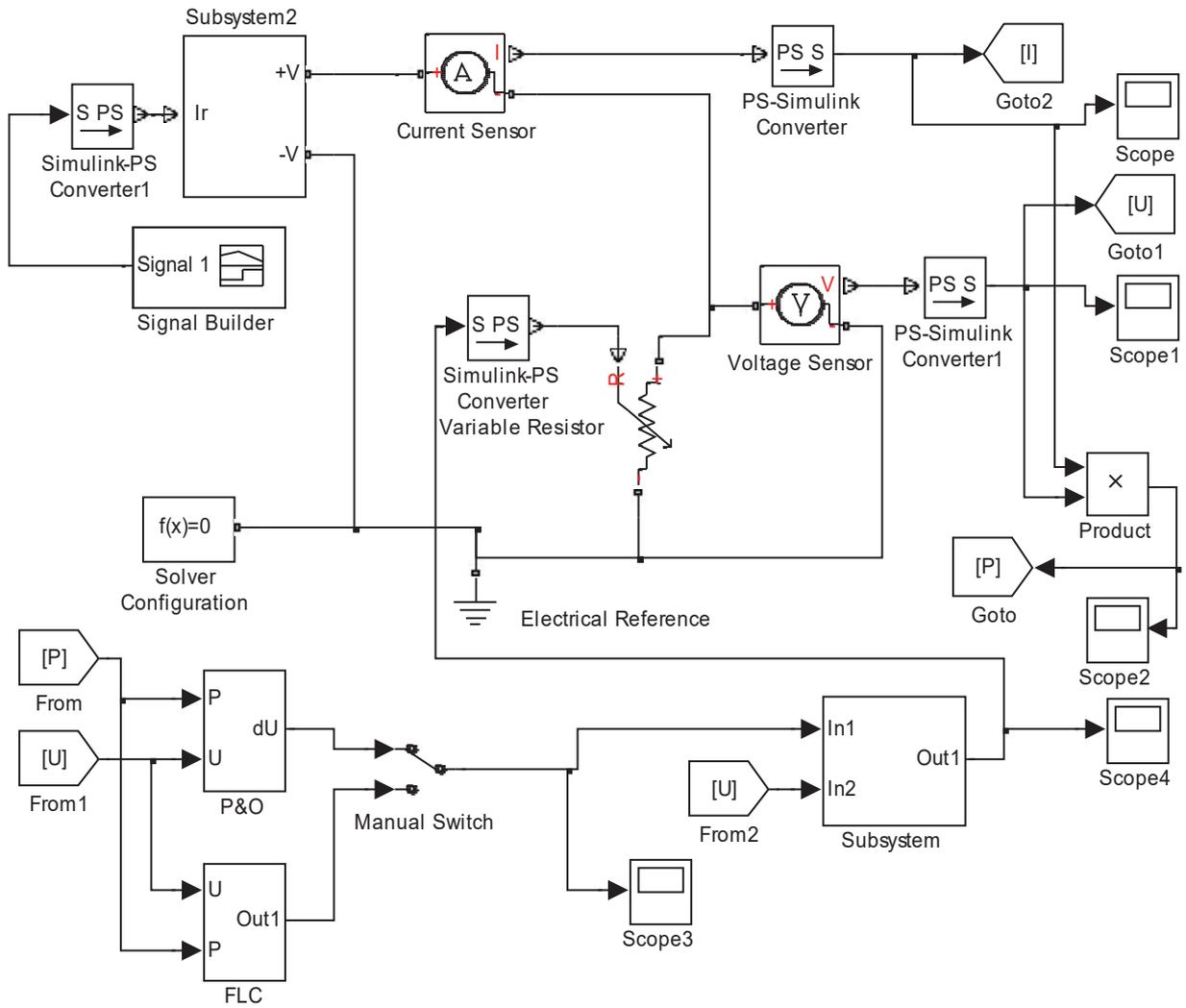
Схема сравнения алгоритмов слежения за точкой максимальной мощности представлена на рис. 13. Будем считать, что время квантования существенно выше периода широтно-импульсной модуляции, тогда преобразователь может быть представлен эквивалентным сопротивлением. Инерционность преобразователя может быть учтена введением аperiодического звена на его выходе.

■ **Таблица 2.** Управление скважностью импульсов  
 ■ **Table 2.** Pulse width control

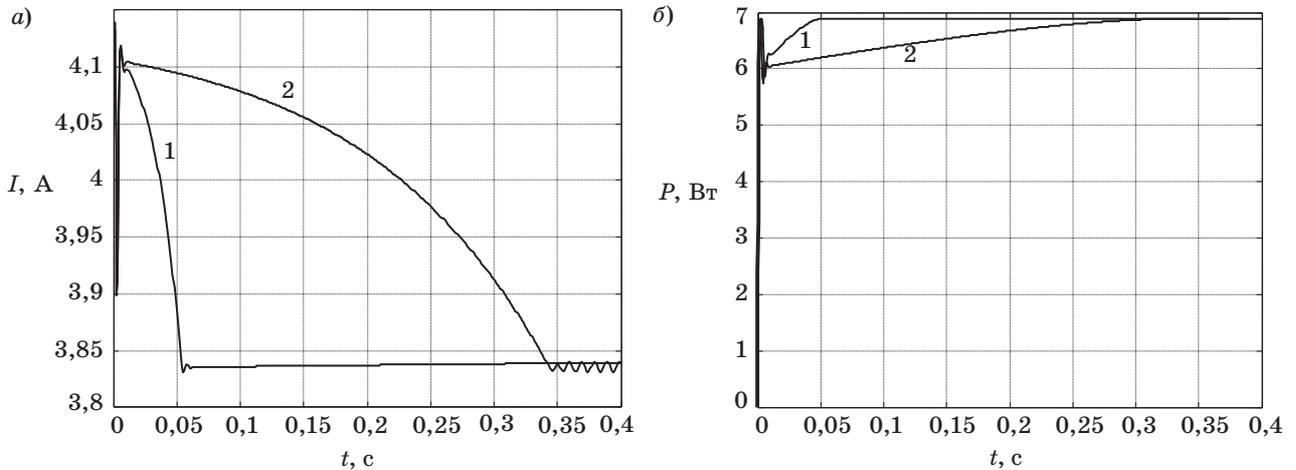
$\Delta P/\Delta U$	NB	NS	Z	PS	PB
NB	PB	PS	NS	NS	NB
NS	PS	PS	PS	NS	NS
Z	PS	PS	Z	NS	NS
PS	NS	NS	PS	PS	PB
PB	NB	NS	NS	PS	PB



■ **Рис. 12.** Блок-схема НЛП в Simulink MatLab  
 ■ **Fig. 12.** Block diagram of the fuzzy logic controller in Simulink MatLab



■ **Рис. 13.** Схема сравнения алгоритмов управления точкой максимальной мощности  
 ■ **Fig. 13.** Comparison of control algorithms for the maximum power point tracking



■ **Рис. 14.** Изменение тока нагрузки (а) и мощности (б) при управлении с помощью НЛР (линия 1) и с помощью алгоритма возмущения и наблюдения (линия 2)  
 ■ **Fig. 14.** Change of the load (a) and power (б) current during control by means of fuzzy logic controller (line 1) and with the help of the perturb and observe algorithm (line 2)

Переходные процессы при скачкообразном изменении освещенности солнечной батареи при разных вариантах реализации алгоритма управления показаны на рис. 14, а и б. Из анализа сравнения графиков видно, что использование НЛР обеспечивает значительное преимущество по сравнению с алгоритмом возмущения и наблюдения, позволяя сократить время переходного процесса, избежав при этом колебаний выходной мощности.

## Заключение

Приведенные результаты вычислительных экспериментов соответствуют техническим характеристикам солнечного модуля NP65GK, па-

раметры которого использовались при моделировании. Модель, полученная с помощью физического моделирования в Simscape, показала параметры, практически идентичные параметрам модели, собранной с помощью графического программирования Simulink. Обе модели были использованы при проектировании системы управления точкой максимальной мощности солнечного модуля. Были исследованы два варианта управления: алгоритм возмущения и наблюдения и нечеткое логическое управление. Показано, что нелинейный закон управления, обеспечиваемый НЛР, позволяет значительно улучшить качество переходных процессов. Применение нечеткого управления может оказаться полезным при проектировании систем управления широким кругом объектов солнечной энергетики.

## Литература

- Messenger R. A., Ventre J. Photovoltaic Systems Engineering. — CRC PRESS, 2004. — 435 p.
- Markvart T. Solar Electricity. — Wiley, 2000. — 280 p.
- Winter C. J., Sizmann R. L., Vant-Hull L. L. Solar Power Plants: Fundamentals, Technology, Systems, Economics. — Springer-Verlag, 1991. — 425 p.
- Garg H. P. Solar Energy: Fundamentals and Applications. — Tata McGraw-Hill Education, 2000. — 434 p.
- Kalogirou S. A. Solar Energy Engineering: Processes and Systems. — Academic Press, 2013. — 840 p.
- Ropp M. E., Hohm D. P. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms // Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 2003. Vol. 11(1). P. 47–62.
- Esrām T., Chapman P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques // IEEE Trans. Energy Convers. 2007. Vol. 22. N 2. P. 439–449.
- Cheikh M. S., Larbes C., Tchoketch G. F. Maximum Power Point Tracking using a Fuzzy Logic Control Scheme // Revue des Energies Renouvelables. 2007. Vol. 10. N 3. P. 387–395.
- Aredes M. A., França B. W., Aredes M. Fuzzy Adaptive P&O Control for MPPT of a Photovoltaic Module // Journal of Power and Energy Engineering. 2014. N 2. P. 120–129.
- Hadjab M., Berrah S., Abid H. Neural Network for Modeling Solar Panel // International Journal of Energy. 2012. Iss. 1. Vol. 6. P. 9–16.
- Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink. — М.: ДМК Пресс, 2008. — 288 с.
- Дьяконов В. П. MATLAB R2007/2008/2009 для радиоинженеров. — М.: ДМК Пресс, 2010. — 976 с.
- Васильев А. М., Ландсман А. П. Полупроводниковые фотопреобразователи. — М.: Сов. радио, 1976. — 246 с.
- Раушенбах Г. Справочник по проектированию солнечных батарей. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 360 с.
- Бураков М. В., Кирпичников А. П. Нечеткий регулятор ПИД-типа для нелинейного объекта // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 4. С. 242–244.
- Бураков М. В., Яковец О. Б. Нечеткое управление силовым гироскопическим прибором // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58. № 10. С. 157–166.
- Бураков М. В., Коновалов А. С., Яковец О. Б. Эволюционный синтез нечетких регуляторов // Информационно-управляющие системы. 2015. № 6. С. 28–33. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28

UDC 681.5

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.62

**Fuzzy Control of Solar Power Plant**Burakov M. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, bmv@sknt.ruShishlakov V. F.<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, svfmail@yandex.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** A solar battery is one of the main tools for the creation of renewable energy sources. Nonlinear characteristics of a solar battery as a control object require the improvement of control algorithms for the efficient generation of energy in a changing environment. **Purpose:** Our goal is to develop a simulation model of a solar battery for the synthesis and study of a fuzzy algorithm for the control of the maximum power point. **Results:** Some options have been considered for modeling a solar battery using a physical modeling library in Simscape, and using graphical programming in Simulink. These models were used in the synthesis of a system for the control of the maximum power point of a solar module. Two control options were studied: perturb and observe algorithm, and fuzzy logic control. It is shown that the nonlinear control law provided by the fuzzy controller allows you to reduce the time of the transient process by eliminating the oscillations of the output power. **Practical relevance:** The application of fuzzy control can be useful in the design of control systems for a wide range of solar energy facilities.

**Keywords** — Photovoltaic Module, Simulation, Perturb and Observe Method, Fuzzy Control.

**References**

- Messenger R. A., Ventre J. *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC PRESS, 2004. 435 p.
- Markvart T. *Solar Electricity*. Wiley, 2000. 280 p.
- Winter C. J., Sizmann R. L., Vant-Hull L. L. *Solar Power Plants: Fundamentals, Technology, Systems, Economics*. Springer-Verlag, 1991. 425 p.
- Garg H. P. *Solar Energy: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Education, 2000. 434 p.
- Kalogirou S. A. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Academic Press, 2013. 840 p.
- Ropp M. E., Hohm D. P. Comparative Study of Maximum Power Point Tracking Algorithms. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 2003, vol. 11(1), pp. 47–62.
- Esrām T., Chapman P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. *IEEE Trans. Energy Convers.*, 2007, vol. 22, no. 2, pp. 439–449.
- Cheikh M. S., Larbes C., Tehoketch G. F. Maximum Power Point Tracking using a Fuzzy Logic Control Scheme. *Revue des Energies Renouvelables*, 2007, vol. 10(3), pp. 387–395.
- Aredes M. A., França B. W., Aredes M. Fuzzy Adaptive P&O Control for MPPT of a Photovoltaic Module. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2014, no. 2, pp. 120–129.
- Hadjab M., Berrah S., Abid H. Neural Network for Modeling Solar Panel. *International Journal of Energy*, 2012, iss. 1, vol. 6, pp. 9–16.
- Chernykh I. V. *Modelirovanie elektrotekhnicheskikh ustroystv v Matlab, SimPowerSystems i Simulink* [Simulation of Electrical Devices in Matlab, SimPowerSystems and Simulink]. Moscow, DMK Press Publ., 2008. 288 p. (In Russian).
- Dyakonov V. P. *MATLAB R2007/2008/2009 dlia radioinzhenerov* [MATLAB R2007/2008/2009 for Radio Engineers]. Moscow, DMK Press Publ., 2010. 976 p. (In Russian).
- Vasilyev A. M., Landsman A. P. *Poluprovodnikovye fotopreobrazovateli* [Semiconductor Photovoltaics]. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1976. 246 p. (In Russian).
- Raushenbakh G. *Spravochnik po proektirovaniu solnechnykh batarei* [Guide to the Design of Solar Panels]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1983. 360 p. (In Russian).
- Burakov M. V., Kirpichnikov A. P. Fuzzy PID Controller for Nonlinear Plant. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*, 2015, vol. 18, no. 4, pp. 242–244 (In Russian).
- Burakov M. V., Yakovets O. B. Fuzzy Control of Power Gyroscopic Unit. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2015, vol. 58, no. 10, pp. 157–166 (In Russian).
- Burakov M. V., Kononov A. S., Yakovets O. B. Evolutionary Synthesis of Fuzzy Controllers. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 28–33 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.28

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСТАНЦИОННОГО ГАЗОАНАЛИЗА АТМОСФЕРЫ ЛАЗЕРНОЙ СИСТЕМОЙ НА ОСНОВЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА СВЕТА

О. А. Романовский<sup>а, б</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор

А. Я. Суханов<sup>а, в</sup>, канд. техн. наук

О. В. Харченко<sup>а</sup>, канд. физ.-мат. наук

С. В. Яковлев<sup>а, б</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент

С. А. Садовников<sup>а</sup>, аспирант

<sup>а</sup>Институт оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, РФ

<sup>б</sup>Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, РФ

<sup>в</sup>Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, Томск, РФ

**Введение:** лидары дифференциального поглощения и устройства на основе метода дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии являются устоявшимися технологиями экологического мониторинга и успешно используются для газоанализа атмосферы. В лидарных газоаналитических устройствах дифференциального поглощения в качестве источников излучения традиционно применяются высокоомощные газовые лазеры с дискретным набором длин волн с шириной линий излучения до  $0,01 \text{ см}^{-1}$  и генераторы гармоник, расширяющие рабочие спектральные диапазоны систем. При этом одновременный спектрально-временной анализ многочастотного отклика атмосферы в принципе не возможен из-за необходимости перестройки частоты излучения, ввиду чего контролю концентраций в режиме реального времени поддается жестко ограниченное количество компонент атмосферы. В свою очередь, в активных системах дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии применяются тепловые источники излучения с шириной спектра излучения сотни нанометров, что обеспечивает возможность проведения многокомпонентного спектрально-разрешенного газоанализа атмосферы интегрально по трассе зондирования с использованием зеркальных отражателей. **Цель исследования:** апробация разработанной методики лидарного зондирования малых газовых составляющих атмосферы, совмещающей преимущества методов дифференциального поглощения и дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии. **Результаты:** проведены численные эксперименты для оценки возможностей дистанционного газоанализа атмосферы с помощью лазерной системы с параметрической генерацией света на основе нелинейного кристалла  $\text{KTiOAsO}_4$  в диапазоне спектра 3–4 мкм. С помощью разработанной методики лидарного зондирования компонент атмосферы проведен поиск и отбор информативных для газоанализа длин волн. Проведено моделирование лидарных сигналов, анализ которых показал возможность дистанционного контроля  $\text{HCN}$  и  $\text{C}_2\text{H}_6$  на горизонтальных трассах длиной 1 км.

**Ключевые слова** — атмосфера, лидарное зондирование, лидар дифференциального поглощения, дифференциальная оптическая абсорбционная спектроскопия, газовые составляющие атмосферы, нелинейные кристаллы.

## Введение

Развитие лазерных бесконтактных методов диагностики среды (атмосферы, океана) требует разработки лазерных источников излучения, способных генерировать излучение в определенном диапазоне длин волн с малым шагом перестройки по частоте. Современные лидары дифференциального поглощения, как правило, позволяют контролировать лишь несколько газовых компонент атмосферы. Используемые в их составе мощные источники излучения, такие как  $\text{CO}_2$ , DF (HF) лазеры, имеют ограниченное число спектральных совпадений линий излучения и линий поглощения атмосферных газов [1].

Современные источники лазерного излучения для решения задач лидарного зондирования базируются на использовании широкодиапазонных ИК молекулярных лазеров, а также параметрических преобразователей частоты на основе нелинейных кристаллов, позволяющих путем ге-

нерации обертонов, гармоник, суммарных и разностных частот излучения лазеров перекрыть спектральный диапазон от 2 до 18 мкм. Для перекрытия ближней и средней ИК-областей используется излучение параметрических генераторов света (ПГС) на нелинейных кристаллах [1, 2].

Наземные [3] и самолетные [4] измерения по методу дифференциального поглощения (МДП) использовались для получения вертикальных профилей озона в тропосфере и стратосфере [5, 6], тропосферного водяного пара [7], для картирования сильного загрязнения приземного слоя этаном и  $\text{NO}_2$ , определения горизонтального распределения  $\text{NO}_2$  в выбросах дизельного двигателя [8]. Также МДП может быть использован в лидарном зондировании метеорологических параметров атмосферы [9–12].

Однако в стандартном МДП должно выполняться требование монохроматичности лазерного излучения. Широкий спектральный профиль лазерного излучения уменьшает эффективный

коэффициент поглощения, что снижает чувствительность измерений. Наличие аэрозоля в больших количествах также ведет к существенным ошибкам МДП. Наконец, проблема стандартных измерений МДП, использующих только две длины волны, означает, что наличие мешающего поглощения сторонними газами не учитывается, что приводит к ошибкам, вызванным неточностью априорного знания коэффициентов поглощения.

Этих недостатков можно избежать благодаря методу дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) [13–15]. ДОАС позволяет проводить спектрально разрешенные измерения в широкой полосе, что обеспечивает идентификацию нескольких газов даже в случае перекрывания полос поглощения. Еще одним преимуществом метода является независимость от аэрозольного и молекулярного рассеяния благодаря технике фильтрации высоких частот, используемой для получения спектров. Однако возможности метода ДОАС для получения вертикальных профилей ограничены, в настоящее время проведены только усредненные по трассе измерения.

Перспективным путем решения проблемы является методика, сочетающая преимущества обоих методов: пространственного разрешения МДП и идентификацию газов ДОАС. Новый метод использует широкополосное излучение и спектрометр с ПЗС-детектором, что обеспечивает измерение сигналов обратно рассеянного излучения с разрешением как по высоте, так и по длине волны одновременно.

Целью работы является апробация методики лидарного зондирования малых газовых составляющих (МГС) атмосферы, совмещающей МДП и ДОАС в численном эксперименте для оценки возможностей дистанционного газоанализа состава атмосферы с помощью лазерной системы на основе ПГС в диапазоне спектра 3–4 мкм.

### Методика лидарного зондирования МГС атмосферы с помощью МДП и ДОАС

Основной принцип действия лидара дифференциального поглощения заключается в том, что часть обратно рассеянного лазерного излучения преобразуется молекулами и аэрозольными частицами при прохождении через атмосферу. Лазерный пучок ослабляется (в соответствии с законом Ламберта — Бера) молекулярным поглощением и молекулярным и аэрозольным рассеянием. Таким образом, сигнал, зарегистрированный детектором, является функцией этого ослабления, доли обратно рассеянных фотонов,

длины пути и мощности лазерного излучения. Сигнал  $P_R$  из рассеивающего слоя толщиной  $\Delta z$  можно представить в виде

$$P_R(z, \lambda) = P_0(\lambda) \frac{A_D}{z^2} \eta(\lambda) O(z) \Delta z \beta(z, \lambda) e^{-2\tau(z, \lambda)}, \quad (1)$$

где  $P_0(\lambda)$  — мощность лазерного излучения;  $A_D$  — площадь приемного телескопа;  $\eta(\lambda)$  — эффективность приемо-передающей системы;  $O(z)$  — область перекрытия между лазерным лучом и полем зрения приемника;  $\Delta z$  — пространственное разрешение по трассе зондирования;  $\beta(z, \lambda)$  — объемный коэффициент обратно рассеянного излучения;  $\tau(z, \lambda)$  — объемный коэффициент ослабления.

Метод дифференциального поглощения заключается в определении концентрации атмосферного газа по разнице лидарных сигналов на длинах волн  $\lambda_{on}$  и  $\lambda_{off}$  с разным молекулярным поглощением. Концентрация исследуемого газа определяется следующим образом:

$$n(z) = \frac{1}{2\Delta\sigma_{abs}\Delta z} \ln \left( \frac{P_R(z, \lambda_{on})P_R(z + \Delta z, \lambda_{off})}{P_R(z, \lambda_{off})P_R(z + \Delta z, \lambda_{on})} \right), \quad (2)$$

где  $\Delta\sigma_{abs}$  — сечение поглощения.

Это выражение справедливо только в случае, если мешающее поглощение другими газами мало и рассеивающие свойства аэрозольных частиц не изменяются в диапазонах  $\Delta\lambda$  и  $\Delta z$ .

Недостатки МДП обусловлены неточностью априорного знания коэффициентов поглощения на двух и более длинах волн. Метод ДОАС позволяет избежать их посредством проведения мониторинга пропускания атмосферы с использованием широкополосных источников излучения с полушириной на полувысоте от единиц до сотен нанометров. Молекулярное поглощение (шириной порядка нескольких нанометров) в ДОАС отделяется от рассеяния по закону Ламберта — Бера, которое слабо зависит от длины волны и может быть удалено с помощью высокочастотного фильтра. Кроме того, путем подбора (например, методом наименьших квадратов) рассчитанного молекулярного поглощения к наблюдаемому возможно одновременное измерение нескольких поглощающих газов. Измерение поглощения той или иной газовой составляющей на большом количестве длин волн позволяет решить проблему применения априорной информации, вносящей искажения в результаты экспериментальных исследований содержания газов в атмосфере.

В случае проведения МДП–ДОАС-измерений в первую очередь необходимо найти отношение наблюдаемого спектра ( $P_{obs}$ ) к референтному ( $P_{ref}$ ), которое определяется из спектра лазерного источника ( $P_0$ ), полученного одним и тем же детектором. В качестве  $P_{ref}$  возможно использова-

ние спектра пропускания атмосферы при известном содержании поглощающих газов. Рассчитав отношение ( $P_{\text{obs}}/P_{\text{ref}}$ ) и проведя минимизацию выражения (3) путем подгонки переменных коэффициентов, можно вычислить значения концентраций газов, входящих в диапазон зондирования:

$$\left(\frac{P_{\text{obs}}(v_j, z_i)}{P_{\text{ref}}(v_j, z_i)}\right) = \exp\left(-2\Delta z \sum_{k=0}^j \alpha_{j,k} + \ln(\beta_{j,k})\right) \times \int_{v-\Delta v/2}^{v+\Delta v/2} f(v, v_j) \times \exp\left(-\Delta z \sum_{k=0}^{i-1} \sum_g^{N_{\text{gases}}} (\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g + \alpha_{\text{ma}}(v, z_{k+1})_g)\right) dv; \quad (3)$$

$$\alpha_{j,k} = \alpha(v_j, z_k);$$

$$\beta_{j,k} = \beta(v_j, z_i);$$

$$\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g = n_g(z_k)K_g(v, z_k),$$

где  $\Delta v$  — разрешающая способность приемника;  $f(v, v_j)$  — аппаратная функция приемника на частоте  $v_j$ ;  $N_{\text{gases}}$  — число учитываемых газов;  $\alpha(v_j, z_k)$  — коэффициент ослабления анализируемой среды;  $\beta(v_j, z_i)$  — коэффициент обратного рассеяния, включающий молекулярное и аэрозольное рассеяние в направлении назад;  $\alpha_{\text{ma}}(v, z_k)_g$  — профиль объемного коэффициента ослабления лазерного излучения за счет молекулярного поглощения;  $n_g(z_k)$  — концентрация газовой компоненты;  $K_g(v, z_k)$  — коэффициент поглощения соответствующего газа.

Отношение ( $P_{\text{obs}}/P_{\text{ref}}$ ) не зависит от спектра излучения лазерного источника или спектральной зависимости принимающей оптики, спектрографа, приемника, что является важным преимуществом МДП–ДОАС-методики. Измеряемая таким образом величина составляет разницу содержания поглощающих газов в референтном случае и в случае реальной атмосферы.

Незначительно изменяющееся рассеяние  $\beta(v)$  чаще всего удаляется с помощью фильтра высоких частот. Для этого используются различные методы, но самый простой — применение полинома второго или третьего порядка, который подгоняется к разнице в оптической толщине, а затем удаляется, оставляя так называемый дифференциальный спектр или дифференциальную оптическую толщину. Необходимо отметить, что именно этот процесс фильтрации позволяет МДП–ДОАС нивелировать проблемы ослабления неизвестным или некорректно учитываемым рассеянием (аэрозольным или рэлеевским), присутствующим МДП.

Как правило, дифференциальный спектр восстанавливается по нескольким сотням точек, при этом число параметров подгонки составляет не

более шести. Таким образом, уравнение (3) становится переопределенным и успешно решается методом наименьших квадратов. В свою очередь, коэффициенты подгонки варьируются для получения наилучшего совпадения спектра подгонки и наблюдаемого спектра. В общем случае разрешение метода соответствует молекулярному поглощению, при котором выполняется закон Ламберта. В этом случае если известны коэффициенты поглощения, можно определить концентрацию каждого газа. Важным преимуществом МДП–ДОАС по сравнению с МДП является возможность одновременного определения концентраций нескольких газов.

Для обеспечения практического функционирования систем указанного типа предлагается методика планирования и проведения лидарных МДП–ДОАС-измерений (рис. 1), которую можно представить в виде трех частей: 1) поисковой; 2) расчетной; 3) блока обработки экспериментальных результатов лидарного зондирования.

Известно, что выражение для минимально обнаружимых концентраций в экспериментах с использованием дифференциального поглощения при лидарном зондировании имеет следующий вид [16]:

$$N(z) = \frac{\ln P(v_{\text{on}}, z) - \ln P(v_{\text{off}}, z)}{2\Delta K(v)z}, \quad (4)$$

где  $P(v_{\text{on}}, z)$  и  $P(v_{\text{off}}, z)$  — сигналы, регистрируемые фотоприемником с трассы зондирования длиной  $z$  на частотах  $v_{\text{on}}$  и  $v_{\text{off}}$ , расположенные в узком спектральном диапазоне линии поглощения исследуемого газа и в соседнем окне прозрачности;  $\Delta K(v)$  — дифференциальный коэффициент поглощения:

$$\Delta K(v) = K(v_{\text{on}}) - K(v_{\text{off}}), \quad (5)$$

где  $K(v_{\text{on}})$  и  $K(v_{\text{off}})$  — коэффициенты поглощения в линии и вне линии поглощения.

Для большинства реальных устройств регистрации и цифровой обработки, применяемых в экспериментах, значение разности логарифмов в выражении (4) должно удовлетворять условию [16]

$$\ln P(v_{\text{on}}, z) - \ln P(v_{\text{off}}, z) \approx 0,02. \quad (6)$$

С учетом выражения (6) значения минимальных интенсивностей линий поглощения можно определить путем моделирования и сравнения спектров пропускания атмосферы анализируемой газовой компоненты и мешающих составляющих с концентрациями, соответствующими предельно допустимым концентрациям для трассы длиной 10 км [12].



■ **Рис. 1.** Схема методики планирования и проведения лидарных МДП–ДОАС-измерений  
 ■ **Fig. 1.** Scheme of planning technique and DIAL–DOAS lidar measurements

Необходимо отметить, что в случае реализации МДП–ДОАС-систем оптимальные интенсивности линий и полос поглощения выбираются исходя из характеристик приемного устройства лидара. Минимальная интенсивность линий поглощения должна соответствовать временному разрешению фотоприемного прибора, величине его суммарных шумов, а также концентрациям исследуемых газовых компонент. Данные критерии определяются спецификой метода, сущность которого заключается в извлечении информации о концентрациях газовых компонент атмосферы посредством нахождения отношения мощностей двух сигналов — опорного (или референтного) и сигнального.

В качестве входных данных выступают параметры трассы зондирования, тип трассы (горизонтальная, вертикальная или наклонная), характеристики источника излучения (ширина линии излучения, мощность) и приемной аппаратуры (спектральное и пространственное разрешение детектируемых сигналов).

Поисковый блок основывается на использовании базы спектроскопических данных [17], метеомоделей [18], априорной информации

о коэффициентах аэрозольного ослабления, обратного рассеяния [19] и молекулярного рассеяния [20].

Расчетная часть алгоритма необходима для решения следующих задач:

- расчета коэффициентов поглощения и спектров пропускания атмосферы методом «line-by-line»;
- моделирования лазерного зондирования с применением статистических моделей распределения атмосферных характеристик;
- моделирования систематических и случайных погрешностей восстановления газовых профилей;
- выработки требований к параметрам лидара.

Результаты моделирования и поиска информативных пар длин волн для МДП и диапазонов длин волн для МДП–ДОАС-методик формируются в табличной и графической формах.

Методика применима для реализации систем как с традиционным функционалом МДП- и ДОАС-подходов по отдельности, так и для перспективного объединенного МДП–ДОАС-подхода с применением одной и той же аппаратуры.

### Лазерная система с ПГС для дистанционного зондирования атмосферы

В работе рассматривается лазерная система, входящая в состав разработанного лидара дифференциального поглощения и обеспечивающая перестраиваемую генерацию наносекундных импульсов излучения в спектральном диапазоне 3–4 мкм.

Лазерная система включает:

- Nd:YAG импульсный лазер LQ529B;
- преобразователь излучения с перестройкой длины волны 3–4 мкм;
- шаговые двигатели для управления длиной волны;
- контроллер для управления шаговыми двигателями;
- спектрометр S100;
- общее основание для лазера и преобразователя с системой заводки излучения накачки в преобразователь.

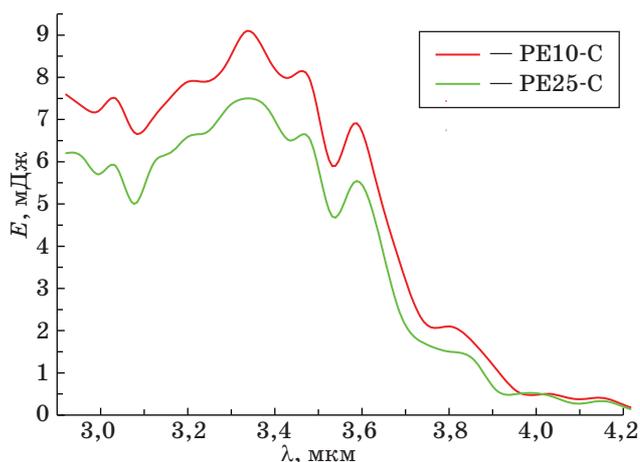
Основные характеристики лазера накачки и преобразователя излучения представлены в табл. 1 и 2.

■ Таблица 1. Спецификация лазера накачки LQ529B  
 ■ Table 1. Specification of LQ529B pumping laser

Параметр	Значение параметра
Частота следования импульсов	10 Гц
Выходная энергия на 1064 нм	350 мДж
Длительность импульса на 1064 нм, FWHM	10–13 нс
Диаметр луча на 1064 нм	≤6 мм
Расходимость на 1064 нм	~1,5 мрад
Стабильность энергии импульсов на 1064 нм	±2,5 %

■ Таблица 2. Спецификация преобразователя  
 ■ Table 2. Specification of radiation converter

Параметр	Значение параметра
Диапазон перестройки длины волны	3–4 мкм
Ширина линии излучения	1–5 см <sup>-1</sup>
Энергия в импульсе, в максимуме перестроечной кривой	7–9 мДж
Частота следования импульсов	10 Гц
Расходимость излучения	≤2 мрад
Управление перестройкой длины волны	От трех шаговых двигателей



■ Рис. 2. Перестроечные кривые ПГС на кристалле КТА в спектральном диапазоне 3–4 мкм  
 ■ Fig. 2. Tuning curve of the KTA crystal based optical parametric oscillator (OPO) in spectral range 3–4 μm

На рис. 2 представлена перестроечная кривая параметрического генератора света на кристалле КТiOAsO<sub>4</sub> (КТА), полученная с использованием различных измерителей мощности (Ophir PE10-C и PE25-C). Видно, что в диапазоне длин волн 3–4 мкм ПГС на кристалле КТА имеет довольно высокую энергию в импульсе на выходе системы, несмотря на генерацию излучения без продувки резонатора лазера азотом (в максимуме перестроечной кривой ее значения достигают 7–9 мДж).

Разработанная МДП–ДОАС-методика измерений МГС была апробирована для оценки уровня лидарных сигналов с использованием характеристик описанной выше лазерной системы с ПГС на основе нелинейного кристалла КТА. На основе характеристик лазера проведена оценка возможностей зондирования некоторых газовых примесей атмосферы на приземных трассах в исследуемой области спектра.

### Результаты моделирования лидарных измерений МГС атмосферы в диапазоне 3–4 мкм

Проведено численное моделирование зондирования некоторых газовых составляющих в атмосфере на приземных горизонтальных тропосферных трассах. При моделировании использовалась стандартная модель атмосферы лета средних широт [19]. Учитывалось мешающее поглощение всех основных атмосферных газовых компонент. Входные данные для проведения численного моделирования представлены в табл. 3.

В табл. 4 приведены информативные длины волн, пригодные для зондирования исследуемых в работе малых газовых составляющих атмосферы.

- **Таблица 3.** Входные данные для проведения численного моделирования лазерного зондирования
- **Table 3.** Input data for numerical simulation of laser sounding

Параметр лидарной системы	Значение параметра
Площадь приемника $A_{\text{приемн}} (D = 0,3 \text{ м})$	$7 \times 10^{-8} \text{ км}^2$
Ширина аппаратной функции	0,1; 1,5 $\text{см}^{-1}$
Эффективность приемной системы	0,3
Пространственное разрешение $\Delta R$	0,2 и 1 км
Максимальная энергия в импульсе	5 мДж
Частота следования импульсов	10 Гц
Длительность импульса	10 нс
Расходимость излучения	2 мрад
Диапазон перестройки лазера	2,9–4 мкм
NEP фотодетектора	$1 \times 10^{-12} \text{ Вт}$

ры с использованием методики МДП–ДОАС для ширины аппаратной функции, равной  $1,5 \text{ см}^{-1}$ .

Необходимо отметить, что конструкция лазерной системы предусматривает возможность сужения линии лазерного излучения в широких пределах. Таким образом, в табл. 5 приведены информативные длины волн, пригодные для зондирования исследуемых в работе МГС атмосферы с использованием методики МДП–ДОАС для ширины аппаратной функции, равной  $0,1 \text{ см}^{-1}$ .

На рис. 3 приведены рассчитанные для горизонтальной тропосферной трассы пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы для HCN и  $\text{C}_2\text{H}_6$  в области информативных длин волн МГС атмосферы, представленных в табл. 4.

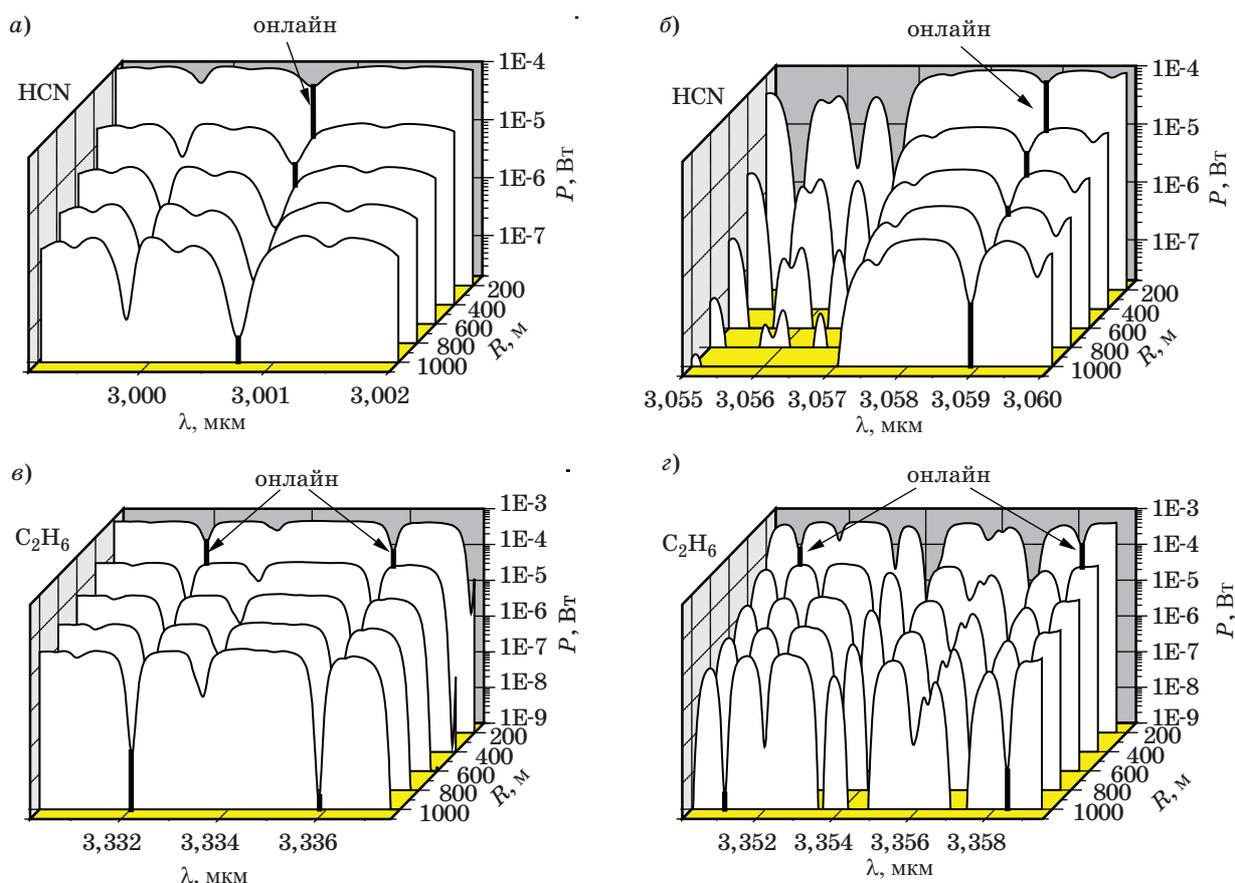
Из рисунков видно, что в рассматриваемых диапазонах длин горизонтальных трасс 0–1 км уровень лидарных сигналов существенно превышает уровень эквивалентной мощности шума фотоприемника  $\text{NEP} = 10^{-12} \text{ Вт}$ .

- **Таблица 4.** Длины волн, пригодные для зондирования HBr и HCl ( $\Delta R = 1 \text{ км}$ )
- **Table 4.** Informative wavelengths chosen for sounding HBr and HCl ( $\Delta R = 1 \text{ km}$ )

$\lambda_{\text{погл}}$ , мкм (в воздухе)		$\nu_{\text{погл}}$ , $\text{см}^{-1}$ (в воздухе)		$T_{\text{газа}}$		$T_{\text{менш. погл}}$	
онлайн	офлайн	онлайн	офлайн	онлайн	офлайн	онлайн	офлайн
<b>HBr</b>							
3,95946	3,96183	2525,599	2524,088	0,86	0,98	0,99	0,99
3,98725	3,98964	2507,994	2506,493	0,85	0,98	0,99	0,99
4,01615	4,01376	2489,948	2491,429	0,85	0,98	0,99	0,99
4,04617	4,04860	2471,473	2469,993	0,86	0,99	0,99	0,99
4,07744	4,07497	2452,577	2454,008	0,89	0,98	0,99	0,99
<b>HCl</b>							
3,48945	3,49431	2865,778	2861,797	0,70	0,97	0,89	0,98
3,51558	3,51778	2844,482	2842,702	0,66	0,85	0,92	0,93
3,54298	3,54155	2822,486	2822,800	0,64	0,84	0,87	0,90
3,57193	3,57038	2799,609	2800,819	0,68	0,85	0,92	0,92

- **Таблица 5.** Длины волн, пригодные для зондирования HCN и  $\text{C}_2\text{H}_6$  ( $\Delta R = 0,2 \text{ км}$ )
- **Table 5.** Informative wavelengths chosen for sounding HCN and  $\text{C}_2\text{H}_6$  ( $\Delta R = 0,2 \text{ km}$ )

$\lambda_{\text{погл}}$ , мкм (в воздухе)		$\nu_{\text{погл}}$ , $\text{см}^{-1}$ (в воздухе)		$T_{\text{газа}}$		$T_{\text{менш. погл}}$	
онлайн	офлайн	онлайн	офлайн	онлайн	офлайн	онлайн	офлайн
<b>HCN</b>							
3,05977	3,05998	3268,214	3267,994	0,72	0,89	0,96	0,96
3,00158	3,00144	3331,574	3331,724	0,62	0,79	0,97	0,96
<b><math>\text{C}_2\text{H}_6</math></b>							
3,33202	3,33228	3001,177	3000,947	0,50	0,93	0,98	0,99
3,33583	3,33560	2997,746	2998,027	0,37	0,86	0,97	0,98
3,36029	3,36108	2975,934	2975,234	0,45	0,92	0,95	0,96
3,35832	3,35852	2977,671	2977,501	0,45	0,79	0,95	0,95



**Рис. 3.** Пространственно и спектрально разрешенные лидарные сигналы горизонтального зондирования HCN (а, б) и  $C_2H_6$  (в, г) в области работы ПГС на основе кристалла КТА (ширина аппаратной функции  $0,1 \text{ cm}^{-1}$ )  
**Fig. 3.** Spatially and spectrally resolved lidar signals of HCN (a, б) and  $C_2H_6$  (в, г) horizontal sounding in the region of KTA-based OPO operation (instrumental function width is  $0,1 \text{ cm}^{-1}$ )

Результаты численного моделирования показывают возможность восстановления лидарного сигнала на горизонтальных трассах 1 км при зондировании излучением ПГС на кристалле КТА в диапазоне 3–4 мкм паров HCN и  $C_2H_6$ .

## Заключение

Применение разработанной методики лидарного зондирования МГС атмосферы, совмещающей МДП и ДОАС, и ее апробация в численном эксперименте подтверждают перспективность использования выбранных информативных длин волн для лидарного зондирования газового состава атмосферы с помощью лазерной системы на основе ПГС в диапазоне спектра 3–4 мкм. Проведенное численное моделирование показывает, что лазер с ПГС на основе нелинейного кристалла КТА является перспективным источником излучения для дистанционного зондирования с использованием методики МДП–ДОАС рассматриваемых в работе МГС атмосферы на приземных тропосферных трассах. Причем кон-

струкция лазерной системы предусматривает возможность сужения линии лазерного излучения в пределах  $0,01\text{--}0,05 \text{ cm}^{-1}$ . Возможность такой модернизации, наряду с малым шагом перестройки линии лазерного излучения и наличием в рассматриваемом спектральном диапазоне линий поглощения других газовых составляющих и, в частности, атмосферных загрязнителей, делает рассматриваемый лазерный источник уникальным прибором для создания лидара дифференциального поглощения наземного базирования.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 16-45-700722 в части проведения численного моделирования лидарных измерений МГС атмосферы), финансовой поддержке гранта Президента РФ для поддержки молодых российских ученых (грант № МК-1367.2017.5 в части разработки и апробации методики лидарных МДП–ДОАС-измерений малых газовых составляющих атмосферы) и финансовой поддержке гранта Президента РФ по поддержке ведущих научных школ НШ-8199.2016.5.

## Литература

1. Васильев Б. И., Маннун У. М. ИК-лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды // Квант. электроника. 2006. Т. 36. № 9. С. 801–820.
2. Mitev V., Babichenko S., Bennes J., Borelli R., Dolfi-Bouteyre A., Fiorani L., Hespel L., Huet T., Palucci A., Pistilli M., Puiu A., Rebane O., Sobolev I. Mid-IR DIAL for High-Resolution Mapping of Explosive Precursors // Proc. SPIE. 2013. Vol. 8894. P. 88940S–88940S-13. doi:10.1117/12.2028374
3. Sunesson J. A., Apituley A., Swart D. P. J. Differential Absorption Lidar System for Routine Monitoring of Tropospheric Ozone // Applied Optics. 1994. Vol. 33. N 30. P. 7045–7058. doi:10.1364/AO.33.007045
4. Browell E. V. Differential Absorption Lidar Sensing of Ozone // Proc. of the IEEE. 1989. Vol. 77. N 3. P. 419–432. doi:10.1109/5.24128
5. McGee T. J., Gross M., Singh U. N., Butler J. J., Kimvilakani P. E. Improved Stratospheric Ozone Lidar // Optical Engineering. 1995. Vol. 34. N 5. P. 1421–1430. doi:10.1117/12.199883
6. Бурлаков В. Д., Долгий С. И., Невзоров А. А., Невзоров А. В., Романовский О. А., Харченко О. В. Лидарное зондирование озона в верхней тропосфере — нижней стратосфере: методика и результаты измерений // Изв. Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2015. Т. 326. № 9. С. 124–132.
7. Higdon N. S., Browell E. V., Ponsardin P., Grossmann B. E., Butler C. F., Chyba T. H., Neale Mayo M., Allen R. J., Heuser A. W., Grant W. B., Ismail S., Mayor S. D., Carter A. F. Airborne Differential Absorption Lidar System for Measurements of Atmospheric Water Vapor and Aerosols // Applied Optics. 1994. Vol. 33. N 27. P. 6422–6438. doi:10.1364/AO.33.006422
8. Toriumi R., Tai H., Takechi N. Tunable Solid-State Blue Laser Differential Absorption Lidar System for NO<sub>2</sub> Monitoring // Optical Engineering. 1996. Vol. 35. N 8. P. 2371–2375. doi:10.1117/1.600617
9. Харченко О. В. Методика планирования и проведения лидарных измерений профилей метеорологических параметров атмосферы // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 06. С. 523–528.
10. Матвиенко Г. Г., Романовский О. А., Харченко О. В., Яковлев С. В. Результаты моделирования лидарных измерений профилей метеопараметров с помощью обертонового СО-лазера // Оптика атмосферы и океана. 2014. Т. 27. № 02. С. 123–125.
11. Романовский О. А., Харченко О. В., Яковлев С. В. Применение многоволновых ИК-лазеров для лидарных и трассовых измерений метеорологических параметров атмосферы // Изв. высших учебных заведений. Физика. 2014. Т. 57. № 10. С. 74–80.
12. Бобровников С. М., Матвиенко Г. Г., Романовский О. А., Сериков И. Б., Суханов А. Я. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы. — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2014. — 510 с.
13. Platt U., Perner D., Patz H. W. Simultaneous Measurement of Atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> by Differential Optical Absorption // J. Geophys. Res. 1979. Vol. 84. N C10. P. 6329–6335. doi:10.1029/JC084iC10p06329
14. Platt U. Air Monitoring by Spectroscopic Techniques // Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS). — N. Y.: John Wiley, 1994. — P. 27–84.
15. Platt U., Stutz J. Differential Optical Absorption Spectroscopy. — Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. — 593 p. doi:10.1007/978-3-540-75776-4
16. Hinkley E. D. Laser Monitoring of the Atmosphere. — Springer-Verlag, 1976. — 396 p.
17. Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P. F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. I., Wagner G. The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database // Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer. 2013. Vol. 130. P. 4–50. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.07.002
18. Зуев В. Е., Комаров В. С. Статистические модели температуры и газовых компонент атмосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1986. — 264 с.
19. Креков Г. М., Рахимов Р. Ф. Оптико-локационная модель континентального аэрозоля. — Новосибирск: Наука, 1982. — 199 с.
20. McClatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A. Optical Properties of Atmosphere // Report AFCRL-71-0297. — Bedford, Mass., 1971. — 86 p.

UDC 621.373.826; 551.510.411

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.71

## Simulation of Remote Atmospheric Sensing by a Laser System based on Optical Parametric Oscillator

Romanovskii O. A.<sup>a,b</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, roa@iao.ruSukhanov A. Ya.<sup>a,c</sup>, PhD, Tech., say@iao.ruKharchenko O. V.<sup>a</sup>, PhD, Phys.-Math., olya@iao.ruYakovlev S. V.<sup>a,b</sup>, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, ysv@iao.ruSadovnikov S. A.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, sadsa@iao.ru<sup>a</sup>V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, 1, Academician Zuev Sq., 634021, Tomsk, Russian Federation<sup>b</sup>National Research Tomsk State University, 36, Lenin Av., 634050, Tomsk, Russian Federation<sup>c</sup>Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40, Lenin Av., 634050, Tomsk, Russian Federation

**Introduction:** Differential absorption lidars and differential optical absorption spectroscopy systems are an established technology for environmental monitoring, successfully used for remote atmospheric sensing. Differential absorption lidars traditionally use high-power gas lasers with a discrete set of wavelengths, having the emission line width of about 0.01 cm<sup>-1</sup>, and harmonic generators which extend the operating spectral ranges of the systems. Simultaneous spectral and temporal analysis of a multi-frequency response from the atmosphere is not possible due to the necessity of wavelength tuning. For this reason, real-time concentration monitoring is possible only for a strictly limited number of the atmosphere components. In turn, active differential optical absorption spectroscopy systems use thermal radiation sources whose emission spectrum width is about hundreds of nanometers, which provides the possibility of a spectrally resolved integrated-path atmospheric gas analysis using mirror reflectors. **Purpose:** We test a developed method for lidar sensing of minor gas components of the atmosphere, which combines the advantages of differential absorption and differential optical absorption spectroscopy methods. **Results:** We have carried out numerical experiments in order to estimate the capability of remote atmospheric sensing using a laser system with parametric light generation in the spectral range 3–4 μm based on a non-linear crystal KTiOAsO<sub>4</sub>. On the basis of the developed method of lidar remote sensing, we have found and selected certain wavelengths informative for gas analysis. We have also simulated lidar signals whose analysis showed the possibility of remote monitoring of HCN and C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> on 1 km long horizontal paths.

**Keywords** — Atmosphere, Lidar Sounding, Differential Absorption Lidar, Differential Optical Absorption Spectroscopy, Atmospheric Trace Gas, Non-Linear Crystals.

## References

- Vasilev B. I., Mannun O. M. IR Differential-Absorption Lidars for Ecological Monitoring of the Environment. *Quantum Electronics*, 2006, vol. 36, no. 9, pp. 801–820. doi:10.1070/QE2006v036n09ABEH006577
- Mitev V., Babichenko S., Bennes J., Borelli R., Dolfi-Bouteyre A., Fiorani L., Hespel L., Huet T., Palucci A., Pistilli M., Puiu A., Rebane O., Sobolev I. Mid-IR DIAL for High-Resolution Mapping of Explosive Precursors. *Proc. SPIE*, 2013, vol. 8894, pp. 88940S–88940S-13. doi:10.1117/12.2028374
- Sunesson J. A., Apituley A., Swart D. P. J. Differential Absorption Lidar System for Routine Monitoring of Tropospheric Ozone. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, no. 30, pp. 7045–7058. doi:10.1364/AO.33.007045
- Browell E. V. Differential Absorption Lidar Sensing of Ozone. *Proc. of the IEEE*, 1989, vol. 77, no. 3, pp. 419–432. doi:10.1109/5.24128
- McGee T. J., Gross M., Singh U. N., Butler J. J., Kimvilakani P. E. Improved Stratospheric Ozone Lidar. *Optical Engineering*, 1995, vol. 34, no. 5, pp. 1421–1430. doi:10.1117/12.199883
- Burlakov V. D., Dolgii S. I., Nevzorov A. A., Nevzorov A. V., Romanovskii O. A., Kharchenko O. V. Lidar Sensing of Ozone in the Upper Troposphere — Lower Stratosphere: Technique and Results of Measurements. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov*, 2014, vol. 325, no. 2, pp. 127–136 (In Russian).
- Higdon N. S., Browell E. V., Ponsardin P., Grossmann B. E., Butler C. F., Chyba T. H., Neale Mayo M., Allen R. J., Heuser A. W., Grant W. B., Ismail S., Mayor S. D., Carter A. F. Airborne Differential Absorption Lidar System for Measurements of Atmospheric Water Vapor and Aerosols. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, no. 27, pp. 6422–6438. doi:10.1364/AO.33.006422
- Toriumi R., Tai H., Takechi N. Tunable Solid-State Blue Laser Differential Absorption Lidar System for NO<sub>2</sub> Monitoring. *Optical Engineering*, 1996, vol. 35, no. 8, pp. 2371–2375. doi:10.1117/1.600617
- Kharchenko O. V. The Method for Planning and Carrying out the Lidar Measurements of Profiles of Atmospheric Meteorological Parameters. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2012, vol. 25, no. 06, pp. 523–528 (In Russian).
- Matvienko G. G., Romanovskii O. A., Kharchenko O. V., Yakovlev S. V. Simulation of Lidar Measurements of Profiles of Atmospheric Meteorological Parameters using Overtone CO Laser. *Optika atmosfery i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]*, 2014, vol. 27, no. 02, pp. 123–125 (In Russian).
- Romanovskii O. A., Kharchenko O. V., Yakovlev S. V. Application of Multiwavelength IR Lasers for Lidar and Path Measurements of the Meteorological Parameters of the Atmosphere. *Russian Physics Journal*, 2015, vol. 57, no. 10, pp. 1380–1387. doi:10.1007/s11182-015-0392-1
- Bobrovnikov S. M., Matvienko G. G., Romanovskii O. A., Serikov I. B., Sukhanov A. Ya. *Lidarnyi spektroskopicheskiy gazoanaliz atmosfery [Lidar Spectroscopic Gas Analysis of the Atmosphere]*. Tomsk, IOA SO RAN Publ., 2014. 510 p. (In Russian).
- Platt U., Perner D., Patz H. W. Simultaneous Measurement of Atmospheric CH<sub>2</sub>O, O<sub>3</sub>, and NO<sub>2</sub> by Differential Optical Absorption. *J. Geophys. Res.*, 1979, vol. 84, no. C10, pp. 6329–6335. doi:10.1029/JC084iC10p06329
- Platt U. Air Monitoring by Spectroscopic Techniques. In: *Differential Optical Absorption Spectroscopy (DOAS)*. New York, John Wiley, 1994. Pp. 27–84.
- Platt U., Stutz J. *Differential Optical Absorption Spectroscopy*. Berlin, Heidelberg, Springer-Verlag, 2008. 593 p. doi:10.1007/978-3-540-75776-4
- Hinkley E. D. *Laser Monitoring of the Atmosphere*. Berlin, Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 1976. 396 p.
- Rothman L. S., Gordon I. E., Babikov Y., Barbe A., Chris Benner D., Bernath P. F., Birk M., Bizzocchi L., Boudon V., Brown L. R., Campargue A., Chance K., Cohen E. A., Coudert L. H., Devi V. M., Drouin B. J., Fayt A., Flaud J.-M., Gamache R. R., Harrison J. J., Hartmann J.-M., Hill C., Hodges J. T., Jacquemart D., Jolly A., Lamouroux J., Le Roy R. J., Li G., Long D. A., Lyulin O. M., Mackie C. J., Massie S. T., Mikhailenko S., Müller H. S. P., Naumenko O. V., Nikitin A. V., Orphal J., Perevalov V., Perrin A., Polovtseva E. R., Richard C., Smith M. A. H., Starikova E., Sung K., Tashkun S., Tennyson J., Toon G. C., Tyuterev V. I., Wagner G. The HITRAN2012 Molecular Spectroscopic Database. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2013, vol. 130, pp. 4–50. doi:10.1016/j.jqsrt.2013.07.002
- Zuev V. E., Komarov V. S. *Statisticheskie modeli temperatury i gazovykh komponent atmosfery [Statistic Models of Temperature and Gas Components of the Atmosphere]*. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1986. 264 p. (In Russian).
- Krekov G. M., Rakhimov R. F. *Optiko-lokatsionnaya model' kontinental'nogo aerologia [Optical Location Model of Continental Aerosol]*. Novosibirsk, Nauka Publ., 1982. 199 p.
- McClatchey R. A., Fenn R. W., Selby J. E. A., Volz F. E., Garing J. S. *Optical Properties of Atmosphere. Report AFCRL-71-0297*. Bedford, Mass., 1971. 86 p.

# ОНТОЛОГИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРАВЛЯЮЩИХ АВТОМАТОВ СЕРВИСОВ КИБЕРФИЗИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Н. Г. Шилов<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

М. С. Щекотов<sup>а</sup>, научный сотрудник

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** сервисы киберфизических систем наделяются не только возможностью выхода в Интернет в целях поиска и извлечения информации, а также ее предоставления, но и принятия решений в зависимости от текущей ситуации. Ввиду ограниченной вычислительной мощности таких устройств использование для их описания и программирования управляющих автоматов является весьма перспективным. Однако необходимость их тесного взаимодействия вызывает проблемы, связанные с обеспечением интероперабельности. **Цель исследования:** онтологическое моделирование управляющих автоматов сервисов киберфизических систем. **Результаты:** предложено использование управляющих автоматов для разработки сервисов киберфизической системы; разработана совместимая с Resource Description Framework онтологическая модель управляющего автомата сервиса киберфизической системы, основанная на представлении сервисов, их состояний и выходных символов в виде классов, а входных символов — в виде отношений; результаты продемонстрированы на примере сценария взаимодействия роботов при формировании заданного слова из букв. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке сервисов киберфизических систем.

**Ключевые слова** — интероперабельность, онтологическое моделирование, управляющий автомат, сервис, киберфизическая система.

## Введение

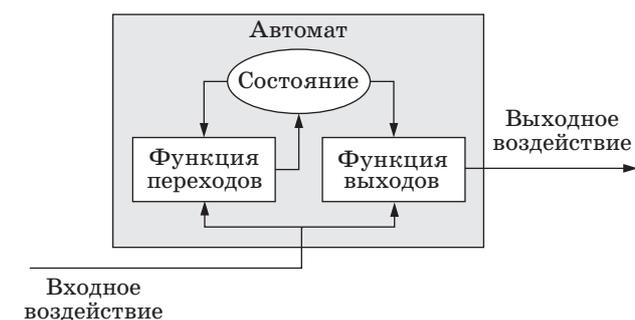
В эпоху Интернета вещей все больше устройств наделяются функциональностью, позволяющей им осуществлять доступ к Интернету. Данная функциональность была ориентирована в первую очередь на поиск и извлечение информации, однако развитие информационно-коммуникационных технологий привело к появлению новых требований и возможностей. Многие современные устройства помогают человеку в различных видах его деятельности, не только извлекая информацию, но и анализируя ее, а также принимая собственные решения в зависимости от текущей ситуации [3, 4]. Данные возможности стали одной из движущих сил развития киберфизических систем [1, 2]. Киберфизические системы представляют собой множество ресурсов, взаимодействующих между собой в информационном пространстве и управляющих устройствами в физическом пространстве в режиме реального времени. При этом они базируются на инфраструктурах, обеспечивающих связь, вычисления, управление и объединяющих сенсоры, вычислительные устройства, сервисы и средства коммуникаций. Устройства, входящие в киберфизические системы, зачастую имеют ограниченные вычислительные мощности, что существенно сужает возможности их программирования. Одним из перспективных подходов к решению данной проблемы является использование управляющих автоматов.

Теория автоматов появилась в рамках теории управляющих систем (теоретической кибернетики) в связи с бурным развитием средств электронной вычислительной техники и соответствующих областей математического знания в первую очередь для моделирования гипотетических цифровых систем. Однако последующее развитие информационных технологий вывело сферу приложения теории автоматов далеко за рамки моделирования аппаратных средств цифровой электроники, расширив ее до фундаментальных основ современной теоретической информатики. Сегодня абстракции и модели, разработанные в теории автоматов, востребованы такими научными дисциплинами, как теория формальных грамматик, математическая лингвистика, теория логических моделей, математическая логика и формальные аксиоматические системы, теория кодирования, теория вычислительной сложности и др. [8].

Под управляющим автоматом принято понимать конечный дискретный автомат, описываемый как

$$A = (X, Y, Z, \delta, \varphi, y_0),$$

где  $X$  — конечный алфавит входных символов;  $Y$  — конечное множество состояний;  $Z$  — конечный алфавит выходных символов;  $\delta: X \times Y \rightarrow Y$  — функция переходов, определяющая состояние;  $\varphi: X \times Y \rightarrow Z$  — функция переходов, определяющая выходной символ;  $y_0 \in Y$  — начальное (стартовое) состояние.



■ *Рис. 1.* Управляющий автомат  
 ■ *Fig. 1.* Finite-state machine

Схематично такой автомат изображен на рис. 1 [10].

Теория автоматов имеет широкие возможности применения [9]:

- проектирование систем логического управления;
- обработка текстов и построение компиляторов;
- спецификация и верификация систем взаимодействующих процессов;
- языки описания документов и объектно-ориентированных программ;
- оптимизация логических программ и т. д.

Одним из достаточно популярных направлений в данной области является автоматное программирование, т. е. подход к разработке программных систем со сложным поведением, основанный на модели автоматизированного объекта управления (расширении конечного автомата) [10].

Необходимость тесного взаимодействия устройств киберфизических систем также накладывает дополнительные требования, связанные с обеспечением интероперабельности. Одним из наиболее распространенных подходов к решению данной проблемы является онтологическое моделирование проблемной области [5–7]. В настоящей статье предложено решение задачи онтологического моделирования управляющих автоматов сервисов киберфизических систем.

### Сервис киберфизической системы

Согласно ранее разработанной концепции [11], сервис киберфизической системы можно представить следующим образом (рис. 2).

**Сервис** — основной действующий субъект процесса многоуровневой самоконтекстуализации. Сервис может представлять сенсор, транспортное средство, компанию — поставщика услуг и т. п. Сервис обладает структурными знаниями, параметрическими знаниями и профилем. Сервис характеризуется такими свойствами, как самокон-

текстуализация, самоадаптация, автономность и проактивность и выполняет некоторые действия.

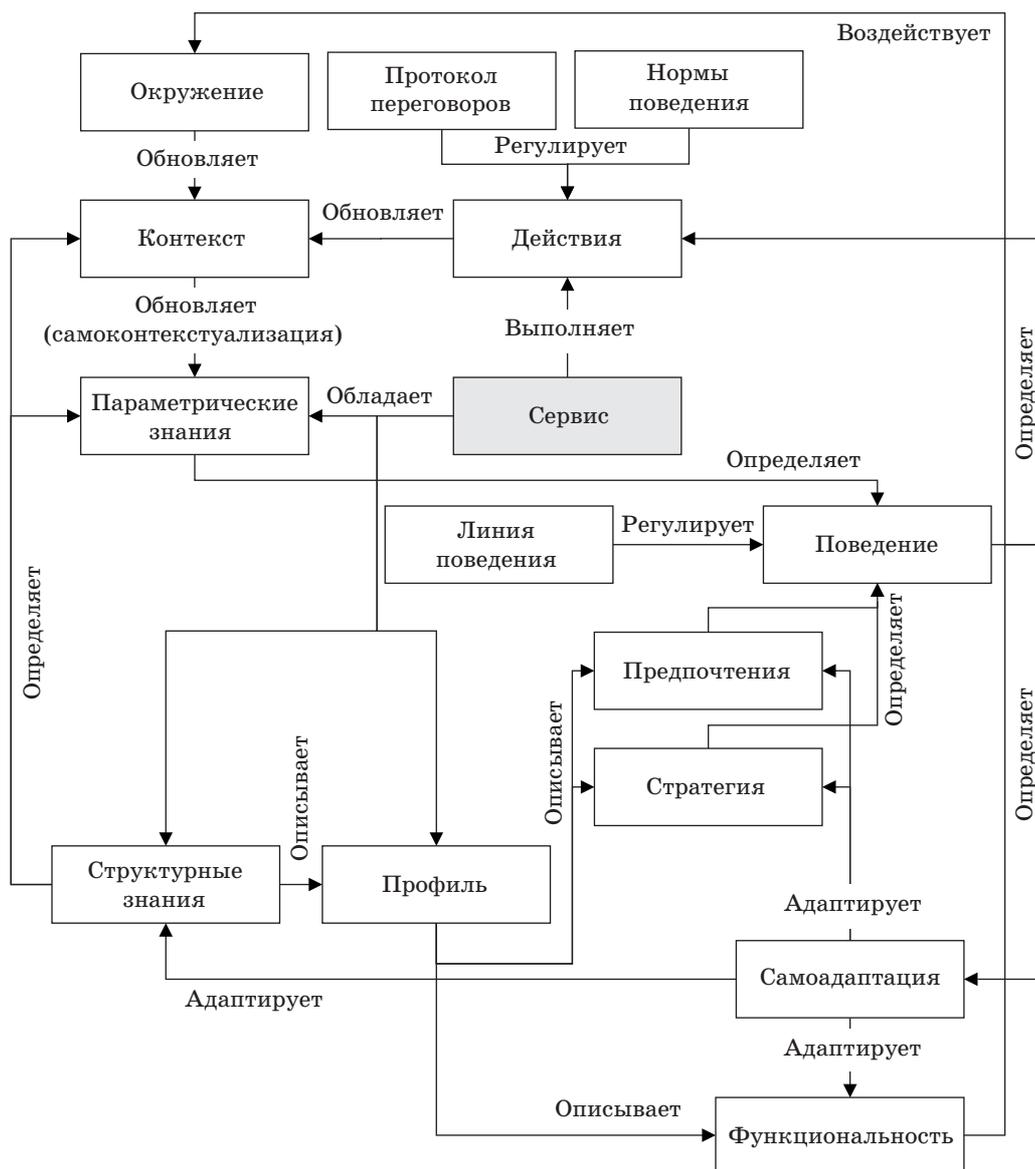
*Структурные знания* являются концептуальным описанием проблем, которые могут быть решены соответствующим сервисом. Они представляют собой внутреннюю онтологию сервиса. Структурные знания описывают структуру параметрических знаний сервиса. В зависимости от ситуации структурные знания могут быть модифицированы (адаптированы) посредством *самоадаптации*. Они также описывают терминологию контекста и профиля сервиса.

*Параметрические знания* являются знаниями о конкретной ситуации. Их структура определяется структурными знаниями сервиса, а параметрическая составляющая зависит от контекста текущей ситуации. Они определяют поведение сервиса.

*Контекстом* называется любая информация, которая может быть использована для описания ситуации объекта, где в качестве объекта может выступать человек, место и т. п., которые считаются относящимися к задаче, решаемой пользователем, включая самого пользователя и используемые им инструментальные средства [13].

Целью контекста является представление только релевантных информации и знаний из всего объема доступных. Релевантность информации и знаний оценивается на основе того, насколько они связаны с рассматриваемой задачей. Контекст описывается в терминологии структурных знаний сервиса. Он обновляется по мере поступления информации из окружения сервиса и как результат действий сервиса. Контекст обновляет параметрические знания сервиса, которые в свою очередь определяют его поведение. Способность системы (сервиса) описывать и использовать контекст, а также адаптировать свое поведение в зависимости от контекста называется *самоконтекстуализацией* [14]. Представленный подход использует идею самоконтекстуализации для автономной адаптации поведения сервисов согласно контексту текущей ситуации для принятия ими контекстно-зависимых решений. С этой целью предусмотрена концептуальная модель предусматривает контекстную зависимость сервисов и их адаптацию к контексту. В работе используется двухэтапное построение контекста: построение контекста текущей ситуации на основании знаний проблемной области (абстрактный контекст) и конкретизация абстрактного контекста значениями переменных, получаемыми от информационных сервисов (оперативный контекст).

*Окружение* является окружающей средой киберфизической системы, частью которой является рассматриваемый сервис. Такая среда способна взаимодействовать с данной системой. Окружение влияет на контекст сервиса. Сервис может воздействовать на окружение, если он имеет соответ-



■ **Рис. 2.** Концептуальная модель самоконтекстуализирующегося сервиса киберфизической системы  
 ■ **Fig. 2.** Self-contextualizing service of cyber-physical system: conceptual model

ствующую функциональность (например, автобус может перевезти пассажира).

**Функциональность** — это набор киберфизических функций, которые могут быть выполнены сервисом. Посредством функциональности сервис может воздействовать на свое окружение. Функциональность сервиса может быть в некоторой степени изменена посредством самоадаптации. Функциональность описывается профилем сервиса.

**Профиль** описывает функциональность, предпочтения и стратегии сервиса в терминах его структурных знаний таким образом, чтобы он мог быть «понимаем» другими сервисами киберфизической системы.

**Самоадаптация** — это способность поведения сервиса модифицировать его структурные знания, функциональность, стратегию и предпочтения в ответ на изменения в окружении.

**Поведение** — это способность сервиса выполнять некоторые действия и самоадаптацию для изменения как собственного состояния, так и состояния окружения с текущего на желаемое. Поведение определяется предпочтениями и стратегиями сервиса, а также линиями поведения, заданными на более высоком уровне самоконтекстуализации.

**Линии поведения** — это набор принципов и (или) правил, получаемых с более высокого уровня самоконтекстуализации для направления по-

ведения сервиса в целях достижения рациональных результатов на более низких уровнях самоконтекстуализации.

*Предпочтения* — это склонность сервиса к определенным состояниям окружения или собственным состояниям, а также склонность избегать некоторых состояний. Предпочтения описаны в профиле сервиса и влияют на его поведение. Агент может изменять свои предпочтения посредством самоадаптации.

*Стратегия* — это предопределенный план действий или набор правил выбора действий для изменения состояния сервиса или его окружения с текущего на желаемое. Стратегия описывается в профиле сервиса и определяет его поведение. Сервис может изменять свои стратегии посредством самоадаптации.

*Действия* — это способность сервиса взаимодействовать с другими сервисами и вести переговоры посредством своего поведения. Они регулируются протоколом переговоров и нормами поведения.

*Протокол переговоров* — это набор базовых правил, сформулированных таким образом, чтобы при следовании сервисом этим правилам вся система вела себя так, как задумано ее создателями. Протокол переговоров определяет действия сервиса.

*Нормы поведения* — это правила, регулирующие действия сервиса. В отличие от протокола переговоров, нормы носят рекомендательный характер.

### Использование управляющих автоматов для описания поведения сервисов

Как было показано ранее, описание поведения сервиса в киберфизической системе с помощью управляющих автоматов может быть весьма целесообразным. Можно сформулировать следующие составляющие управляющего автомата сервиса:

— конечный алфавит входных символов ( $X$ ) — сообщения, которые может получать сервис от других сервисов;

— конечное множество состояний ( $Y$ ) — совокупность значений переменных, описывающих состояние сервиса и окружения, для которой может быть определено значение «желаемости» с точки зрения сервиса;

— функции переходов ( $\delta$  и  $\varphi$ ) — функции, описывающие действия сервиса в зависимости от параметров текущей ситуации;

— конечный алфавит выходных символов ( $Z$ ) — сообщения, которые сервис может посылать другим сервисам.

Рассмотрим простой, но иллюстративный пример киберфизической системы, являющейся под-

системой системы «умный дом» (рис. 3). Допустим, в наличии имеется датчик температуры ( $S_1$ ) и обогреватель ( $S_3$ ), представленные в системе с помощью сервисов, а также управляющий сервис ( $S_2$ ). Также в системе присутствуют два типа сообщений для обмена информацией: сообщения с данными о текущей температуре в помещении ( $m_1$ ); сообщение с управляющим воздействием, направленным на изменение режима работы обогревателя ( $m_2$ ).

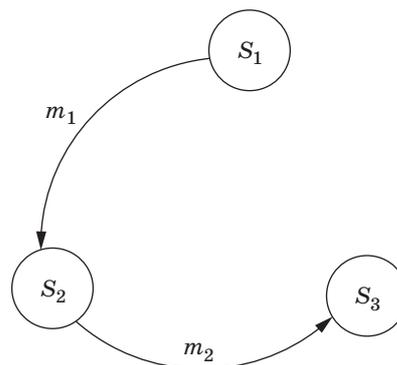
Рассмотрим автомат сервиса  $S_2$ .

У него существует всего четыре состояния:

$$Y = (y_0, y_1, y_2, y_3),$$

где  $y_0$  — температура ( $x$ ) не определена (начальное состояние сервиса);  $y_1$  — температура ниже необходимой;  $y_2$  — температура соответствует необходимой ( $x_0$ );  $y_3$  — температура выше необходимой.

Алфавит входных символов соответствует целым числам от  $-127$  до  $127$  (температура в градусах Цельсия) и передается в сообщении  $m_1$ :  $X = [-127, -126, \dots, 127]$ .



■ **Рис. 3.** Пример описания взаимодействия сервисов киберфизической системы управления температурой помещения

■ **Fig. 3.** The example of the interaction of cyber-physical system services for smart home temperature management

■ **Таблица 1.** Пример функции переходов  $\varphi$  управляющего сервиса умного дома

■ **Table 1.** The transition function  $\varphi$  of the smart home service state machine

Состояние ( $Y$ )	Управляющее воздействие ( $Z$ )
$y_1$	1
$y_2$	0
$y_3$	-1

Алфавит выходных символов соответствует целым числам  $-1$  (снизить температуру),  $0$  (не менять температуру),  $1$  (повысить температуру) и передается в сообщении  $m_2: Z = [-1, 0, 1]$ .

Функция переходов  $\delta$  выглядит следующим образом:

$$\delta(x): y = \begin{cases} y_1, & x < x_0 \\ y_2, & x = x_0 \\ y_3, & x > x_0 \end{cases}$$

Функция переходов  $\varphi$  представлена в табл. 1.

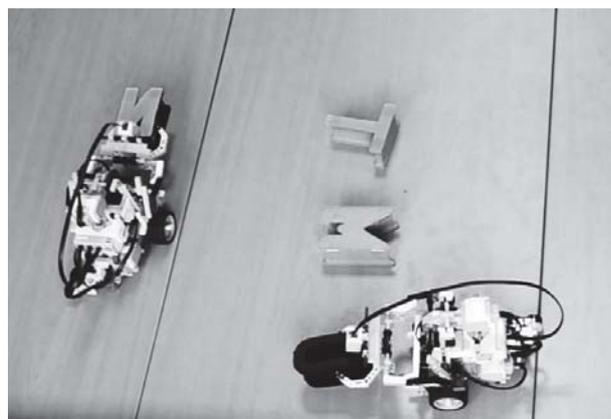
### Онтологическое описание управляющих автоматов сервисов на основе модели представления данных RDF

Поскольку в разработанной ранее концепции построения сервисов киберфизических систем для их описания используются онтологии, а для передачи сообщений — модель представления данных RDF (Resource Description Framework — «среда описания ресурса» — модель, разработанная консорциумом W3C) [11, 12], необходимо определить способ сопоставления элементов управляющих автоматов и элементов онтологии с использованием RDF. Данная модель представляет утверждения о ресурсах в пригодном для машинной обработки виде и является частью концепции семантической паутины (Semantic Web).

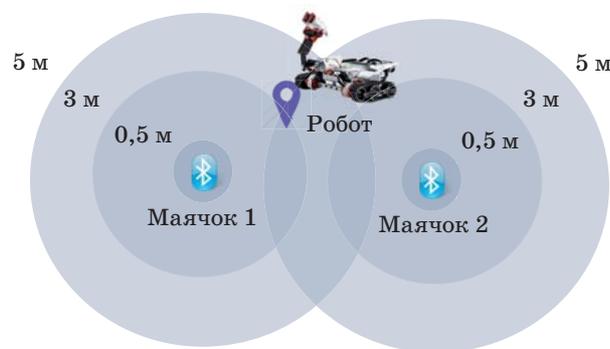
В качестве примера рассмотрим сценарий формирования роботами заданного слова из букв, произвольно размещенных на столе [12]. Для упрощения исследовательского макета роботы не распознают буквы, а определяют их на основе цветов (с использованием простых датчиков цвета), т. е. каждой букве в соответствие поставлен определенный цвет, в который она окрашена. Согласно сценарию, роботы сканируют пространство, находят буквы и складывают из них заданное слово (рис. 4).

Для определения местоположения роботов используется метод счисления координат на основе данных следующих встроенных датчиков: акселерометра, гироскопа, компаса. В начале сценария робот находится в точке с известными координатами, откуда и начинает движение. Также производится коррекция с помощью сигналов маячков BLE (Bluetooth Low Energy) [15, 16]. Использование маячков BLE позволяет определить, в какой из зон действия сигнала какого маячка находится робот (рис. 5).

Для обмена информацией используется интеллектуальное пространство, являющееся распределенным хранилищем информации. Сервисы



■ Рис. 4. Роботы складывают слово «ИТМО»  
 ■ Fig. 4. Robots are assembling the word «ИТМО»

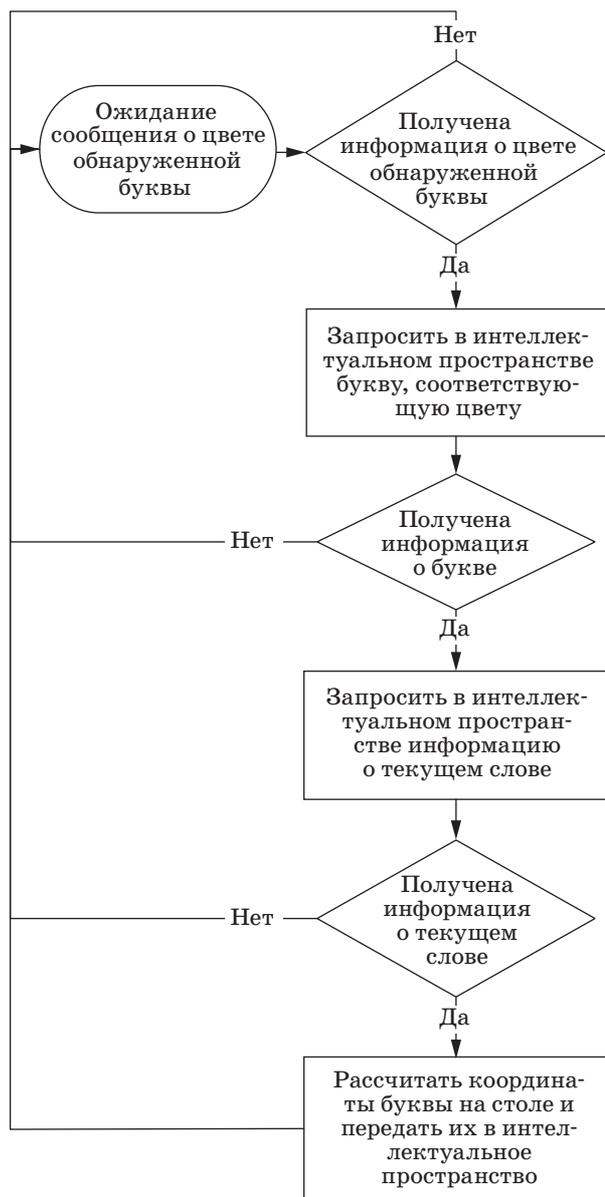


■ Рис. 5. Определение зоны местонахождения робота  
 ■ Fig. 5. The robot localization

могут передавать информацию в интеллектуальное пространство и получать ее посредством запросов.

За текущее состояние (расположение букв на столе) и управление формированием слова отвечает сервис локализации букв (letter localization service). Данный сервис собирает информацию от роботов, рассчитывает, где должны оказаться буквы, и отдает соответствующие распоряжения роботам.

Диаграмма разработанного алгоритма работы сервиса локализации букв представлена на рис. 6 и подробно описана в статье [12]. Сервис подписывается на получение сообщений об обнаружении новой буквы и переходит в режим ожидания. При появлении информации о новой букве сервис получает информацию о ее цвете и на ее основе осуществляет запрос идентификации буквы. После идентификации буквы сервис осуществляет запрос текущего слова, которое должны собрать роботы. Если текущее слово успешно получено, сервис находит в нем расположение буквы и рассчитывает на столе ее координаты, которые



■ **Рис. 6.** Диаграмма алгоритма работы сервиса локализации букв (адаптировано из работы [12])  
 ■ **Fig. 6.** The diagram of letter localization service operation algorithm (adapted from [12])

передаются роботам. Данную диаграмму в виде автомата представляет рис. 7, ему соответствует таблица состояний (табл. 2).

Дадим описание входных символов, состояний и выходных символов.

Входные символы:

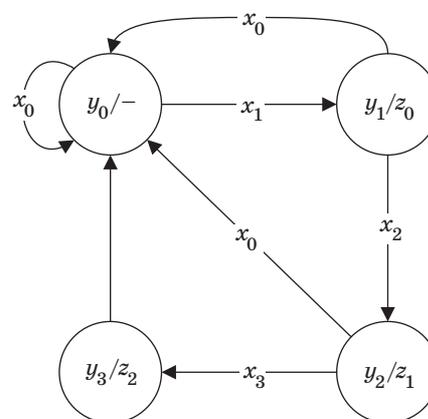
- $x_0$  — пустой или нераспознаваемый символ;
- $x_1$  — цвет обнаруженной буквы;
- $x_2$  — буква;
- $x_3$  — слово.

Состояния:

$y_0$  — ожидание сообщения о цвете обнаруженной буквы;

■ **Таблица 2.** Таблица состояний автомата сервиса локализации букв  
 ■ **Table 2.** The state table of the letter localization service state machine

$Y$	$y_0$	$y_1$	$y_2$	$y_3$
$Z$	—	$z_0$	$z_1$	$z_2$
$x_0$	$y_0$	$y_0$	$y_0$	—
$x_1$	$y_1$	—	—	—
$x_2$	—	$y_2$	—	—
$x_3$	—	—	$y_3$	—



■ **Рис. 7.** Автомат сервиса локализации букв  
 ■ **Fig. 7.** The state machine of the letter localization service

- $y_1$  — ожидание сообщения о букве;
  - $y_2$  — ожидание сообщения о слове;
  - $y_3$  — выполнение  $z_2$  и переход в состояние  $y_0$ .
- Выходные символы:

- $z_0$  — запрос в интеллектуальное пространство об определении буквы на основании заданного цвета;
- $z_1$  — запрос в интеллектуальное пространство о текущем слове;
- $z_2$  — определение координат буквы и их передача в интеллектуальное пространство.

Данный автомат можно представить в виде RDF-онтологии. Согласно RDF, любое утверждение имеет вид «субъект — предикат — объект» и называется триплетом. Для обозначения субъектов, отношений и объектов в RDF используются URI (Uniform Resource Identifier — унифицированный (единообразный) идентификатор ресурса).

Очевидным способом представления является создание классов Service для описания сервисов, State — состояний, is input for — входных символов и Output — выходных символов, а также их

экземпляров. Однако такое представление не позволяет описывать утверждения вида  $\langle y_0, x_1, y_1 \rangle$  («входной символ  $x_1$  переводит сервис из состояния  $y_0$  в состояние  $y_1$ »). В результате было предложено представить входные символы с помощью отношений, являющихся дочерними для более общего отношения is input for, связывающего состояния, т. е. его экземплярами (табл. 3, 4). Отношения RDF на уровне классов, соответствующие элементам автомата, показаны на рис. 8. В табл. 5 представлены отношения между экземплярами классов онтологии, соответствующие автомату сервиса локализации букв.

■ Таблица 3. Соответствие классов, отношений и экземпляров RDF элементам автомата

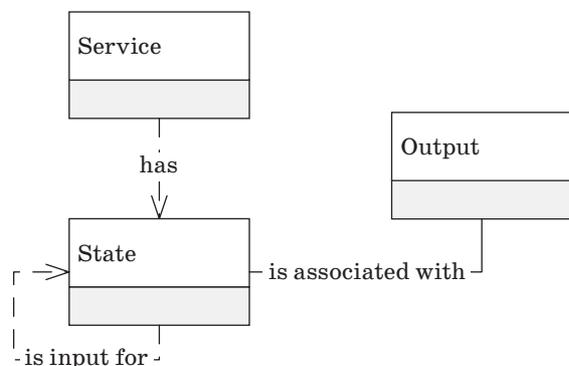
■ Table 3. Correspondence of RDF's concepts, properties and instances to state machine elements

Класс	Экземпляры
Сервис (Service)	Letter localization service
Состояние (State)	$y_0, y_1, y_2, y_3$
Выходной символ (Output)	null, $z_0, z_1, z_2$
Отношение «Входной символ» (is input for)	null, $x_0, x_1, x_2, x_3$

■ Таблица 4. Отношения RDF на уровне классов, соответствующие элементам автомата

■ Table 4. RDF properties corresponding to state machine elements

Отношение	Класс 1	Класс 2
has	Service	State
is associated with	State	Output
is input for	State	State



■ Рис. 8. Диаграмма отношения RDF на уровне классов, соответствующего элементам автомата

■ Fig. 8. RDF properties diagram corresponding to state machine elements

■ Таблица 5. Отношения между экземплярами классов RDF, соответствующие автомату сервиса локализации букв

■ Table 5. RDF triples corresponding to letter localization service state machine

Класс 1	Отношение	Класс 2
Letter localization service	has	$y_0$
То же	То же	$y_1$
– " –	– " –	$y_2$
– " –	– " –	$y_3$
$y_0$	is associated with	null
$y_1$	То же	$z_0$
$y_2$	– " –	$z_1$
$y_3$	– " –	$z_2$
$y_0$	$x_0$	$y_0$
$y_0$	$x_1$	$y_1$
$y_1$	$x_0$	$y_0$
$y_1$	$x_2$	$y_2$
$y_2$	$x_0$	$y_0$
$y_2$	$x_3$	$y_3$
$y_3$	null	$y_0$

```

<owl:Class rdf:about="#untitled-ontology-38:State">
  <rdfs:subClassOf>
    <owl:Restriction>
      <owl:onProperty rdf:resource="#untitled-ontology-38:associated_with"/>
      <owl:someValuesFrom rdf:resource="#untitled-ontology-38:Output"/>
    </owl:Restriction>
  </rdfs:subClassOf>
</owl:Class>

<owl:NamedIndividual rdf:about="#untitled-ontology-38:Letter_localization_service">
  <rdfs:type rdf:resource="#untitled-ontology-38:Service"/>
  <has rdf:resource="#untitled-ontology-38:y0"/>
  <has rdf:resource="#untitled-ontology-38:y1"/>
  <has rdf:resource="#untitled-ontology-38:y2"/>
  <has rdf:resource="#untitled-ontology-38:y3"/>
</owl:NamedIndividual>
    
```

■ Рис. 9. Фрагменты построенной онтологии управляющего автомата

■ Fig. 9. Fragments of the letter localization service state machine ontology

Для последующей реализации предложенная онтология была построена в редакторе Protégé. На рис. 9 представлены фрагменты данной онтологии (описание класса State и описание экземпляров класса State).

Данная онтология используется сервисами, участвующими в сценарии формирования роботами заданного слова из букв, что обеспечивает однозначное «понимание» сервисами информационных сообщений, публикуемых в интеллектуальном пространстве.

## Заключение

В статье рассмотрено онтологическое моделирование управляющих автоматов сервисов киберфизических систем. Проанализирована актуальность использования управляющих автоматов в киберфизических системах. Предложены онтологическая модель управляющего автомата сервиса киберфизической системы на основе RDF, а также онтологическое представление состояний управляющего автомата сервиса киберфизической системы.

Использование управляющих автоматов в ряде случаев может существенно упростить процесс разработки сервисов киберфизических систем, а их представление с помощью онтологического моделирования позволит частично решить проблемы, связанные с необходимостью поддержки семантической интероперабельности сервисов.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 15-07-08092 и 15-07-08391) и бюджетных тем № 0073-2014-0005 и 0073-2015-0007.

## Литература

1. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems // *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. P. 18–23.
2. Knight J., Xiang J., Sullivan K. A Rigorous Definition of Cyber-Physical Systems // *Trustworthy Cyber-Physical Systems Engineering*. 2016. Vol. 47. P. 47–70.
3. Wortmann F., Flüchter K. Internet of Things // *Business & Information Systems Engineering*. 2015. Iss. 3. Vol. 57. P. 221–224.
4. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions // *Future Generation Computer Systems*. 2013. Iss. 7. Vol. 29. P. 1645–1660.
5. Görner M., Göschel T., Kassel S., Sander S., Klein T. An Ontology for Interoperability: Modeling of Composite Services in the Smart Home Environment // *International IFIP Working Conf. on Enterprise Interoperability*. 2015. P. 30–38.
6. Brizzi P., Bonino D., Musetti A., Krylovsky A., Patti E., Axling M. Towards an Ontology Driven Approach for Systems Interoperability and Energy Management in the Smart City // *Computer and Energy Science (SpliTech): Intern. Multidisciplinary Conf.* 2016. P. 1–7.
7. Kiljander J., D'Elia A., Morandi F., Hyttinen P., Takalo-Mattila J., Ylisaukko-Oja A., Soininen J.-P., Cinotti T. S. Semantic Interoperability Architecture for Pervasive Computing and Internet of Things // *IEEE Access*. 2014. Vol. 2. P. 856–873.
8. Гуренко В. В. Введение в теорию автоматов. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2013. — 62 с.
9. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. Automata Theory, Languages, and Computation. 3rd ed. — Cambridge: Pearson, 2006. — 750 p.
10. Поликарпова Н. И., Шалыто А. А. Автоматное программирование. — СПб.: Питер, 2009. — 176 с.
11. Смирнов А. В., Левашова Т. В., Шилов Н. Г. Архитектура и модели самоконтекстуализирующейся сети сервисов на примере виртуального логистического хаба // *Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения*. 2013. № 4. С. 86–93.
12. Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M. Ontology-Based Collaboration in Multi-Robot System: Approach and Case Study // *11th System of Systems Engineering Conf. (SoSE)*, Kongsberg, Norway, June 12–16, 2016. P. 329–334.
13. Dey A. K. Understanding and using Context // *Personal Ubiquitous Computing*. 2001. Vol. 5. N 1. P. 4–7.
14. Raz D., Juhola A. T., Serrat-Fernandez J., Galis A. Fast and Efficient Context-Aware Services. — John Wiley & Sons, 2006. — 222 p.
15. Qiu J. W., Lin C. P., Tseng Y. C. BLE-based Collaborative Indoor Localization with Adaptive Multi-Lateration and Mobile Encountering // *IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, Doha, Qatar, April 3–6, 2016. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7564799/> (дата обращения: 20.05.2017).
16. Yoon P. K., Zihajezadeh S., Kang B. S., Park E. J. Adaptive Kalman Filter for Indoor Localization using Bluetooth Low Energy and Inertial Measurement Unit // *IEEE 37th Annual Intern. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, Italy, August 25–29, 2015. P. 825–828.

UDC 519.713

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.80

**Ontological Modelling of State Machines for Cyberphysical System Services**Shilov N. G.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, nick@iias.spb.suSchekotov M. S.<sup>a</sup>, Researcher, shekotov@iias.spb.su<sup>a</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Services of cyberphysical systems are supposed to be able not only to access Internet for information search, extraction and representation, but also to make decisions in accordance with the environment state. Due to computational limitations of such devices, it is considered to be promising to use state machines for their programming. However, the necessity of their interaction causes problems related to their interoperability support. **Purpose:** Our goal is ontological modelling of state machines for cyberphysical system services. **Results:** Usage of state machines for the development of cyberphysical system services has been proposed. A RDF-compatible ontological model of a state machine for a cyberphysical system service has been developed, based on a representation of the services, their states and output symbols as classes, and their input symbols as properties. The results are demonstrated via a case study of robot interaction for assembling a given word out of letters. **Practical relevance:** The obtained results can be used in the development of cyberphysical system services.

**Keywords** — Interoperability, Ontological Modelling, State Machine, Service, Cyberphysical System.

**References**

1. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A Cyber-Physical Systems Architecture for Industry 4.0-Based Manufacturing Systems. *Manufacturing Letters*, 2015, vol. 3, pp. 18–23.
2. Knight J., Xiang J., Sullivan K. A Rigorous Definition of Cyber-Physical Systems. *Trustworthy Cyber-Physical Systems Engineering*, 2016, vol. 47, pp. 47–70.
3. Wortmann F., Flüchter K. Internet of Things. *Business & Information Systems Engineering*, 2015, iss. 3, vol. 57, pp. 221–224.
4. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A Vision, Architectural Elements, and Future Directions. *Future Generation Computer Systems*, 2013, iss. 7, vol. 29, pp. 1645–1660.
5. Görner M., Göschel T., Kassel S., Sander S., Klein T. An Ontology for Interoperability: Modeling of Composite Services in the Smart Home Environment. *Intern. IFIP Working Conf. on Enterprise Interoperability*, 2015, pp. 30–38.
6. Brizzi P., Bonino D., Musetti A., Krylovsky A., Patti E., Axling M. Towards an Ontology Driven Approach for Systems Interoperability and Energy Management in the Smart City. *International Multidisciplinary Conf. "Computer and Energy Science" (SpliTech)*, IEEE, 2016, pp. 1–7.
7. Kiljander J., D'Elia A., Morandi F., Hyttinen P., Takalo-Mattila J., Ylisaukko-Oja A., Soininen J.-P., Cinotti T. S. Semantic Interoperability Architecture for Pervasive Computing and Internet of Things. *IEEE Access*, 2014, vol. 2, pp. 856–873.
8. Gurenko V. V. *Vvedenie v teoriyu avtomatov* [Introduction into the State Machine Theory]. Moscow, MGTU im. N. E. Bauman Publ., 2013. 62 p. (In Russian).
9. Hopcroft J. E., Motwani R., Ullman J. D. *Automata Theory, Languages, and Computation*. 3rd ed. Cambridge: Pearson, 2006. 750 p.
10. Polikarpova N. I., Shalyto A. A. *Avtomatnoe programirovanie* [State Machine Programming]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2009. 176 p. (In Russian).
11. Smirnov A. V., Levashova T. V., Shilov N. G. Architecture and Models of Self-Contextualizing Service Network on a Case Study of Virtual Logistic Hub. *Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putei soobshcheniia*, 2013, no. 4, pp. 86–93 (In Russian).
12. Smirnov A., Kashevnik A., Mikhailov S., Mironov M., Petrov M. Ontology-Based Collaboration in Multi-Robot System: Approach and Case Study. *11th System of Systems Engineering Conf. (SoSE)*, Kongsberg, Norway, June 12–16, 2016, pp. 329–334.
13. Dey A. K. Understanding and Using Context. *Personal Ubiquitous Computing*, 2001, vol. 5, no. 1, pp. 4–7.
14. Raz D., Juhola A. T., Serrat-Fernandez J., Galis A. *Fast and Efficient Context-Aware Services*. John Wiley & Sons, 2006. 222 p.
15. Qiu J. W., Lin C. P., Tseng Y. C. BLE-Based Collaborative Indoor Localization with Adaptive Multi-Lateration and Mobile Encountering. *IEEE Wireless Communications and Networking Conf.*, Doha, Qatar, April 3–6, 2016. Available at: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7564799/> (accessed 20 May 2017).
16. Yoon P. K., Zihajezadeh S., Kang B. S., Park E. J. Adaptive Kalman Filter for Indoor Localization using Bluetooth Low Energy and Inertial Measurement Unit. *IEEE 37th Annual Intern. Conf. on Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Milan, Italy, August 25–29, 2015, pp. 825–828.

УДК 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.89

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛОКАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ, ОТРАЖЕННЫХ ОТ КРОМКИ ЗЕМЛЯ-МОРЕ

**В. И. Исаков<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

**Д. А. Шепета<sup>а</sup>**, канд. техн. наук, доцент

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

**Введение:** математические модели эхо-сигналов от подстилающих поверхностей земли и моря необходимы при синтезе и анализе работы бортовых локаторов летательных аппаратов, осуществляющих поиск, обнаружение и сопровождение объектов. В этих случаях эхо-сигналы являются помехой, на фоне которой и происходят выделение и обработка информационных сигналов. При аппроксимации плотности распределения вероятностей амплитуды отраженного сигнала многие исследователи используют плотность распределения Рэлея. Для аппроксимации распределения амплитуд сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, при исследовании характеристик высокоточных локаторов используют логарифмически-нормальную плотность распределения, плотность распределения Вейбулла, составные распределения и некоторые другие плотности распределения. **Цель исследования:** разработка универсального алгоритма моделирования флюктуаций локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море. **Результаты:** получен алгоритм моделирования, позволяющий моделировать флюктуации сигнала, отраженного от кромки земля-море. В качестве законов распределения амплитуд и мощностей сигналов, отраженных от подстилающих поверхностей, использованы логарифмически-нормальный закон для отражений от морской поверхности и закон распределения Вейбулла для отражений от земной поверхности. Методика синтеза алгоритма позволяет использовать и другие законы распределения. Алгоритмы моделирования сигналов, отраженных земной и морской поверхностями, являются частными случаями представленного алгоритма. **Практическая значимость:** алгоритм может использоваться при отработке аппаратуры, осуществляющей картографирование береговой линии, а также для отработки режимов взлета-посадки гидросамолетов вблизи портов.

**Ключевые слова** — модель, локационный сигнал, кромка земля-море.

### Введение

Одним из наиболее эффективных методов исследования сложных нелинейных систем управления является метод математического моделирования систем на ЭВМ, в частности метод имитационного моделирования. При этом исследовании необходимо реализовать на ЭВМ не только алгоритм функционирования самой системы управления, но синтезировать и реализовать алгоритмы имитации информационных и мешающих входных сигналов системы. Задача синтеза математических моделей входных сигналов оказывается зачастую даже более сложной, чем реализация алгоритма функционирования исследуемой системы. Это прежде всего связано с тем, что входные сигналы (как информационные, так и мешающие) являются случайными, а в качестве их математических моделей используют случайные нестационарные негауссовы процессы [1, 2]. В данной работе рассмотрены особенности моделирования локационных сигналов, отраженных от кромки земля-море.

### Основные характеристики сигналов, отраженных от подстилающих поверхностей земли и моря

Математические модели эхо-сигналов от подстилающих поверхностей земли и моря необхо-

димы при синтезе и анализе работы бортовых локаторов летательных аппаратов, осуществляющих поиск, обнаружение и сопровождение объектов. В этих случаях эхо-сигналы являются помехой, на фоне которой и происходит выделение и обработка информационных сигналов. В случае картографирования, в частности спутникового, сигналы от подстилающих поверхностей являются информационными, при этом особое значение приобретают задачи картографирования береговой зоны и, соответственно, определения координат кромки земля-море. В настоящей работе предлагается математическая модель эхо-сигналов кромки земля-море и рассматриваются особенности моделирования этих сигналов.

Локационный сигнал, отраженный от протяженного объекта, в частности от земной или морской поверхности, является случайным процессом. При импульсном режиме локации этот сигнал, наблюдаемый в стробе дальности приемного устройства локатора, представляет собой отрезки случайного узкополосного процесса. Импульсы, отраженные от подстилающей поверхности, характеризуются плотностью распределения вероятностей амплитуды  $A$  или мощности  $P$ , а также спектрально-корреляционными характеристиками. Мощность флюктуаций  $P$  пропорциональна эффективной площади рассеяния облучаемого участка подстилающей поверхности, которая, в свою очередь, прямо пропорциональна удель-

ной отражающей способности «засвечиваемого» локатором участка поверхности и площади этого участка, попадающей в элемент разрешения. Эффективная площадь рассеяния — площадь идеальной площадки, помещенной в точке расположения отражающего объекта перпендикулярно падающему потоку энергии, изотропно рассеивающей всю падающую на нее энергию и при этом создающей в точке приема такую же плотность потока мощности, как и реальный отражающий объект [3].

При аппроксимации плотности распределения вероятностей амплитуды отраженного сигнала многие исследователи используют плотность распределения Рэлея, ссылаясь на тот факт, что в элемент разрешения попадает множество независимых отражателей, которые в силу центральной предельной теоремы «обеспечивают» нормальность квадратур отраженного сигнала, что и приводит к рэлеевскому распределению амплитуд, причем это распределение используется для сигналов, отраженных и морской поверхностью, и от земли. Подобная аппроксимация допустима лишь тогда, когда разрешающая способность локатора невелика. В этом случае «засвечиваемая» площадь значительна, особенно на больших дальностях, и подобная модель приемлема. Однако для современных высокоточных локаторов, локаторов с высоким разрешением, условия центральной предельной теоремы не выполняются, в силу чего распределение амплитуд отличается от рэлеевского, что и подтверждается многочисленными экспериментальными данными.

Для аппроксимации распределения амплитуд сигналов, отраженных подстилающей поверхностью, при исследовании характеристик высокоточных локаторов используют логарифмически-нормальную плотность распределения, плотность распределения Вейбулла, составные распределения и некоторые другие плотности распределения, например,  $K$ -распределение, логарифмическое распределение Вейбулла и т. п. При этом наиболее часто для аппроксимации отражений от морской поверхности используют логарифмически-нормальную плотность, а для отражений от земной поверхности — распределение Вейбулла, поскольку эти распределения не противоречат экспериментальным данным и достаточно просты при их использовании как в теоретических выкладках, так и при синтезе алгоритмов моделирования флуктуаций эхосигналов подстилающих поверхностей.

Распределение Рэлея является частным случаем распределения Вейбулла, но традиционно его рассматривают независимо от распределения Вейбулла, поэтому ниже рассмотрим три распределения.

### Отражения от моря и от поверхности земли. Распределение Рэлея

В тех случаях, когда используют модель подстилающей поверхности в виде множества совместно независимых отражающих элементов, случайно распределенных в элементе разрешения, плотность распределения вероятностей амплитуды отраженного сигнала, как отмечено выше, подчиняется закону Рэлея. Это распределение используется для моделирования флуктуаций амплитуд локационного сигнала, отраженного от поверхности земли и от морской поверхности. Распределение Рэлея запишем в виде

$$f(U) = \frac{A}{\sigma_A^2} \exp\left[-\frac{A^2}{2\sigma_A^2}\right], \quad (1)$$

где  $A$  — амплитуда отраженного сигнала;  $\sigma^2$  — параметр распределения. Числовые характеристики распределения: математическое ожидание, дисперсия и коэффициент вариации — определяются выражениями

$$M(A) = \sigma_A \sqrt{\frac{\pi}{2}}; \quad (2)$$

$$D(A) = \sigma_A^2 \left(2 - \frac{\pi}{2}\right); \quad (3)$$

$$K_A = \frac{\sqrt{D(A)}}{M(A)} \approx 0,52. \quad (4)$$

Плотность мощности результирующего сигнала связана с плотностью распределения вероятностей амплитуды соотношением

$$P = \frac{A^2}{2}, \quad (5)$$

в котором, для согласования размерностей, традиционно полагают, что мощность выделяется на сопротивлении 1 Ом, однако этот размерный коэффициент в соотношении (5) не входит. Данное соглашение (по согласованию размерности) позволяет рассматривать  $P$  и  $A$  как безразмерные величины, это же относится и к параметрам закона.

Из выражения (5) следует, что мощность  $P$  отраженного сигнала распределена по экспоненциальному закону

$$f(P) = \frac{1}{\tilde{P}} \exp\left[-\frac{P}{\tilde{P}}\right] = \frac{1}{\sigma_A^2} \exp\left[-\frac{P}{\sigma_A^2}\right], \quad (6)$$

где  $\tilde{P} = \sigma_A^2$  — средняя мощность отраженного сигнала.

Числовые характеристики экспоненциально-го закона: математическое ожидание, дисперсия и коэффициент вариации — определяются выражениями

$$M(P) = \tilde{P}; \quad (7)$$

$$D(P) = \tilde{P}^2; \quad (8)$$

$$K_P = 1. \quad (9)$$

Средняя мощность отраженного сигнала  $\tilde{P}$  определяется по известному уравнению радиолокации, которое здесь не приводится, поскольку в него входят не только характеристики облучаемой поверхности, но и характеристики локатора и условия наблюдения подстилающей поверхности. Определив  $\tilde{P}$ , мы тем самым определим параметр  $\sigma_A^2 = \tilde{P}$  распределения амплитуд отраженного сигнала, и по выражению (1) теперь легко синтезировать соответствующий алгоритм моделирования.

Существенным ограничением рассмотренной модели является постоянство коэффициента вариации, который на практике может меняться в широких пределах. Логарифмически-нормальное распределение и распределение Вейбулла (кроме экспоненциального и рэлеевского, являющихся частными случаями распределения Вэйбулла) свободны от этого ограничения.

### Отражения от морской поверхности. Логарифмически-нормальное распределение

Логарифмически-нормальное распределение вероятности амплитуд в нашем случае удобно записать в следующем виде:

$$f(A) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_A A} \exp\left[-\frac{(\ln A - \ln \bar{A})^2}{2\sigma_A^2}\right], \quad (10)$$

где  $\sigma_A$  и  $\ln \bar{A}$  — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентом вариации соотношениями

$$M(A) = \bar{A} \exp\left(\frac{\sigma_A^2}{2}\right); \quad (11)$$

$$D(A) = \bar{A}^2 \exp(\sigma_A^2) (\exp(\sigma_A^2) - 1); \quad (12)$$

$$K_A = \sqrt{\exp(\sigma_A^2) - 1}. \quad (13)$$

Это распределение обладает следующим полезным свойством: при возведении случайной величины, распределенной по логарифмически-нор-

мальной плотности, в любую степень полученная случайная величина также имеет логарифмически-нормальное распределение. Осуществляя преобразование (4), получаем логарифмически-нормальное распределение мощности

$$f(P) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_P P} \exp\left[-\frac{(\ln P - \ln \bar{P})^2}{2\sigma_P^2}\right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(2\sigma_A)P} \exp\left[-\frac{\left(\ln P - \ln \frac{\bar{A}^2}{2}\right)^2}{2(2\sigma_A)^2}\right], \quad (14)$$

где  $\sigma_P$  и  $\bar{P}$  — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентом вариации соотношениями, аналогичными (11)–(13), при замене в них  $A$  (включая индексы) на  $P$ .

Из выражения (13) получаем соотношения, связывающие параметры плотностей распределений мощностей и амплитуд:

$$\sigma_P = 2\sigma_A; \quad (15)$$

$$\bar{P} = \frac{\bar{A}^2}{2}. \quad (16)$$

Для определения параметров распределений для конкретных условий наблюдения морской поверхности необходимо определить параметры распределений через среднюю мощность отражений  $\tilde{P}$ , аналогично тому, как это было сделано выше для рэлеевского распределения, и коэффициент вариации мощности  $K_P$ . Из выражений (11)–(13), (15), (16), используя методику, изложенную в работе [4], получаем

$$\sigma_P = \sqrt{\ln(1 + K_P^2)}; \quad (17)$$

$$\bar{P} = \frac{\tilde{P}}{\sqrt{\ln(1 + K_P^2)}}; \quad (18)$$

$$\sigma_A = \frac{\sigma_P}{2} = \frac{1}{2} \sqrt{\ln(1 + K_P^2)}; \quad (19)$$

$$\bar{A} = \sqrt{2\bar{P}} = \frac{\sqrt{2\tilde{P}}}{\sqrt[4]{\ln(1 + K_P^2)}}. \quad (20)$$

Средняя мощность отраженного сигнала  $\tilde{P}$  определяется по известному уравнению радиолокации, которое позволяет учесть и характери-

стики локатора, и условия наблюдения поверхности моря, и состояние морской поверхности [3, 5]. Выражение для коэффициента вариации для разных условий поверхности моря, ее состояния и параметров локатора приведено в работе [6].

**Отражения от земной поверхности.  
Распределение Вейбулла**

Распределение Вейбулла для амплитуд запишем в следующем виде:

$$f(A) = \alpha_A \lambda_A A^{\alpha_A - 1} \exp(-\lambda_A A^{\alpha_A}), \quad (21)$$

где  $\alpha_A$ ,  $\lambda_A$  и  $\sigma_A$  — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентом вариации соотношениями

$$M(A) = \frac{1}{\alpha_A} \lambda_A^{\frac{1}{\alpha_A}} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_A}\right); \quad (22)$$

$$D(A) = \lambda_A^{\frac{2}{\alpha_A}} \left[ \frac{2}{\alpha_A} \Gamma\left(\frac{2}{\alpha_A}\right) - \frac{1}{\alpha_A^2} \Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha_A}\right) \right]; \quad (23)$$

$$K_A = \sqrt{2\alpha_A \frac{\Gamma\left(\frac{2}{\alpha_A}\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha_A}\right)} - 1}, \quad (24)$$

где  $\Gamma(\cdot)$  — гамма-функция.

Это распределение, так же как и логарифмически-нормальное распределение, обладает свойством: при возведении случайной величины, распределенной по закону Вейбулла в любую степень, полученная случайная величина имеет распределение Вейбулла. Осуществляя преобразование (5), получаем соответствующее распределение мощности

$$\begin{aligned} f(P) &= \alpha_P \lambda_P P^{\alpha_P - 1} \exp(-\lambda_P P^{\alpha_P}) = \\ &= \left(\frac{\alpha_A}{2}\right) \left(\lambda_A 2^{\frac{\alpha_A}{2}}\right) P^{\left(\frac{\alpha_A}{2}\right) - 1} \times \\ &\times \exp\left[-\left(\lambda_A 2^{\frac{\alpha_A}{2}}\right) P^{\left(\frac{\alpha_A}{2}\right)}\right], \quad (25) \end{aligned}$$

где  $\alpha_P$  и  $\lambda_P$  — параметры распределения, связанные с математическим ожиданием, дисперсией и коэффициентом вариации соотношениями, аналогичными (22)–(24), при замене в них  $A$  (включая индексы) на  $P$ .

Из выражения (25) сразу получаем соотношения, связывающие параметры плотностей распределений мощностей и амплитуд:

$$\alpha_P = \frac{\alpha_A}{2}; \quad (26)$$

$$\lambda_P = \lambda_A 2^{\frac{\alpha_A}{2}}. \quad (27)$$

Для определения параметров распределений для конкретных условий наблюдения земной поверхности необходимо определить параметры распределений через среднюю мощность отражений  $\tilde{P}$  и коэффициент вариации мощности  $K_P$ . В отличие от логарифмически-нормального распределения, параметры распределения мощности  $\alpha_P$  и  $\lambda_P$  получаем в общем случае из решения системы уравнений

$$\frac{1}{\alpha_P} \lambda_P^{\frac{1}{\alpha_P}} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha_P}\right) = \tilde{P}; \quad (28)$$

$$2\alpha_P \frac{\Gamma\left(\frac{2}{\alpha_P}\right)}{\Gamma^2\left(\frac{1}{\alpha_P}\right)} = 1 + K_P^2. \quad (29)$$

В некоторых частных случаях решение системы можно получить аналитически, выразив в явном виде параметры  $\alpha_P$  и  $\lambda_P$  через мощность отражений  $\tilde{P}$  и коэффициент вариации мощности  $K_P$ . Параметры распределения (21) определяются путем обращения выражений (26) и (27). Численные значения удельных эффективных площадей рассеяния для различных поверхностей земли, а также значения соответствующих коэффициентов вариации можно найти в работах [5–8].

**Отражения от кромки земля-море.  
Составное векторное распределение**

В том случае, когда в элемент разрешения бортовой (спутниковой) РЛС попадают участки и земной поверхности, и моря, распределение амплитуды суммарного сигнала будет отличаться от рассмотренных выше распределений. Здесь наблюдаемый сигнал будет представлять собой векторную сумму сигналов, отраженных от фрагментов земной поверхности и моря, попавших в элемент разрешения РЛС.

Пусть площадь элемента разрешения РЛС равна  $S$ , и в этот элемент попадают фрагменты участков морской  $S_M$  и земной  $S_3$  поверхностей, т. е.

$$S = S_M + S_3 = \gamma S + (1 - \gamma) S, \quad (30)$$

где  $S_m = \gamma S$  и  $S_3 = (1 - \gamma)$  — площади соответствующих участков. Тогда средние мощности сигналов, отраженных от этих фрагментов, пропорциональны коэффициентам  $\gamma$  и  $(1 - \gamma)$ . Поэтому параметры закона (14) вычисляются по выражениям (17) и (18) при замене в выражении (18)  $\tilde{P}$  на  $\gamma\tilde{P}$ , а параметры закона (25) — по выражениям (28) и (29) при замене в выражении (28)  $\tilde{P}$  на  $(1 - \gamma)\tilde{P}$ . Соответственно, аналогично корректируются параметры законов (10) и (21), определяющих флюктуации амплитуд отраженных сигналов [9].

Алгоритм моделирования отражений от кромки может быть представлен в разных видах. Запишем алгоритм пошагово, считая, что в нашем распоряжении имеется датчик псевдослучайных чисел, равномерно распределенных на интервале  $(0, 1)$ ,  $k$ -равномерность которого не менее пяти. При этом считаем, что все радиолокационные характеристики, определяющие мощность отраженных сигналов от фрагментов элемента разрешения, с учетом условий наблюдения, параметров локатора, состояния морской поверхности и типа земной поверхности вычислены [10].

### Алгоритм моделирования

**Шаг 1.** Определяется (или задается) деление элемента разрешения на области отражений от моря и земной поверхности, которое определяет коэффициент  $\gamma$ .

**Шаг 2.** Вычисляются по выражениям (17)–(20), с учетом замены  $\tilde{P}$  на  $\gamma\tilde{P}$ , параметры закона распределения (10)  $\sigma_A^{(m)}$  и  $\bar{A}^{(m)}$ , где верхний индекс в скобках определяет отражения от морской поверхности.

**Шаг 3.** Вычисляются по выражениям (26)–(28), с учетом замены  $\tilde{P}$  на  $(1 - \gamma)\tilde{P}$ , параметры закона распределения (21)  $\alpha_A^{(3)}$  и  $\lambda_A^{(3)}$ , где верхний индекс в скобках определяет отражения от земной поверхности.

**Шаг 4.** Вычисляются  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$  — псевдослучайные, совместно независимые числа, равномерно распределенные на интервале  $(0, 1)$ .

**Шаг 5.** Вычисляется амплитуда  $A_{(m)}$  сигнала, обусловленного отражениями от фрагмента морской поверхности:

$$A_{(m)} = \bar{A}^{(m)} \exp(\sigma_A^{(m)} \sqrt{2 \ln \varepsilon_1} \cos(2\pi \varepsilon_2)),$$

где нижний индекс в скобках определяет отражения от морской поверхности.

**Шаг 6.** Вычисляется амплитуда  $A_{(3)}$  сигнала, обусловленного отражениями от фрагмента земной поверхности

$$A_{(3)} = \alpha_A^{(3)} \sqrt{-\frac{1}{\lambda_A^{(3)}} \ln \varepsilon_3},$$

где нижний индекс в скобках определяет отражения от земной поверхности.

**Шаг 7.** Вычисляется амплитуда  $A$  сигнала, обусловленного отражениями от кромки земля-море:

$$A = \sqrt{A_{(3)}^2 + A_{(m)}^2 + 2A_{(3)}A_{(m)} \cos(2\pi \varepsilon_4)},$$

при этом полагаем, что разность фаз векторов сигналов, отраженных от фрагментов земной и морской поверхности, равномерно распределена на интервале  $(0, 2\pi)$ .

Представленный алгоритм моделирования при  $\gamma = 1$  формирует сигнал, отраженный только от морской поверхности, а при  $\gamma = 0$  — только от земной, так как соответствующие амплитуды при вычислении параметров, с учетом значения коэффициента  $\gamma$ , обнуляются. Следует отметить, что представленный подход позволяет в алгоритме при соответствующей модификации использовать и другие аппроксимации законов распределения флюктуаций.

### Выводы

Получен алгоритм, позволяющий моделировать локационные сигналы, отраженные от морской поверхности, от поверхности земли и от кромки земля-море. В качестве законов распределения амплитуд и мощностей сигналов, отраженных от подстилающих поверхностей, использованы логарифмически-нормальный закон для отражений от морской поверхности и закон распределения Вейбулла для отражений от земной поверхности. Методика синтеза алгоритма позволяет использовать и другие законы распределения. С практической точки зрения подобные алгоритмы могут использоваться при моделировании процессов картографирования береговой зоны, обнаружения наземных и морских объектов, а также при моделировании процессов посадки гидросамолетов вблизи портов.

### Литература

1. Изранцев В. В., Шепета Д. А. Моделирование внешних сигналов бортовых приборных комплексов летательных аппаратов пятого поколения // Изв. вузов. Приборостроение. 2000. № 2. С. 76–83.

2. Шалыгин А. С., Палагин Ю. И. Прикладные методы статистического моделирования. — Л.: Машиностроение; Ленинградское отделение, 1986. — 320 с.  
3. Блаунштейн Н. Ш., Сергеев М. Б., Шепета А. П. Прикладные аспекты электродинамики. — СПб.: Аграф+, 2016. — 272 с.

4. Исаков В. И., Подоплекин Ю. Ф., Шепета Д. А. Марковская модель флуктуаций амплитуд и длительностей эхо-сигналов крупных надводных объектов // *Морской вестник*. 2016. № 3 (59). С. 49–50.
5. Подоплекин Ю. Ф., Ненашев В. А., Шепета Д. А. Моделирование входных сигналов бортовой РЛС, обусловленных отражениями зондирующего сигнала от подстилающих поверхностей земли и моря // *Морской вестник*. 2016. № 4. С. 69–71.
6. Тверской Г. Н., Терентьев Г. К., Харченко И. П. Имитаторы эхо-сигналов судовых радиолокационных станций. — Л.: Судостроение, 1973. — 228 с.
7. Кулемин Г. П. Радиолокационные помехи от моря и суши РЛС сантиметрового и миллиметрового диапазонов // Тр. Междунар. науч.-техн. конф. (докл.). Киев: АН Украины, НПО Квант. 1994. Вып. 1. С. 23–29.
8. Верба В. С. Справочник по радиолокации / под ред. М. И. Скольника; пер. с англ. под общ. ред. В. С. Вербы. В 2 кн. Кн. 2. — М.: Техносфера, 2015. — 680 с.
9. Shepeta A. P., Nenashev V. A. Modeling Algorithm for SAR Image Based on Fluctuations of Echo Signal of the Earth's Surface // *Proc. of SPIE Remote Sensing*, Toulouse, France, 2015. Vol. 9642. P. 96420X-1–96420X-8.
10. Кузьмин А. В., Поспелов М. Н., Садовский И. Н. Микроволновые радиометрические исследования морской поверхности в прибрежной зоне Черного моря // Сб. ст. М.: ГРАНП-Полиграф, 2005. С. 103–110.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.89

### Simulation of Radar Signals Reflected from the Edge of Land and Sea

Isakov V. I.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, ivi@guap.ru

Shepeta D. A.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, dima@shepeta.com

<sup>a</sup>Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaia St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Mathematical models of echo signals from underlying surfaces of the land and sea are used in synthesis and analysis of aircraft onboard radars which carry out the search, detection and tracking of objects. In these cases, the echoes are noise on whose background the information signals are selected and processed. When approximating the density of the reflected signal amplitude probability distribution, many researchers use the Rayleigh distribution density. To approximate the amplitude distribution of signals reflected by an underlying surface, the studies of high-precision radars characteristics often use log-normal distribution density, Weibull distribution density, compound distributions and some other distribution densities. **Purpose:** We develop a universal algorithm to simulate the fluctuations of radar signals reflected from the edge of land and sea. **Results:** We have obtained a simulation algorithm which allows you to simulate the fluctuations of a signal reflected from the edge of land and sea. As the distribution laws for amplitude and power of the signals reflected from underlying surfaces, we used the log-normal law for the reflections from the sea, and the Weibull distribution law for the reflections from the land. The algorithm synthesis technique allows you to use other distribution laws, too. The simulation algorithms for the signals reflected from the land or sea are special cases of the presented algorithm. **Practical relevance:** This algorithm can be used in the development of coastline mapping equipment, as well as in testing flarecraft takeoff and landing modes near ports.

**Keywords** — Model, Radar Signal, Edge of Land and Sea.

### References

1. Izrantsev V. V., Shepeta D. A. Simulation of External Signals on-Board Instrument Systems for Aircraft of the Fifth Generation. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2000, no. 2, pp. 76–83 (In Russian).
2. Shalygin A. S., Palagin Y. I. *Prikladnye metody statisticheskogo modelirovaniia* [Applied Methods of Statistical Modeling]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1986. 320 p. (In Russian).
3. Blaunstein N. S., Sergeev M. B., Shepeta A. P. *Prikladnye aspekty elektrodinamiki* [Applied Aspects of Electrodynamics]. Saint-Petersburg, Agraf+ Publ., 2016. 272 p. (In Russian).
4. Isakov V. I., Podoplekin Y. F., Shepeta D. A. Markov Model of the Fluctuations of the Amplitudes and Durations of the Echo-signals of Large Surface Objects. *Morskoi vestnik* [Bulletin of Marine], 2016, no. 3 (59), pp. 49–50 (In Russian).
5. Podoplekin Y. F., Nenashev V. A., Shepeta D. A. Modeling of Input Signals to Onboard Radar, due to the Accumulated Reflections of the Probing Signal from the Underlying Surfaces of the Earth and Sea. *Morskoi vestnik* [Bulletin of Marine], 2016, no. 4, pp. 69–71 (In Russian).
6. Tverskoy G. N., Terentyev G. K., Kharchenko I. P. *Imitatory ekho-signalov sudovykh radiolokatsionnykh stantsii* [Imitators Echoes of Ship Radar Stations]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1973. 228 p. (In Russian).
7. Kulemin G. P. Radar Clutter from Land and Sea Radar in the Centimeter and Millimeter. *Trudy Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii (doklady)* [Proc. of Intern. Scientific-Technical Conf. (reports)]. Kiev, AN Ukrainy, NPO Kvant Publ., 1994, vol. 1, pp. 23–29 (In Russian).
8. Verba V. S. *Spravochnik po radiolokatsii* [Handbook of Radar]. M. I. Skolnick ed. In 2 books. Book 2. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2015. 680 p. (In Russian).
9. Shepeta A. P., Nenashev V. A. Modeling Algorithm for SAR Image Based on Fluctuations of Echo Signal of the Earth's Surface. *Proc. of SPIE Remote Sensing*, Toulouse, France, 2015, vol. 9642, pp. 96420X-1–96420X-8.
10. Kuzmin A. V., Pospelov M. N., Sadovsky I. N. Microwave Radiometric Investigations of the Sea Surface in the Coastal Zone of the Black Sea. *Sbornik statei* [Collection of Articles]. Moscow, GRANP-Poligraf Publ., 2005, pp. 103–110 (In Russian).

# ОБЗОР АЛГОРИТМОВ КОРРЕЛЯЦИИ СОБЫТИЙ БЕЗОПАСНОСТИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СРЕД

Е. С. Новикова<sup>а, б</sup>, канд. техн. наук, доцент

Я. А. Бекенева<sup>а</sup>, инженер

А. В. Шоров<sup>а</sup>, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник

Е. С. Федотов<sup>а</sup>, аспирант

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, РФ

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

**Постановка проблемы:** повышение сложности атак на облачные системы влечет за собой необходимость разработки механизмов защиты, способных анализировать события безопасности, в том числе разнесенные во времени. Кроме того, возникает необходимость в осуществлении проверки достоверности генерируемых событий безопасности, а также сопоставления критичности событий безопасности с уровнем критичности контролируемых ресурсов. В связи с этим необходимо в системе управления информационной безопасностью облачной инфраструктуры использовать модуль корреляции событий безопасности от разных сенсоров безопасности и сетевых устройств инфраструктуры в качестве ключевого компонента системы. **Цель:** анализ подходов к корреляции событий безопасности для обеспечения безопасности в облачных инфраструктурах. **Результаты:** анализ основных алгоритмов корреляции событий, а также существующего программного обеспечения, выполняющего корреляцию событий безопасности, показал, что можно выделить три основных подхода к их построению: на основе подобия событий безопасности, на основе знаний и вероятностные. Определены следующие критерии оценки эффективности разработанных методик: возможность анализа данных от разных сенсоров безопасности, требования к наличию предварительных знаний для функционирования модели корреляции, точность корреляции, обнаружение многошаговых и новых типов атак. Представлен сравнительный анализ рассмотренных подходов к корреляции событий безопасности. **Практическая значимость:** результаты исследований полезны при разработке механизмов защиты облачных вычислительных сред от сетевых атак, в том числе устойчивых целенаправленных угроз. Использование корреляции событий безопасности позволит средствам защиты более точно расставлять приоритеты событиям безопасности и своевременно реагировать на них.

**Ключевые слова** — безопасность облачных технологий, события безопасности, корреляция событий безопасности, алгоритмы корреляции событий.

## Введение

Системы облачных вычислений пользуются большой популярностью как в крупных, так и небольших организациях благодаря легкому конфигурированию вычислительных устройств, гибкости и эластичности предоставляемых облачных сервисов и ощутимой экономической выгоды их использования. Вместе с тем разделение общих вычислительных ресурсов, возможность совместного использования услуг между арендаторами повышает требования к обеспечению безопасного использования информационных ресурсов системы облачных вычислений. Одними из важнейших характеристик таких систем являются их бесперебойное функционирование и защищенность данных пользователей. В связи с этим возрастает необходимость в развитии систем их защиты от различных угроз, включая сложные целевые атаки, выполняемые в несколько этапов, часто разнесенных во времени. Обнаружение таких атак требует тщательного анализа событий безопасности, получаемых от различных датчиков безопасности и объектов облачной инфраструктуры за длитель-

ный период времени. Многие современные системы обнаружения вторжений не способны установить взаимосвязи между событиями безопасности в виде последовательности этапов выполнения атаки, так как не имеют инструментов анализа текущих угроз во временном контексте [1]. В большинстве случаев оценка достоверности генерируемых событий безопасности не осуществляется, а критичность события безопасности часто не зависит от уровня критичности контролируемых ресурсов. Корреляция этих двух показателей позволила бы администратору безопасности более точно расставлять приоритеты событиям безопасности для своевременного реагирования на них. Для устранения этих недостатков в системах управления информационной безопасностью предлагается использовать в качестве составного компонента модуль корреляции событий безопасности.

Основными задачами методик корреляции являются:

- 1) снижение объема исходного потока событий безопасности за счет группирования взаимосвязанных событий, что позволяет снизить когнитивную нагрузку на аналитика;

2) определение взаимосвязей между событиями от разнородных источников, что способствует лучшему пониманию развития атаки в информационной системе;

3) корреляция событий в контексте системы, что позволяет лучше понять сценарий атаки, ее цели и задачи [2]. Существуют различные схемы классификации разработанных методик корреляции событий, незначительно отличающиеся друг от друга [1–3]. В целом можно выделить три основные группы исходя из их особенностей реализации и решаемых с их помощью задач корреляции:

- на основе подобия (сходства) событий безопасности;
- на основе знаний;
- вероятностные (или статистические).

Следует отметить, что представленная классификация алгоритмов корреляции данных не является достаточно точной, поскольку некоторые алгоритмы могут быть отнесены сразу в несколько категорий.

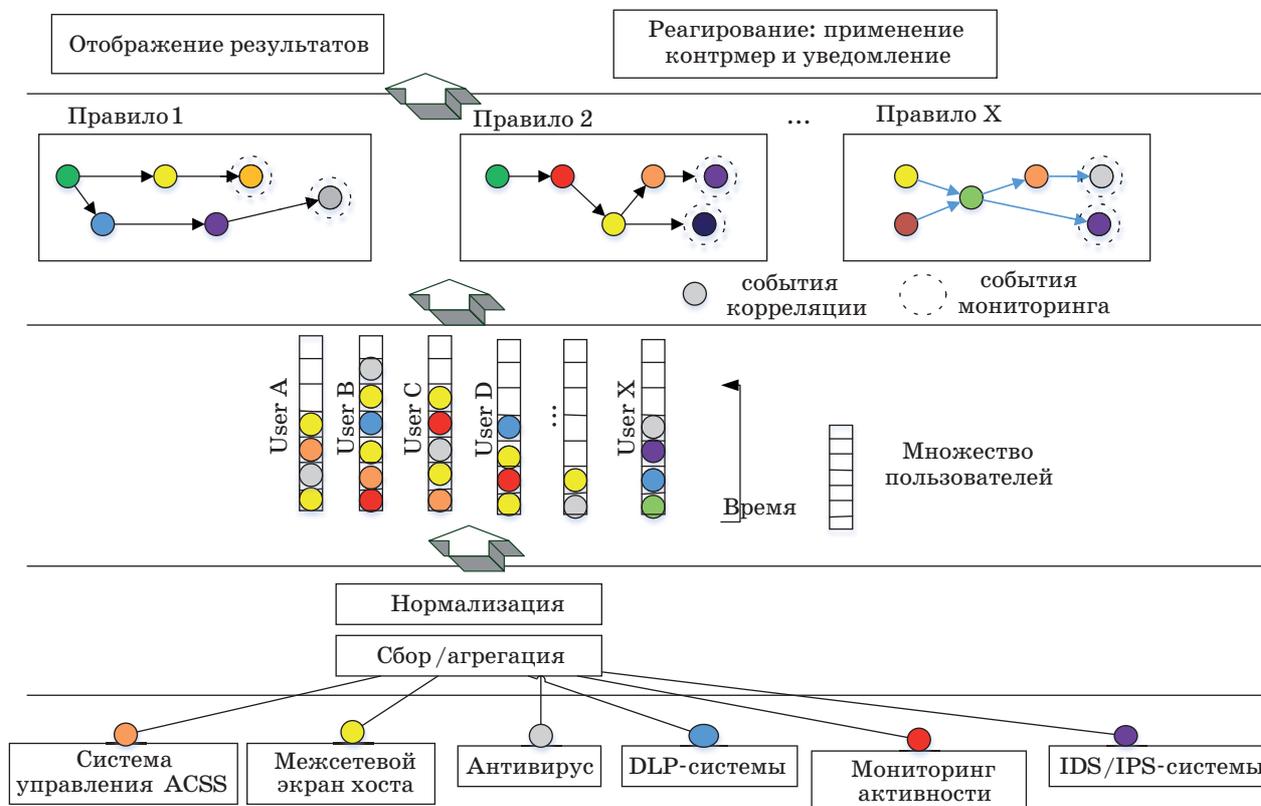
В настоящей работе рассматриваются основные алгоритмы корреляции событий, оценивается их способность выявлять сложные целенаправленные атаки, а также представляется существующее программное обеспечение, выполняющее корреляцию событий безопасности.

### Алгоритмы на основе подобия событий безопасности

Алгоритмы на основе подобия событий безопасности базируются на вычислении показателя подобия, позволяющего выполнить сравнение двух событий безопасности или одного события с группой событий безопасности. Если уровень подобия превышает или равен некоторому заданному пороговому значению, то события объединяются в одно метасобытие. Таким образом, целью этих алгоритмов является агрегирование событий во времени или построение обобщающих иерархий событий. Основным преимуществом алгоритмов этой группы является отсутствие необходимости точного определения типа атак, и корреляция события может быть выполнена только на определении показателя подобия для атрибутов событий безопасности.

### Определение подобия на основе правил

Основная идея этого подхода заключается в применении достаточно простых правил для описания взаимосвязей между атрибутами событий, которые могут быть связаны между собой. На рис. 1 представлена общая схема корреляции событий безопасности на основе правил [4].



■ **Рис. 1.** Общая схема корреляции событий безопасности на основе правил  
 ■ **Fig. 1.** General scheme of rule-based event correlation

На первом этапе формируется множество правил, которые устанавливают связи между событиями безопасности для пользователей в системе, имеющей определенную роль в информационной системе. Далее при появлении контролируемых событий срабатывают определенные правила, которые в свою очередь могут инициировать срабатывание других правил, на основе которых делается заключение о выполнении атаки определенного типа. Конечный результат корреляции событий заключается в применении контрмер, заданных для каждого типа атаки, и его представлении в графическом виде администратору сетевой безопасности. Обычно описывают правила взаимосвязи между атрибутами данных трех уровней [5]:

- уровень данных (data level) — правила, работающие непосредственно с сырыми данными;

- уровень знаний (knowledge level) — правила, описывающие специфику предметной области и позволяющие работать с метасобытиями более высокого уровня;

- уровень управления (control level) — правила, непосредственно описывающие логический вывод на основе событий безопасности, т. е. это «сердце» модуля корреляции.

Очевидно, что эффективность таких систем зависит только от качества применяемых правил.

#### **Определение подобию на основе кодовой книги**

Клигер и др. [6] представили систему, целью которой является локализация возникающих проблем в системе на основе выбора некоторого подходящего подмножества событий-«симптомов», связанных с этими проблемами. Подмножество событий-«симптомов» и является содержанием кодовой книги. Для каждой проблемы создается некоторый двоичный вектор, который определяет, является некоторое событие признаком некоторой проблемы или нет, и записывается в кодовую книгу. Для выявления проблем все события, представленные в кодовой книге, отслеживаются в режиме реального времени. При наступлении некоторого события вектор события сравнивается с множеством векторов из кодовой книги, выбирается вектор, у которого расстояние Хемминга между ним и вектором события является минимальным. Благодаря такому решению система всегда выдает некоторое предположение о возможной проблеме. Очевидным недостатком данного подхода является невозможность учесть время между наступлением двух различных событий, что является важным параметром при установлении временных связей между событиями.

#### **Определение подобию событий с использованием алгоритмов машинного обучения**

В последнюю категорию вошли алгоритмы, в которых мера подобию между событиями определяется автоматически с помощью алгоритмов машинного обучения. В основном для решения этой задачи используются алгоритмы классификации из работы [7] и нейронные сети [8]. Так, например, для кластеризации событий используются деревья решения [7]. Причем данный алгоритм может применяться дважды — для определения похожих событий безопасности и для определения последствий атаки. Для корректного построения дерева решений и, соответственно, корректного функционирования самого алгоритма корреляции событий требуется обучающая выборка значительного размера, содержащая возможные сценарии атак. Появление новых данных, описывающих новые сценарии атак, требует переобучения модели анализа, что значительно снижает гибкость и расширяемость алгоритма.

В работе [8] классификация событий безопасности осуществляется с помощью нейронной сети и кластеризации, благодаря чему снижается число предупреждений, требующих ручной обработки. Однако авторы работ [1, 3] отмечают, что из-за отсутствия прозрачности в функционировании и обучении нейронных сетей они не очень популярны для построения инструментов корреляции событий.

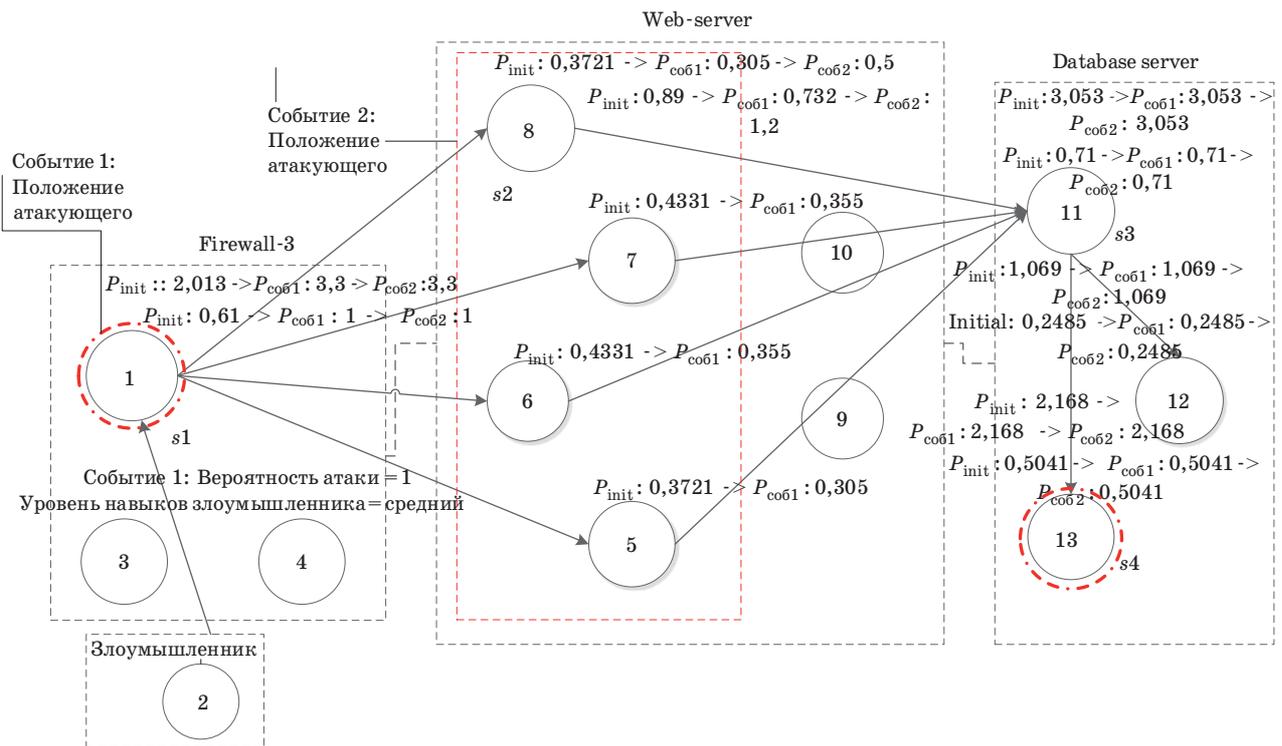
#### **Алгоритмы на основе знаний**

К этой категории относятся алгоритмы корреляции знаний, которые функционируют на основе описаний возможных сценариев атак или принципов функционирования контролируемой системы. Входящие в эту категорию алгоритмы можно разделить на две подгруппы.

#### **Алгоритмы на базе предпосылок и последствий**

Алгоритмы данной подкатегории отслеживают значение возникающих событий безопасности, оценивают состояние сети, после чего диагностируют наличие вторжения или какой-либо другой проблемы. Для того чтобы установить взаимосвязи между различными этапами атак, выражаемыми в виде цепочки некоторых событий безопасности, предполагается использование 1) базы данных, описывающих топологию сети, конфигурацию ее узлов; 2) базы знаний, которая для каждого события безопасности содержит описание его всех возможных предпосылок и последствий его наступления [9–11].

Обычно в этих алгоритмах события моделируются с помощью логики первого порядка.



■ **Рис. 2.** Пример сценария атаки  
 ■ **Fig. 2.** Example of an attack scenario

Результат их работы может быть представлен в виде графа возможных событий и связей между ними. В работе [9] предложено расширение данного подхода для определения элементов атак, которые не были диагностированы датчиками безопасности. Сценарий атаки (рис. 2), построенный с помощью системы, представленной в работе [11], отображается в виде связного графа, вершинами которого являются атакующие действия злоумышленника, ребра обозначают возможную последовательность появления таких событий. Возможность выполнения атакующего действия связана с наличием уязвимостей программного обеспечения, сложность эксплуатации которых определяет исходную вероятность их наступления. Для каждого события исходная вероятность его наступления указана как  $P_{init}$ . Вершины графа (s1–s4) отражают последовательность действий злоумышленника, обладающего средним уровнем технических навыков. Вероятности  $P_{cob1}$  и  $P_{cob2}$  обозначают вероятности наступления событий после того, как в системе были зарегистрированы события 1 и 2, произошедшие на межсетевом экране Firewall-3 и на веб-сервере Web-server соответственно. Штрихпунктирной линией на графе выделены узлы, обозначающие исходное положение злоумышленника (вершина 1) и наиболее вероятное конечное событие в результате атаки (вершина 13).

### Алгоритмы на основе сценариев атак

Основным назначением этого множества алгоритмов является определение многошаговых атак. Примеры таких алгоритмов представлены в работах [12–15]. Для описания сценариев атак предложены различные языки (Statl [14], ADeLe [15]), однако их общая идея заключается в описании этапа атаки, необходимых условий для его выполнения и цели. Алгоритмы этой группы оперируют знаниями более высокого уровня по сравнению с алгоритмами на основе предпосылок и последствий, поскольку последние функционируют на уровне событий безопасности.

### Вероятностные алгоритмы корреляции событий безопасности

В основе этой группы алгоритмов лежит предположение, что атаки имеют общее статистическое распределение атрибутов, и корректная классификация атак может быть выполнена на основе оценки распределения значений атрибутов в сетевом трафике. В общем случае алгоритмы этой группы формируют базу причинно-следственных связей между различными событиями безопасности, анализируя частоту их возникновения в контролируемой системе во время периода обучения системы и строя возможные сценарии атаки. Непараметрические статистические алгоритмы не

требуют никакой априорной информации о возможных сценариях атак. Алгоритмы этой группы также могут быть разделены на две подгруппы. Алгоритмы первой подгруппы строят статистическую модель сетевого трафика, а алгоритмы второй подгруппы оценивают причинно-следственную связь между событиями безопасности.

### **Построение статистической модели сетевого трафика**

Целью алгоритмов, представленных в работе [16], является создание статистической модели сетевого трафика, прогнозирование и исключение предсказуемых ситуаций. Важной особенностью данных алгоритмов является возможность диагностирования событий, которые возникают периодически по причине вероятных некорректных сетевых настроек или политик безопасности. Алгоритмы этой группы обычно не требуют данных о контролируемой системе, их функционирование определяется статистическими данными, сформированными на этапе обучения. В большинстве случаев обучение осуществляется в режиме реального времени, поэтому подстройка алгоритмов к изменениям в конфигурации информационной системы осуществляется достаточно просто и гибко.

В работе [17] представлен подход к корреляции событий безопасности, в основе которого лежат алгоритмы поиска ассоциативных правил для выявления событий безопасности, которые обычно возникают совместно. Важной особенностью данной подгруппы алгоритмов является определение приоритетов событий безопасности на основе того факта, является ли выявленная комбинация событий характерной для данной системы или представляет собой новый паттерн атаки. Кроме того, алгоритмы поиска ассоциативных правил могут быть использованы для формирования связанных метасобытий безопасности.

### **Оценка причинно-следственной связи между событиями**

В основе алгоритмов этой подгруппы лежит построение возможной модели, определяющей корреляционные связи между событиями безопасности. Например, в работах [18–21] построение причинно-следственных связей между событиями осуществляется путем оценивания влияния заданного события в процессе предсказания появления других событий безопасности. Особенность предложенных методик заключается в том, что для построения моделей анализа не требуется дополнительная информация о контролируемой системе. Как и в предыдущей подгруппе алгоритмов, для получения точной и надежной модели требуется большое количество исторических данных со сценариями атак.

В работе [19] для построения вероятностных моделей используются байесовские сети.

Авторы работы [20] для определения вероятностных зависимостей между событиями безопасности используют скрытые марковские цепи. Отличительной характеристикой предложенного алгоритма является возможность оценки вероятности каждого сценария атак и выполнения каждого этапа атаки на основе предыдущих шагов. Вероятности оцениваются на основе обучающей выборки, например, исторических данных об атаках на контролируруемую систему, поэтому для обучения модели анализа требуется большое количество данных, содержащих правильно категоризированные сценарии атак.

### **Сравнительный анализ рассмотренных подходов к корреляции событий безопасности**

Чтобы описать достоинства и недостатки рассмотренных подходов для применения в системах управления информационной безопасностью, были выделены следующие критерии оценки:

- возможности, заключающиеся в способности алгоритмов агрегировать схожие события, выявлять последовательность событий от разных сенсоров безопасности и сетевых устройств, образующих единый сценарий атаки;
- необходимость применения базы знаний, определяющей корректность функционирования системы обнаружения атак;
- точность подхода, заключающаяся в способности алгоритмов обнаруживать атаки и прогнозировать их развитие;
- гибкость и расширяемость, оценивающая уровень адаптируемости модуля корреляции событий алгоритмов к появлению новых видов атак и возможность настройки параметров корреляции пользователем;
- вычислительная эффективность алгоритмов, определяющая мощность вычислительных ресурсов, требуемых для выполнения корреляции событий безопасности в целях выявления атак.

Алгоритмы на основе подобию событий безопасности в меньшей степени требуют контекстной информации о предметной области, о возможных сценариях атак в частности, поскольку они выполняют корреляцию данных на основе анализа подобию атрибутов события безопасности, что делает их более универсальными по сравнению с методиками корреляции на основе знаний, которые предполагают наличие данных о конфигурации устройств сети, ее топологии, установление зависимостей между используемыми сетевыми сервисами. Очевидно, результативность алгоритмов как на основе знаний, так

и на основе правил сильно зависит от корректности описания используемых правил, семантической нагрузки событий безопасности, поэтому их разработка требует непосредственного участия экспертов в информационной безопасности. Исключения составляют методики корреляции на основе правил, в которых взаимосвязи между атрибутами событий безопасности устанавливаются с помощью методик машинного обучения. Однако в этом случае результаты корреляции не являются «прозрачными» для конечного пользователя, и, как показали исследования различных SIEM-систем, механизмы валидации корректности функционирования моделей корреляции данных отсутствуют [22–25]. Определение существующих сценариев атак, как и установка предпосылок и последствий, является нетривиальной задачей, качество решения которой определяется в первую очередь полнотой исходных данных о предметной области. Исследования показали, что сложность графа атак, построенного для компьютерной сети, состоящей из  $n$  узлов, только на основе данных о топологии, конфигурации ее узлов без учета существующих зависимостей между сетевыми сервисами составляет  $O(sc n^2)$ , где  $c$  — это среднее число уязвимостей для одного хоста,  $s$  — среднее число условий на хосте, обеспечивающих реализацию атаки [26]. Это определяет достаточно высокие требования к вычислительным мощностям устройств при выполнении корреляции событий в режиме реального времени. Вместе с тем именно алгоритмы на основе сценариев атак или графов атак способны выявлять сложные многошаговые атаки, объединяя множество событий безопасности, зарегистрированных на разных узлах компьютерной сети в различные периоды времени, в единую последовательность, описывающую действия злоумышленника.

Высокой точностью — низким уровнем ошибок, обнаружением ложноположительных срабатываний сенсоров безопасности — обладают алгоритмы, требующие исходных данных в виде экспертных знаний. В первую очередь к ним относятся алгоритмы на основе сценариев атак и предпосылок-последствий, во вторую — алгоритмы на основе подобию. Существенным недостатком этих двух подходов является их неспособность выявлять новые типы атак, использующие неизвестные на момент разработки модели корреляции данных уязвимости программного обеспечения, ошибки настроек сетевых устройств. Таким образом, для адаптации модуля корреляции к появлению новых, уже выявленных атак необходимо осуществлять регулярное обновление баз используемых правил, а в случае использования алгоритмов на основе сценариев атак и графов атак — обновлять структуру графа

атак при любом изменении конфигурации компьютерной сети, настроек сетевых устройств и обнаруженных уязвимостей программного обеспечения.

Способностью обнаруживать новые сценарии атак обладают вероятностные методы корреляции, поскольку в их основе лежит построение статистической модели функционирования исследуемой сети, и любое отклонение от нее может быть расценено как возможное действие злоумышленника. Кроме того, они обладают достаточно высокой эффективностью [1]. А вот общая точность этой группы алгоритмов корреляции невысока в связи с изменчивостью модели «нормального» функционирования компьютерной сети.

Обобщенная сравнительная характеристика подходов дана в табл. 1.

Следует отметить, что на практике в основном применяются методы корреляции событий на основе правил подобию и кодовой книги [22–24,

- **Таблица 1.** Сравнительный анализ подходов к корреляции событий безопасности
- **Table 1.** Comparative analysis of approaches to the security events correlation

Характеристика	Алгоритмы		
	на основе подобию	на основе знаний	вероятностные
Комбинация событий безопасности от разных датчиков безопасности	Да	Да	Да
Требование предварительных знаний (обучение алгоритма)	Да	Да	Нет
Точность (обнаружение ложных событий безопасности)	Да	Да	Предположение
Обнаружение многошаговых атак	Едва ли	Да	Предположение
Обнаружение новых атак	Нет	Нет	Да
Уровень ошибок	Средний	Низкий	Высокий
Вычислительная эффективность	Высокая	Низкая	Средняя
Гибкость и расширяемость	Высокая	Высокая	Низкая

27], что объясняется в первую очередь их высокой вычислительной эффективностью и точностью, проблема обнаружения новых сценариев атак решается путем регулярного обновления баз знаний. Авторы считают достаточно перспективными также вероятностные методы корреляции, которые обладают как низкой вычислительной эффективностью, так и способностью к выявлению новых типов атак, что в сочетании с методиками на основе подобия позволит не допустить возникновения ситуаций пропуска атак в силу их новизны.

**Программное обеспечение с открытым кодом, выполняющее корреляцию событий**

**Инструмент корреляции потоков событий Borealis**

Инструмент корреляции событий Borealis [28] является распределенной системой корреляции потоковых данных в режиме реального времени. Одним из основных достоинств данной системы является оптимизация распределенной обработки, развертывание сети взаимодействующих модулей корреляции потоковых данных, которые осуществляют распределение входных данных по доступным вычислительным узлам, обеспечивая целостность данных даже при динамическом изменении сети модулей. Правила корреляции (запросы) описываются с помощью языка разметки XML.

Особенностью инструмента является возможность изменения запросов (правил) в динамике. Динамическое перестроение запросов необходимо при исправлении ошибок, возникающих в результате функционирования модуля корреляции, для получения более точных результатов. Кроме того, эта возможность полезна при обработке данных, которые могут поступать с определенными задержками, что достаточно характерно для датчиков, создающих потоковые данные.

Borealis имеет графическую подсистему, которая позволяет: 1) редактировать правила-запросы; 2) отслеживать топологию сети узлов Borealis в динамике.

**Инструмент корреляции событий Simple Event Correlator**

Инструмент Simple Event Correlator (SEC) [29] является движком корреляции события с открытым кодом, написанным на языке Perl. Использование языка программирования Perl обеспечивает кроссплатформенность приложения.

В основе корреляции событий лежит подход на основе правил. Правила могут быть описаны

как в виде текста, так и с помощью конструкций языка Perl.

Инструмент SEC поддерживает достаточно большой набор базовых операций по корреляции событий: выявление события или пары событий по шаблону и реакция на него (SingleWithScript, SingleWithSuppress, Pair, PairWithWindow), отслеживание интенсивности появления события в течение некоторого интервала времени (SingleWithThreshold, SingleWith2Thresholds), запуск скриптов по графику и т. д.

**Инструмент корреляции событий Esper**

Инструмент Esper [30] является компонентом корреляции событий с открытым кодом, написанным на языке Java, и предназначен для разработки приложений, обрабатывающих события в режиме реального времени.

Esper является инструментом общего назначения и применяется для решения задач автоматизации и управления бизнес-процессами, обслуживания, мониторинга сетевого трафика и контроля приложений.

Правила создаются с помощью SQL-подобного языка, известного как EQL. Его конструкции обеспечивают обнаружение заданных шаблонов событий в режиме реального времени, поддерживают корреляцию событий во времени.

В табл. 2 представлены наиболее широко используемые инструменты общего назначения корреляции событий и их основные характеристики.

Все рассмотренные инструменты корреляции событий используют подход на основе правил.

■ **Таблица 2.** Основные свойства инструментов корреляции  
 ■ **Table 2.** Basic features of correlation tools

Программное обеспечение	Корреляция событий на основе правил	Особенности
Borealis	На основе языка разметки XML	Распределенный процесс корреляции, изменение правил в динамике
SEC	В текстовом виде	Сложная корреляция данных, представленных в текстовом виде, на основе простых операций
Esper	Sql-подобный запрос	Высокопроизводительная обработка потоковых данных (событий)

Выделенные особенности могут быть полезны при выборе инструмента для решения конкретных задач.

### Заключение

Представлены алгоритмы событий безопасности, проведен сравнительный анализ подходов к корреляции событий. Рассмотрено существующее программное обеспечение, осуществляющее корреляцию событий безопасности,

проведен сравнительный анализ инструментов корреляции и их характеристик. Результаты исследования будут использованы при разработке механизмов защиты облачных вычислительных сред.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания «Организация научных исследований», задание #2.6113.2017/6.7, а также гранта РФФИ № 16-07-00625.

### Литература

1. **Mirheidari S. A., Arshad S., Jalili R.** Alert Correlation Algorithms: A Survey and Taxonomy // Proc. of 5th Intern. Symp. on Cyberspace Safety and Security (CSS 2013), Zhangjiajie, China, Nov. 13–15, 2013. LNCS, 2013. Vol. 8300. P. 183–197.
2. **Valdes A., Skinner K.** An Approach to Sensor Correlation // Proc. of the Recent Advances in Intrusion Detection (RAID-2000), Toulouse, 2000. [https://www.researchgate.net/profile/Alfonso\\_Valdes/publication/228523518\\_An\\_approach\\_to\\_sensor\\_correlation/links/56d4437d08ae868628b24ba8.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alfonso_Valdes/publication/228523518_An_approach_to_sensor_correlation/links/56d4437d08ae868628b24ba8.pdf) (дата обращения: 27.06.2017).
3. **Mueller A.** Event Correlation Engine. [https://www.open.ch/\\_pdf/internships/EventCorrelationEngine\\_AndreasMueller.pdf](https://www.open.ch/_pdf/internships/EventCorrelationEngine_AndreasMueller.pdf) (дата обращения: 27.06.2017).
4. **Kang D., Na J.** A Rule Based Event Correlation Approach for Physical and Logical Security Convergence // IJCSNS Intern. Journal of Computer Science and Network Security. 2012. Vol. 12. N 1. P. 28–32.
5. **Elshoush H. T., Osman I. M.** Intrusion Alert Correlation Framework: An Innovative Approach // IAENG Transactions on Engineering Technologies. 2013. Vol. 229. P. 405–420.
6. **Klinger S., Yemini S., Yemini Y., Ohsie D., Stolfo S.** A Coding Approach to Event Correlation // Proc. of the Fourth Intern. Symp. on Integrated Network Management IV/ Adarshpal S. Sethi, Yves Raynaud, and Fabienne Faure-Vincent (Eds.). London: Chapman & Hall, 1995. P. 266–277.
7. **Dwivedi N., Tripathi A.** Event Correlation for Intrusion Detection Systems // Computational Intelligence & Communication Technology (CICT): 2015 IEEE Intern. Conf. IEEE, 2015. P. 133–139.
8. **Kidmose E., Stevanovic M., Pedersen J. M.** Correlating Intrusion Detection Alerts on Bot Malware Infections using Neural Network // Cyber Security and Protection of Digital Services (Cyber Security): 2016 Intern. Conf. IEEE, 2016. P. 1–8.
9. **Xuwei F., et al.** An Approach of Discovering Causal Knowledge for Alert Correlating Based on Data Mining // Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC): 2014 IEEE 12th Intern. Conf. IEEE, 2014. P. 57–62.
10. **Wang C., Chiou Y.** Alert Correlation System with Automatic Extraction of Attack Strategies by Using Dynamic Feature Weights // Intern. Journal of Computer and Communication Engineering. 2016. Vol. 5. N 1. P. 1–10.
11. **Kotenko I., Doynikova E.** Evaluation of Computer Network Security based on Attack Graphs and Security Event Processing // Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications. 2014. Vol. 5. N 3. P. 14–29.
12. **Katz G., Elovici Y., Shapira B.** CoBAN: A Context Based Model for Data Leakage Prevention // Information Sciences. 2014. Vol. 262. P. 137–158.
13. **Morin B., Me L., Debar H., Ducasse M.** A Logic-Based Model to Support Alert Correlation in Intrusion Detection // Information Fusion. 2009. Vol. 10. N 4. P. 285–299.
14. **Eckmann S. T., Vigna G., Kemmerer R. A.** An Attack Language for State-Based Intrusion Detection // Journal of Computer Security. 2002. N 10 (1–2). P. 71.
15. **Total E., Vivinis B.** A Language Driven Intrusion Detection System for Event and Alert Correlation // Security and Protection in Information Processing Systems. 2004. Vol. 147. P. 208–224.
16. **Viinikka J., Debar H., Me L., Lehtikainen A., Tarvainen M.** Processing Intrusion Detection Alert Aggregates with Time Series Modelling // Information Fusion. 2009. Vol. 10. N 4. P. 312–324.
17. **Treinen J., Thurimella R.** A Framework for the Application of Association Rule Mining in Large Intrusion Detection Infrastructures // Recent Advances in Intrusion Detection (RAID). 2006. Vol. 4219. P. 1–18.
18. **Jakobson G.** Mission Resilience // Cyber Defense and Situational Awareness. — Springer International Publishing, 2014. — P. 297–322.
19. **Gao J., Jiang G., Chen H., and Han J.** Modeling Probabilistic Measurement Correlations for Problem Determination in Large-Scale Distributed Systems // Proc. IEEE, Montreal, Canada, June 22–26, 2009. P. 623–630.
20. **Naukudkar K. B., Ambawade D. D., Bakal J. W.** Enhancing Performance of Security Log Analysis using Correlation-Prediction Technique // Proc. of Intern. Conf. on ICT for Sustainable Development, Singapore, Feb. 26, 2016. Springer, 2016. Vol. 409. P. 635–643.

21. Schutte J., Rieke R., Winkelvos T. Model-based Security Event Management // Proc. of the 6th Intern. Conf. on Mathematical Methods, Models and Architectures for Computer Network Security: Computer Network Security (MMM-ACNS'12). Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 181–190.
22. HPE ArcSight ESM. <https://saas.hpe.com/ru-ru/software/siem-security-information-event-management> (дата обращения: 25.06.2017).
23. Splunk Enterprise Security. [https://www.splunk.com/en\\_us/products/premium-solutions/splunk-enterprise-security.html](https://www.splunk.com/en_us/products/premium-solutions/splunk-enterprise-security.html) (дата обращения: 25.06.2017).
24. IBM QRadar SIEM. <http://www-03.ibm.com/software/products/ru/qradar-siem> (дата обращения: 25.06.2017).
25. Walton S., Maguire E., Chen M. A Visual Analytics Loop for Supporting Model Development // Proc. of 2015 IEEE Symp. on Visualization for Cyber Security (VizSec), Chicago, IL, 2015. P. 1–8.
26. Котенко И. В., Новикова Е. С. Визуальный анализ защищенности компьютерных сетей // Информационно-управляющие системы. 2013. № 3. С. 56–61.
27. Шелестова О. Корреляция SIEM — это просто. Сигнатурные методы. <http://www.securitylab.ru/analytics/431459.php> (дата обращения: 26.06.2017).
28. Borealis Distributed Stream Processing Engine. <http://cs.brown.edu/research/borealis/public/> (дата обращения: 10.12.2016).
29. SEC — simple event correlator. <https://simple-evcorr.github.io/> (дата обращения: 10.12.2016).
30. Esper: Event Processing for Java. <http://www.esper-tech.com/products/esper.php> (дата обращения: 10.12.2016).

UDC 004.056

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.95

### A Survey of Security Event Correlation Techniques for Cloud Computing Environment Security

Novikova E. S.<sup>a,b</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, novikova.evgenia123@gmail.comBekeneva Ya. A.<sup>a</sup>, Engineer, yana.barc@mail.ruShorov A. V.<sup>a</sup>, PhD, Tech., Leading Researcher, ashxz@mail.ruFedotov E. S.<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, fedotov\_e1290@mail.ru<sup>a</sup>Saint-Petersburg State Electrotechnical University «LETI», 5, Prof. Popov St., 197376, Saint-Petersburg, Russian Federation<sup>b</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** The increased complexity of attacks on cloud infrastructures leads to the necessity to develop security mechanisms able to analyze security events, including those separated in time. In addition, there is a need to verify the reliability of generated security events, as well as to assess the criticality of a security event in the context of the monitored asset criticality. This defines a need for a security event correlation module as a core element of the system. **Purpose:** We analyze the developed event correlation techniques and assess their applicability in cloud infrastructure. **Results:** The analysis of the major event correlation algorithms and available software has shown that there are three main approaches to the development of such algorithms: the approach on the base of security event similarity, the knowledge-based approach and probabilistic approaches. The following assessment criteria for the comparison of the existing approaches have been defined: the ability to correlate events from heterogeneous data sources, the requirements to prior knowledge base, the event correlation accuracy, and the ability to detect novel and multistep attacks. The results of the comparison analysis are presented. **Practical relevance:** The results of the research can be used in the development of protection mechanisms against targeted persistent attacks, securing cloud computing environment. The usage of security event correlation techniques enables security tools to prioritize security events more accurately and respond timely.

**Keywords** — Cloud Technology Security, Security Events, Correlation of Security Events, Event Correlation Algorithms.

### References

1. Mirheidari S. A., Arshad S., Jalili R. Alert Correlation Algorithms: A Survey and Taxonomy. *Proc of 5th Intern. Symp. on Cyberspace Safety and Security (CSS 2013)*, Zhangjiajie, China, November 13–15, 2013, LNCS, 2013, vol. 8300, pp. 183–197.
2. Valdes A., Skinner K. An Approach to Sensor Correlation *Proc. of the Recent Advances in Intrusion Detection (RAID-2000)*, Toulouse, 2000. Available at: [https://www.researchgate.net/profile/Alfonso\\_Valdes/publication/228523518\\_An\\_approach\\_to\\_sensor\\_correlation/links/56d4437d08ae868628b24ba8.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Alfonso_Valdes/publication/228523518_An_approach_to_sensor_correlation/links/56d4437d08ae868628b24ba8.pdf) (accessed 27 June 2017).
3. Mueller A. *Event Correlation Engine*. Available at: [https://www.open.ch/\\_pdf/internships/EventCorrelationEngine\\_AndreasMueller.pdf](https://www.open.ch/_pdf/internships/EventCorrelationEngine_AndreasMueller.pdf) (accessed 27 June 2017).
4. Kang D., Na J. A Rule Based Event Correlation Approach for Physical and Logical Security Convergence. *IJCSNS Intern. Journal of Computer Science and Network Security*, 2012, vol. 12, no. 1, pp. 28–32.
5. Elshoush H. T., Osman I. M. Intrusion Alert Correlation Framework: An Innovative Approach. *IAENG Transactions on Engineering Technologies*, 2013, vol. 229, pp. 405–420.
6. Klinger S., Yemini S., Yemini Y., Ohsie D., Stolfo S. A Coding Approach to Event Correlation. *Proc. of the Fourth Intern. Symp. on Integrated Network Management IV*, Adarshpal S. Sethi, Yves Raynaud, and Fabienne Faure-Vincent (Eds.), 1995, pp. 266–277.
7. Dwivedi N., Tripathi A. Event Correlation for Intrusion Detection Systems. *IEEE Intern. Conf. "Computational Intelligence & Communication Technology" (CICT)*, 2015, pp. 133–139.
8. Kidmose E., Stevanovic M., Pedersen J. M. Correlating Intrusion Detection Alerts on Bot Malware Infections using Neural Network. *Intern. Conf. "Cyber Security and Protection of Digital Services (Cyber Security)"*, 2016, pp. 1–8.
9. Xuewei F., et al. An Approach of Discovering Causal Knowledge for Alert Correlating Based on Data Mining. *IEEE*

- 12th Intern. Conf. "Dependable, Autonomic and Secure Computing (DASC)", 2014, pp. 57–62.
10. Wang C., Chiou Y. Alert Correlation System with Automatic Extraction of Attack Strategies by Using Dynamic Feature Weights. *Intern. Journal of Computer and Communication Engineering*, 2016, vol. 5, no. 1, pp. 1–10.
  11. Kotenko I., Doynikova E. Evaluation of Computer Network Security based on Attack Graphs and Security Event Processing. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 14–29.
  12. Katz G., Elovici Y., Shapira B. CoBAN: A Context Based Model for Data Leakage Prevention. *Information Sciences*, 2014, vol. 262, pp. 137–158.
  13. Morin B., Me L., Debar H., Ducassé M. A Logic-Based Model to Support Alert Correlation in Intrusion Detection. *Information Fusion*, 2009, vol. 10, no. 4, pp. 285–299.
  14. Eckmann S. T., Vigna G., Kemmerer R. A. An Attack Language for State-Based Intrusion Detection. *Journal of Computer Security*, 2002, no. 10(1–2), p. 71.
  15. Totel E., Vivinis B. A Language Driven Intrusion Detection System for Event and Alert Correlation. *Security and Protection in Information Processing Systems*, 2004, vol. 147, pp. 208–224.
  16. Viinikka J., Debar H., Me L., Lehikoinen A., Tarvainen M. Processing Intrusion Detection Alert Aggregates with Time Series Modelling. *Information Fusion*, 2009, vol. 10, no. 4, pp. 312–324.
  17. Treinen J., Thurimella R. A Framework for the Application of Association Rule Mining in Large Intrusion Detection Infrastructures. *Recent Advances in Intrusion Detection (RAID)*, 2006, vol. 4219, pp. 1–18.
  18. Jakobson G. Mission Resilience. In: *Cyber Defense and Situational Awareness*. Springer International Publishing, 2014, pp. 297–322.
  19. Gao J., Jiang G., Chen H., Han J. Modeling Probabilistic Measurement Correlations for Problem Determination in Large-Scale Distributed Systems. *Proc. IEEE*, Montreal, Canada, June 22–26, 2009, IEEE, 2009, pp. 623–630.
  20. Naukudkar K. B., Ambawade D. D., Bakal J. W. Enhancing Performance of Security Log Analysis Using Correlation-Prediction Technique. *Proc. of Intern. Conf. on ICT for Sustainable Development*, Singapore, February 26, 2016, Springer, 2016, vol. 409, pp. 635–643.
  21. Schutte J., Rieke R., Winkelvos T. Model-based Security Event Management. *Proc. of the 6th Intern. Conf. on Mathematical Methods, Models and Architectures for Computer Network Security: Computer Network Security (MMM-ACNS'12)*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012, pp. 181–190.
  22. *HPE ArcSight ESM*. Available at: <https://saas.hpe.com/ru-ru/software/siem-security-information-event-management> (accessed 25 June 2017).
  23. *Splunk Enterprise Security*. Available at: [https://www.splunk.com/en\\_us/products/premium-solutions/splunk-enterprise-security.html](https://www.splunk.com/en_us/products/premium-solutions/splunk-enterprise-security.html) (accessed 25 June 2017).
  24. *IBM QRadar SIEM*. Available at: <http://www-03.ibm.com/software/products/ru/qradar-siem> (accessed 25 June 2017).
  25. Walton S., Maguire E., Chen M. A Visual Analytics Loop for Supporting Model Development. *Proc. of 2015 IEEE Symp. on Visualization for Cyber Security (VizSec)*, Chicago, IL, 2015, pp. 1–8.
  26. Kotenko I. V., Novikova E. S. The Visual Analysis For Computer Network Security Assessment. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 3, pp. 56–61 (In Russian).
  27. Shelestova O. *Korreljatsiia SIEM — eto prosto. Signaturnye metody* [SIEM Correlation it's Easy. Signature Methods]. <http://www.securitylab.ru/analytics/431459.php> (accessed 26 June 2017).
  28. *Borealis Distributed Stream Processing Engine*. Available at: <http://cs.brown.edu/research/borealis/public/> (accessed 26 June 2017).
  29. *SEC — Simple Event Correlator*. Available at: <https://simple-evcorr.github.io/> (accessed 26 June 2017).
  30. *Esper: Event Processing for Java*. Available at: <http://www.espertech.com/products/esper.php> (accessed 26 June 2017).

## МЕТОД УДАЛЕНИЯ ГЛАЗОДВИГАТЕЛЬНЫХ АРТЕФАКТОВ НА ЭЭГ ЧЕЛОВЕКА ПРИ РАСПОЗНАВАНИИ НЕОДНОЗНАЧНОГО ЗРИТЕЛЬНОГО ОБРАЗА

А. Е. Руннова<sup>а</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент

М. О. Журавлев<sup>б, а</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент

Е. Ю. Ситникова<sup>в</sup>, доктор биол. наук, старший научный сотрудник

А. А. Короновский<sup>б, а</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор

А. Е. Храмов<sup>а, б</sup>, доктор физ.-мат. наук, профессор

<sup>а</sup>Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Саратов, РФ

<sup>б</sup>Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, РФ

<sup>в</sup>Институт высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва, РФ

**Постановка проблемы:** электроэнцефалография является незаменимым методом функционального исследования головного мозга человека. Однако регистрируемые данные неизбежно содержат помехи технической, нейрогенной и физиологической природы, в частности, мощные артефакты, вызванные движениями глаз. Существует множество методов удаления глазодвигательных помех, но они редко используются в повседневной практике из-за высокой вычислительной сложности в комплексе с высоким риском ошибки определения момента появления артефактов. **Цель исследования:** создание и апробация нового метода удаления глазодвигательных артефактов на электроэнцефалографических данных. **Результаты:** разработан новый метод удаления глазодвигательных артефактов на электроэнцефалографических данных с использованием электроокулографии. Метод базируется на предположении о независимости сигналов окулографии и электроэнцефалографии, что дает возможность вычитания сигнала движения глаз из электроэнцефалографических данных на основе применения ортогонального преобразования Грамма — Шмидта. Метод показал высокую эффективность удаления артефактов на электроэнцефалографии, вызванных спонтанными движениями глазных яблок (порядка 95–97 % у 15 испытуемых). Эффективность удаления глазодвигательных артефактов на электроэнцефалографии снижалась во время распознавания зрительного образа неоднозначного объекта (куба Неккера). **Практическая значимость:** данный метод может быть рекомендован для работы в автоматическом режиме онлайн в задачах, не связанных с зрительно-ориентированной когнитивной деятельностью. Рассогласование между сигналами электроэнцефалографии и электроокулографии, обнаруженное во время распознавания зрительного образа куба Неккера, может являться индикатором когнитивной нагрузки и может быть в перспективе использовано в интерфейсах «мозг-компьютер».

**Ключевые слова** — математическая обработка электроэнцефалографии, автоматический анализ электроэнцефалографии, куб Неккера, преобразование Грамма — Шмидта, электроокулография.

### Введение

Электроэнцефалография остается незаменимым методом исследования механизмов головного мозга человека и животных. Метод регистрации электроэнцефалограмм (ЭЭГ) прост, доступен, неинвазивен и позволяет разработать практически любой, сколь угодно сложный дизайн эксперимента, практически не ограниченный по времени. Очевидным недостатком ЭЭГ является неизбежная зашумленность сигналов и наличие артефактов нейрогенной и технической природы (электромагнитные шумы и погрешности оборудования). Настоящая работа посвящена решению проблемы выделения и удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ человека. Эти артефакты имеют мощную амплитуду и широкий диапазон частот (от минимальной спектральной частоты регистрации сигнала и до 8–15 Гц), изменяющийся во времени [1, 2]. Глазодвигательные артефакты можно обнаружить на ЭЭГ как в непосредственной близости от глаз, так и на значительном удалении, вплоть до затылочных областей, по-

этому проблема удаления этих артефактов является весьма актуальной.

В медицинских исследованиях фрагменты ЭЭГ, содержащие артефакты, удаляют вручную, что обусловлено высокой степенью моральной и юридической ответственности перед пациентом в случае ошибочной интерпретации данных ЭЭГ. На настоящий момент существует множество методов удаления глазодвигательных артефактов [2–12]. Среди наиболее эффективных необходимо упомянуть подходы на базе метода независимых компонент [4–6] и его усовершенствованной модификации — регрессионного анализа [9–11]. Однако эти подходы редко используются в повседневной практике из-за высокой вычислительной сложности в комплексе с высоким риском ошибки определения момента появления артефактов. Для эффективного удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ необходима информация о движениях глаз — электроокулограмма (ЭОГ) — и сочетание двух процедур:

1) линейного вычитания сигнала ЭОГ из ЭЭГ с использованием эмпирически подобранных ве-

совых коэффициентов в зависимости от удаленности канала ЭЭГ от места регистрации ЭОГ; выделения фрагментов ЭЭГ, содержащих артефакты;

2) удаления фрагментов ЭЭГ, содержащих артефакты (вручную).

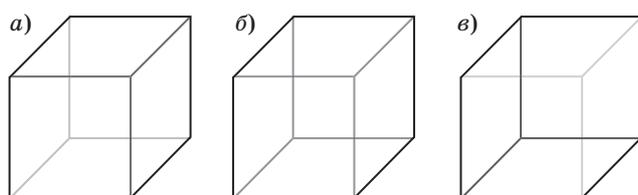
Описанная комбинация малоэффективна в экспериментах, где необходим анализ низкочастотной составляющей ЭЭГ, к которым относятся многие когнитивные исследования [13–17]. Удаление фрагментов ЭЭГ и линейное вычитание сигналов ведет к укорочению временного ряда ЭЭГ (до 10 % от исходной длительности), что снижает информативную ценность и искажает спектральный состав сигнала.

В настоящей работе описан новый метод удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ, основанный на преобразовании Грамма — Шмидта с использованием данных ЭОГ. Метод был протестирован в серии экспериментов по распознаванию зрительного образа неоднозначного объекта — куба Неккера [14, 15]. Эта экспериментальная задача сочетает несколько психо- и нейрофизиологических проблем, связанных с процессом зрительного восприятия, пространственного мышления, принятия решений, концентрации внимания при выполнении однообразных задач и т. д.

### Методика удаления глазодвигательных артефактов для ЭЭГ данных

#### Психофизиологический эксперимент

Была использована задача зрительного распознавания куба Неккера, представляющего собой неоднозначно воспринимаемый объект, изображенный без соблюдения правил перспективы, у которого ближняя и дальняя грани имеют одинаковые размеры и форму (рис. 1, а). Любая из граней куба Неккера может восприниматься либо как передняя (рис. 1, б), либо как задняя (рис. 1, в), и при его наблюдении одна объемная проекция самопроизвольно сменяется другой. В эксперименте изображения куба Неккера были



■ **Рис. 1.** Изображение куба Неккера: а — предъявляемое испытуемым; б — образ «левой» проекции; в — образ «правой» проекции

■ **Fig. 1.** The image of the Necker cube: а — presented to the testee; б — the image of the «left» projection; в — the image of the «right» projection

предъявлены испытуемому в течение короткого интервала времени (700 мс), после чего испытуемый сообщал экспериментатору о распознавании «левой» (см. рис. 1, б) или «правой» (см. рис. 1, в) проекции куба нажатием соответствующей кнопки. Интенсивность окраски линий, очерчивающих грани куба Неккера, менялась в случайном порядке в диапазоне от 100 до 40 % с шагом 20 % (100–80–60–40 %). Каждое из изображений куба Неккера, характеризующееся разной интенсивностью граней, предъявлялось 100–110 раз, пауза между двумя предъявлениями стимулов составляла от 2,5 до 3 с.

К исследованию были привлечены 15 здоровых добровольцев обоего пола в возрасте от 19 до 25 лет (студенты Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.), обладающие нормальным (или компенсированным до нормального) зрением. Предварительно было проведено стандартное тестирование для выявления ведущего и ведомого глаз у каждого испытуемого. Анализ формы окулограмм у семи испытуемых не выявил различий между сигналами, зарегистрированными вблизи ведущего и ведомого глаз. В дальнейшем, для удобства и унификации экспериментальной работы, регистрировали вертикальную окулограмму только от правого глаза.

С целью снизить влияние фактора ошибки и оптимизировать процедуру фильтрации сигналов каждый испытуемый участвовал в трех-пяти экспериментальных сериях сходного дизайна. Каждая серия включала три стадии:

1) фоновую регистрацию ЭЭГ и ЭОГ в состоянии покоя с закрытыми глазами при соблюдении инструкции совершать минимум движений глазами (5 мин);

2) регистрацию ЭЭГ и ЭОГ во время горизонтальных и вертикальных движений глазами, а также при мигании (5 мин);

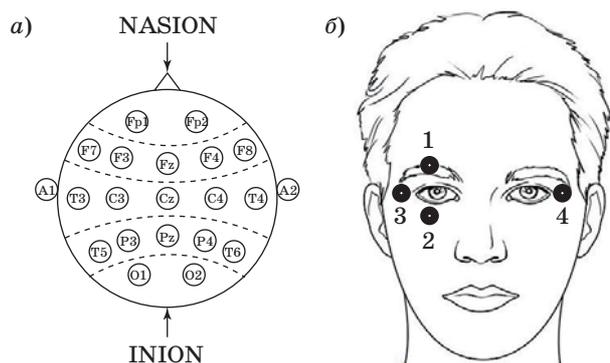
3) регистрацию ЭЭГ и ЭОГ в процессе распознавания куба Неккера (10 мин).

С учетом пауз между стадиями общая длительность эксперимента составляла порядка 20–23 мин.

#### Процедура регистрации ЭЭГ

Расположение электродов для регистрации ЭЭГ соответствовало стандартной схеме 10–20 [18], сенсоры для регистрации ЭОГ были расположены в области глаз (рис. 2, а, б). Для регистрации ЭОГ использовались 2 пары электродов: электроды 1 и 2 — для регистрации вертикальной окулограммы, а электроды 3 и 4 — горизонтальной (см. рис. 2, б).

Регистрацию сигналов ЭЭГ и ЭОГ проводили с помощью электроэнцефалографа «Энцефалан-ЭЭГР-19/26» (Медиком МТД, Россия) с временным



■ **Рис. 2.** Схема расположения электродов для регистрации ЭЭГ (а) и ЭОГ (б)

■ **Fig. 2.** The electrode scheme for registration EEG (a), and EOG (б)

разрешением (250 Гц). Данное оборудование было сертифицировано для использования в медицинских целях на территории РФ, стран СНГ, в зоне ЕС и Великобритании. Разрешение на экспериментальную работу выбранного дизайна и оборудование было получено в комиссии по этике СГТУ им. Гагарина Ю. А.

Известно, что движения глаз сопровождаются изменениями электрического потенциала, поскольку глазное яблоко обладает электрическим дипольным моментом, формируемым за счет разности потенциалов между сетчаткой и роговой оболочкой глаза [1, 2, 14]. Форма глазодвигательных артефактов на ЭЭГ зависит от типа движения глазных яблок в горизонтальной/вертикальной плоскости при наличии/отсутствии вращательного момента, и в соответствии с этим глазодвигательные артефакты можно разделить на несколько типов [1, 2]. На рис. 2, б видно, что электроды 1–4 фиксировали разность потенциалов как в вертикальном, так и в горизонтальном направлениях, что позволило оценить весь спектр возможных движений глазного яблока.

**Математический анализ**

Сигналы ЭЭГ, регистрируемые у испытуемых с открытыми глазами, можно представить в виде линейной комбинации сигналов электрической активности головного мозга и помех, вызванных движениями глаз. В таком случае удаление помех (глазодвигательных артефактов) может быть выполнено путем математического преобразования сигналов ЭОГ и ЭЭГ с использованием метода ортогонализации Грамма – Шмидта [19]. Суть метода заключалась в следующем. Пусть  $g_i(t)$  — сигнал ЭЭГ от  $i$ -го канала,  $h(t)$  и  $s(t)$  — сигналы ЭОГ, содержащие информацию о вертикальных и горизонтальных движениях глаз (соответственно, от пар сенсоров 1–2 и 3–4, см. рис. 2, б). Далее

эти сигналы подверглись процедуре ортогонализации Грамма – Шмидта:

$$g'_i(t) = g_i(t) - h^0(t) \int_{t_1}^{t_1+T} h^0(t')g_i(t')dt'; \quad (1)$$

$$\tilde{g}_i(t) = g'_i(t) - s^0(t) \int_{t_1}^{t_1+T} s^0(t')g'_i(t')dt', \quad (2)$$

где  $\tilde{g}_i(t)$  — сигнал, очищенный от глазодвигательных артефактов;  $t$  — интервал времени, в течение которого было проведено удаление артефактов;  $t \in [t_1, t_1 + T]$ , где  $t_1$  — момент начала, а  $T$  — длительность интервала. Сигналы  $h^0(t)$  и  $s^0(t)$  — это нормированные «опорные» сигналы ЭОГ, соответствовавшие вертикальным и горизонтальным движениям глаз [11, 12]:

$$h^0(t) = \frac{h(t)}{\|h(t)\|}, \quad \|h(t)\| = \sqrt{\int_{t_1}^{t_1+T} (h(t))^2 dt}; \quad (3)$$

$$s^0(t) = \frac{s(t)}{\|s(t)\|}, \quad \|s(t)\| = \sqrt{\int_{t_1}^{t_1+T} (s(t))^2 dt}. \quad (4)$$

Процедуре ортогонализации (1)–(4) подверглись сигналы, зарегистрированные от всех 19 каналов ЭЭГ. При отсутствии глазодвигательных артефактов на отдельных каналах ЭЭГ процедура ортогонализации не изменяла форму исходного сигнала ЭЭГ. Эта особенность следует из самой формы преобразования Грамма – Шмидта, что будет продемонстрировано ниже. Отметим, что горизонтальные движения глаз, максимально проявлявшиеся на сигнале ЭОГ  $s(t)$ , оказывали минимальное влияние на форму ЭЭГ. Помехи на сигналах ЭЭГ в значительной степени были обусловлены вертикальными движениями глаз, которые максимально проявлялись на сигнале ЭОГ от вертикально расположенной пары сенсоров  $h(t)$ , поэтому информация от горизонтально расположенной пары сенсоров  $s(t)$  была избыточной, и далее в расчетах использовали только данные  $h(t)$ .

Для удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ в реальном времени соотношения (1)–(4) были модифицированы следующим образом:

$$g'_i(t) = g_i(t) - h^0(t) \int_{t-T/2}^{t+T/2} h^0(t')g_i(t')dt'; \quad (5)$$

$$\tilde{g}_i(t) = g'_i(t) - s^0(t) \int_{t-T/2}^{t+T/2} s^0(t')g'_i(t')dt'; \quad (6)$$

$$h^0(t) = \frac{h(t)}{\|h(t)\|}, \quad \|h(t)\| = \sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} (h(t))^2 dt}; \quad (7)$$

$$s^0(t) = \frac{s(t)}{\|s(t)\|}, \quad \|s(t)\| = \sqrt{\int_{t-T/2}^{t+T/2} (s(t))^2 dt}, \quad (8)$$

где  $t$  — анализируемый интервал времени;  $T$  — ширина временного окна;  $t + T/2$  — регистрируемый «текущий» момент времени. При реализации этого алгоритма в реальном времени сигнал ЭЭГ без артефактов  $\tilde{g}_i(t)$  следовал с задержкой во времени  $(t - T/2)$  относительно исходного сигнала ЭЭГ. Для эффективного удаления артефактов в реальном времени значение  $T$  составляло от 1,5 до 5 с.

Для статистической оценки результатов работы использовали показатель эффективности метода  $E_{эфф}$ :

$$E_{эфф} = (N_{ЭЭГ}/N_{ЭОГ}) \times 100 \%,$$

— это процентное соотношение числа верно удаленных глазодвигательных артефактов на каждом ЭЭГ-канале ( $N_{ЭЭГ}$ ) к общему количеству глазодвигательных артефактов, выявляемых на ЭОГ ( $N_{ЭОГ}$ ).

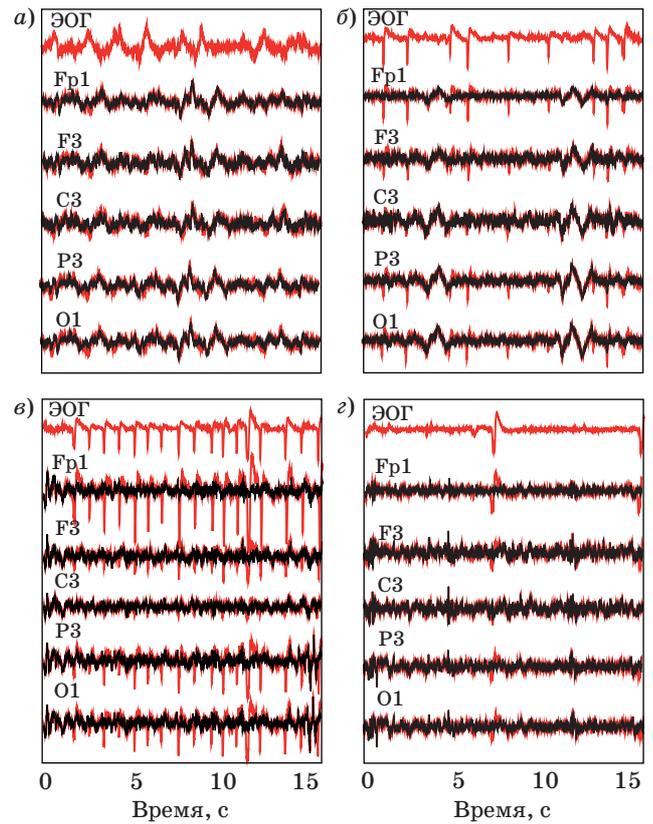
### Результаты исследований и их анализ

На 1-й стадии эксперимента (фоновая запись с закрытыми глазами) на ЭЭГ отсутствовали артефакты, требующие удаления (рис. 3, а), и процедуру фильтрации не проводили. На 2-й стадии эксперимента (регистрация ЭЭГ и ЭОГ у испытуемых с открытыми глазами) была использована процедура Грамма — Шмидта для удаления глазодвигательных артефактов, вызванных горизонтальными и вертикальными движениями глазных яблок (соответственно рис. 3, б и в), а также вследствие мигания (рис. 3, г).

В таблице представлены результаты статистического анализа эффективности метода в группе из 15 испытуемых.

Проведенные расчеты показали высокую эффективность удаления глазодвигательных артефактов (в среднем от 94,9 до 97,9 %). Однако в лобных отведениях эффективность алгоритма была ниже, чем в остальных отведениях. Несмотря на то, что у подавляющего большинства испытуемых (73,3 %) эффективность удаления артефактов на лобной ЭЭГ была более 95 %, у 13,3 % испытуемых этот процент был ниже — 93,5 %, а у остальных 13,4 % еще ниже — от 91 до 93,4 %.

На 3-й стадии эксперимента испытуемые решали задачу распознавания неоднозначного объекта (куба Неккера), и результаты удаления



■ Рис. 3. Фрагменты ЭОГ и ЭЭГ, зарегистрированные на 1-й и 2-й стадиях эксперимента: а — фоновая запись во время 1-й стадии эксперимента; б-г — результат коррекции ЭЭГ на 2-й стадии эксперимента, где были эффективно удалены артефакты, вызванные горизонтальными (б) и вертикальными (в) движениями глазных яблок, а также миганием (г)

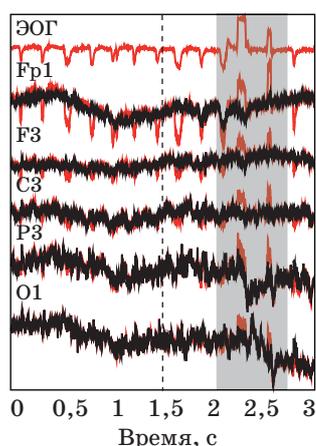
■ Fig. 3. Fragments of EOG and EEG recorded at the first and second stages of the experiment: a — background recording during the first stage of the experiment; б-г — the result of EEG correction in the 2nd stage of the experiment, where artifacts caused by horizontal (б) and vertical (в) movements of the eyeballs, as well as flashing (г)

- Эффективность метода удаления глазодвигательных артефактов (среднее ± стандартное отклонение)
- Efficiency of removal method extraocular artifacts (mean ± standard deviation)

Канал ЭЭГ	$E_{эфф}, \%$
Fp1	94,9 ± 2,1
Fp2	94,0 ± 1,8
F7	97,5 ± 3,1
F8	97,8 ± 3,3
C3	96,1 ± 1,1
C4	95,5 ± 2,0
P3	95,0 ± 0,75
P4	94,6 ± 0,36
O1	97,9 ± 0,1
O2	98,1 ± 0,3

глазодвигательных артефактов на этой стадии отличались от полученных на предыдущей. На рис. 4 показаны сигналы ЭОГ и ЭЭГ, зарегистрированные в процессе распознавания куба Неккера. Момент предъявления куба Неккера показан пунктирной линией. Серым прямоугольником выделен интервал времени, когда снижалась эффективность алгоритма коррекции ЭЭГ. Видно, что эффективность удаления артефактов снижалась на протяжении 500–700 мс. Отметим, что снижение эффективности использования метода Грамма — Шмидта наблюдалось через 400–600 мс после предъявления зрительного стимула (куба Неккера). Снижение эффективности удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ было выявлено в 40–60 % случаев от общего числа предъявлений куба Неккера у разных испытуемых.

В данной работе продемонстрирована эффективность использования ортогонального преобразования Грамма — Шмидта для удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ с использованием данных ЭОГ. Эта процедура позволила полностью удалить глазодвигательные артефакты на ЭЭГ, практически не нарушая структуру исходного сигнала. Эффективность удаления артефактов, вызванных спонтанными движениями открытых глаз, была максимальной в затылочной области (в среднем 97,9 %) и минимальной (в среднем 94,9 %) — в области лобных полюсов Fp1 и Fp3, где амплитуда глазодвигательных артефактов была наибольшей (вследствие близкого расположения к области глаз). Анализ существующей литературы [2, 4, 8, 10, 11] позволяет судить о том, что точность аналогичных методов не превышает 80 %. Таким образом, предлагаемый нами метод является достойным конкурентом существующих



- **Рис. 4.** Фрагменты ЭОГ (вертикальное расположение сенсоров) и ЭЭГ, зарегистрированные на 3-й стадии эксперимента
- **Fig. 4.** Fragments of the EOG (vertical arrangement of sensors) and the EEG recordings at the experiment third stage

на настоящий момент способов удаления глазодвигательных артефактов, основанных на анализе независимых компонент (см., например, [4, 8, 10] и др.) и регрессионном анализе [2, 11].

Принципиальный недостаток этих методов — сложность преобразований и недостаточная точность определения артефактов на ЭЭГ. Методом, наиболее близким к разработанному нами, является метод удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ, основанный на регрессионном анализе [11]. Этот метод включает несколько стадий обработки данных. В первую очередь — это анализ главных компонент сигнала ЭЭГ, содержащего глазодвигательные артефакты, в целях определения набора компонент, относящихся к глазодвигательным артефактам. Во-вторых, для выявленной группы компонент должна быть произведена фильтрация в диапазоне 1–8 ГГц, и в результате при помощи регрессионного алгоритма должны быть рассчитаны коэффициенты их ослабления. Рассчитанные коэффициенты используются в дальнейшем для упорядочивания пространственного распределения компонент глазодвигательных артефактов, а сами упорядоченные пространственные распределения используются для удаления самих глазодвигательных артефактов на ЭЭГ. Регрессионный метод является более точным, но более трудоемким по сравнению с традиционными методами, основанными на анализе главных компонент.

Мы обнаружили, что когнитивная нагрузка, связанная со зрительным распознаванием неоднозначного объекта (куба Неккера), снижает эффективность использования преобразования Грамма — Шмидта для удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ. Подобное явление может быть объяснено нарушением линейных взаимодействий между сигналами ЭЭГ и ЭОГ и появлением новых нелинейных взаимодействий при формировании зрительного образа неоднозначного объекта. Иными словами, во время когнитивной деятельности, ассоциированной с пространственным восприятием, снижается степень линейной зависимости между сигналами ЭЭГ и ЭОГ, существовавшая при спонтанных движениях глаз, и могут преобладать нелинейные взаимодействия, поэтому метод ортогональной фильтрации оказывается менее эффективным. Таким образом, корректная работа описанного алгоритма в автоматическом режиме в условиях зрительно-ориентированной когнитивной нагрузки возможна, но требует контроля исследователя.

## Заключение

Новый метод удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ с использованием данных ЭОГ, основанный на ортогональном преобразовании Грамма — Шмидта, демонстрирует высокую

эффективность удаления артефактов, вызванных спонтанными движениями глазных яблок (в среднем от 94,9 до 97,9 % на разных каналах ЭЭГ). Данная процедура не нарушает структуру ЭЭГ и является простым, эффективным и надежным способом удаления глазодвигательных артефактов на ЭЭГ.

Во время решения когнитивной задачи, связанной со зрительным распознаванием неоднозначного объекта (куба Неккера), эффективность использования метода снижается.

Преимущество предлагаемого метода состоит в том, что он позволяет выявить рассогласование между сигналами ЭЭГ и ЭОГ, возникающее при решении зрительно-ориентированных задач, и может быть использован в качестве детектора когнитивной нагрузки, например, в различных типах интерфейсов «мозг-компьютер» [20].

Данный метод может быть рекомендован для работы в автоматическом режиме онлайн в задачах, не связанных с зрительно-ориентированной когнитивной деятельностью.

Коллектив авторов выражает искреннюю благодарность за плодотворные дискуссии и ценные замечания по фильтрации физиологических сигналов в ЭЭГ данных доктору биологических наук Георгию Алексеевичу Иваницкому (лаборатория высшей нервной деятельности человека ИВНД и НФ РАН, Москва).

Разработка метода выделения артефактов и экспериментальные исследования неоднозначного отображения (куб Неккера) были выполнены при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 16-12-10100). Исследования фоновой ЭЭГ выполнены при поддержке гранта РФФИ (проект № 16-29-08221).

## Литература

1. Jung T. P., Makeig S., Humphries C., Lee T. W., McKeown M. J., Iragui V., Sejnowski T. J. Removing Electroencephalographic Artifacts by Blind Source Separation // *Psychophysiology*. 2000. N 37. P. 163–178.
2. Gratton G., Coles M. G. H., Donchin E. A New Method for off-line Removal of Ocular Artifact // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1983. N 55. P. 468–484.
3. Berg P., Scherg M. A Multiple Source Approach to the Correction of Eye Artifacts // *Electroencephalogr Clin Neurophysiol*. 1994. N 90. P. 229–241.
4. Bell A. J., Sejnowski T. J. An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution // *Neural Computation*. 1995. N 7. P. 1129–1159.
5. Lagerlund T. D., Sharbrough F. W., Busacker N. E. Spatial Filtering of Multichannel Electroencephalographic Recordings Through Principal Component Analysis by Singular Value Decomposition // *J Clin Neurophysiol*. 1997. N 1 (14). P. 73–82.
6. Jung T. P., Humphries C., Lee T. W., Makeig S., McKeown M. J., Iragui V., Sejnowski T. J. Extended ICA Removes Artifacts from Electroencephalographic Data // *Advances in Neural Information Processing Systems*. 1998. N 10. P. 894–900.
7. Kobayashi K., James C. J., Nakahori T., Akiyama T., Gotman J. Isolation of Epileptiform Discharges from Unaveraged EEG by Independent Component Analysis // *Clin Neurophysiol*. 1999. N 10 (110). P. 1755–1763.
8. Delorme A., Makeig S., Sejnowski T. Automatic Artifact Rejection for EEG Data using High-Order Statistics and Independent Component Analysis // *Proc. of the Third Intern. ICA Conf., San Diego, USA, December 9–13, 2001*. 2001. P. 9–12.
9. Ille N., Berg P., Scherg M. Artifact Correction of the Ongoing EEG using Spatial Filters Based on Artifact and Brain Signal Topographies // *Journal Clin Neurophysiol*. 2002. N 2(19). P. 113–124.
10. Joyce C. A., Gorodnitsky I. F., Kutas M. Automatic Removal of Eye Movement and Blink Artifacts from EEG Data using Blind Component Separation // *Psychophysiology*. 2004. N 41. P. 313–325.
11. Liu T., Yao D. Method for Removing Ocular Artifacts in Brain-Electrical Signal. Patent for Invention CN101474070, 2009.
12. Gotman J., Skuce D. R., Thompson C. J., Gloor P., Ives J. R., Ray W. F. Clinical Applications of Spectral Analysis and Extraction of Features from Electroencephalograms with Slow Waves in Adult Patients // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1973. N 35. P. 225–235.
13. Blake R., Logothetis N. K. Visual Competition // *Nature Reviews Neuroscience*. 2002. N 3(1). P. 13–21.
14. Corbetta M., Patel G., Shulman G. L. The Reorienting System of the Human Brain: from Environment to Theory of Mind // *Neuron*. 2008. N 58(3). P. 306–324.
15. Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G. The Neural Bases of Multistable Perception // *Trends in Cognitive Sciences*. 2009. N 13. P. 310–318.
16. Womelsdorf T., Fries P., Mitra P. P., Desimone R. Gamma-Band Synchronization in Visual Cortex Predicts Speed of Change Detection // *Nature*. 2006. N 439(7077). P. 733–736.
17. Maksimenko V. A., Lüttjohann Annika, Makarov V. V., Goremyko M. V., Koronovskii A. A., Nedaivovov V., Runnova A. E., van Luijteleaer Gilles, Hramov A. E., Boccaletti S. Macroscopic and Microscopic Spectral Properties of Brain Networks During Local and Global Synchronization // *Physical Review E*. 2017. Vol. 96. P. 012316. doi:10.1103/PhysRevE.96.012316

18. Jasper H. H. The Ten-Twenty Electrode System of the International Federation // *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*. 1958. N 10. P. 371–375.

19. Беклемишев Д. В. Курс аналитической геометрии и линейной алгебры. — М.: Физматлит, 2005. — 308 с.

20. Maksimenko V. A., Heukelum S., Makarov V. V., Kelderhuis J., Lüttjohann A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., Luijtelaar G. Absence Seizure Control by a Brain Computer Interface // *Scientific Reports*. 2017. N 7. P. 2487. doi:10.1038/s41598-017-02626-y

UDC 612.8 + 57.089

doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.105

**Removing Oculomotor Artifacts in Human EEG during Ambiguous Image Recognition**Runnova A. E.<sup>a</sup>, PhD, Sc., Phys.-Math., Associate Professor, anefila@gmail.comZhuravlev M. O.<sup>b,a</sup>, PhD, Sc., Phys.-Math., Associate Professor, zhuravlevmo@gmail.comSitnikova E. Yu.<sup>c</sup>, Dr. Sc., Biol., Senior Researcher, jenia-s@mail.ruKoronovskii A. A.<sup>b,a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, alexey.koronovskii@gmail.comHramov A. E.<sup>a,b</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, hramovae@gmail.com<sup>a</sup>Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politechnicheskaya St., Saratov, Russian Federation<sup>b</sup>Saratov State University, 83, Astrakhanskaya St., Saratov, Russian Federation<sup>c</sup>Institute of Higher Nervous Activity and Neurophysiology of RAS, 5A, Butlerova St. 117485, Moscow, Russian Federation

**Introduction:** Electroencephalography is an indispensable method for functional study of the human brain. However, recorded data inevitably contain technical, neurogenic and physiological noises, in particular, powerful artifacts caused by eye movement. There are many methods to remove oculomotor artifacts, but these are rarely used for practical purposes since most methods have high computational complexity combined with a large possibility of error in determining the moment when an artifact occurs. **Purpose:** We develop and validate a new method for the removal of oculomotor artifacts in electroencephalographic data. **Results:** The paper describes a new method for the removal of oculomotor artifacts in electroencephalographic data with the usage of electrooculography. The method is based on the assumption that oculography and electroencephalography signals are independent, which makes it possible to subtract the eye movement signal from the electroencephalographic data with the application of the Gram — Schmidt orthogonalization procedure. The method showed high efficacy of removing electroencephalographic artifacts caused by spontaneous eyeball movements (about 95–97% in 15 subjects). The efficacy of this method decreased when subjects were involved in visual perception of an ambiguous object (Necker cube). **Practical relevance:** We can recommend this method to be used in an automatic online mode for tasks not related to visual-oriented cognitive activity. The discrepancy between the signals of electroencephalography and electrooculography detected during the recognition of the Necker cube visual image may be a cognitive load indicator and can be used in brain-computer interface technology.

**Keywords** — Mathematical Processing of Electroencephalography, Automatic Analysis of Electroencephalography, Necker Cube, Gram — Schmidt Transformation, Electrooculography.

**References**

- Jung T. P., Makeig S., Humphries C., Lee T. W., McKeown M. J., Iragui V., Sejnowski T. J. Removing Electroencephalographic Artifacts by Blind Source Separation. *Psychophysiology*, 2000, no. 37, pp. 163–178.
- Gratton G., Coles M. G. H., Donchin E. A New Method for Off-Line Removal of Ocular Artifact. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1983, no. 55, pp. 468–484.
- Berg P., Scherg M. A Multiple Source Approach to the Correction of Eye Artifacts. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1994, no. 90, pp. 229–241.
- Bell A. J., Sejnowski T. J. An Information-Maximization Approach to Blind Separation and Blind Deconvolution. *Neural Computation*, 1995, no. 7, pp. 1129–1159.
- Lagerlund T. D., Sharbrough F. W., Busacker N. E. Spatial Filtering of Multichannel Electroencephalographic Recordings through Principal Component Analysis by Singular Value Decomposition. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 1997, no. 1 (14), pp. 73–82.
- Jung T. P., Humphries C., Lee T. W., Makeig S., McKeown M. J., Iragui V., Sejnowski T. J. Extended ICA Removes Artifacts from Electroencephalographic Data. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 1998, no. 10, pp. 894–900.
- Kobayashi K., James C. J., Nakahori T., Akiyama T., Gotman J. Isolation of Epileptiform Discharges from Unaveraged EEG by Independent Component Analysis. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 1999, no. 10 (110), pp. 1755–1763.
- Delorme A., Makeig S., Sejnowski T. Automatic Artifact Rejection for EEG Data using High-Order Statistics and Independent Component Analysis. *Proc. of the Third Intern. ICA Conf.*, San Diego, USA, December 2001, pp. 9–12.
- Ille N., Berg P., Scherg M. Artifact Correction of the Ongoing EEG using Spatial Filters Based on Artifact and Brain Signal Topographies. *Journal of Clinical Neurophysiology*, 2002, no. 2(19), pp. 113–124.
- Joyce C. A., Gorodnitsky I. F., Kutas M. Automatic Removal of Eye Movement and Blink Artifacts from EEG Data Using Blind Component Separation. *Psychophysiology*, 2004, no. 41, pp. 313–325.
- Liu T., Yao D. *Method for Removing Ocular Artifacts in Brain-Electrical Signal*. Patent for Invention CN101474070, 2009.
- Gotman J., Skuce D. R., Thompson C. J., Gloor P., Ives J. R., Ray W. F. Clinical Applications of Spectral Analysis and Extraction of Features from Electroencephalograms with Slow Waves in Adult Patients. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1973, no. 35, pp. 225–235.
- Blake R., Logothetis N. K. Visual Competition. *Nature Reviews Neuroscience*, 2002, no. 3(1), pp. 13–21.
- Corbetta M., Patel G., Shulman G. L. The Reorienting System of the Human Brain: from Environment to Theory of Mind. *Neuron*, 2008, no. 58(3), pp. 306–324.
- Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G. The Neural Bases of Multistable Perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 2009, no. 13, pp. 310–318.
- Womelsdorf T., Fries P., Mitra P. P., Desimone R. Gamma-Band Synchronization in Visual Cortex Predicts Speed of Change Detection. *Nature*, 2006, no. 439(7077), pp. 733–736.

17. Maksimenko V. A., Lüttjohann Annika, Makarov V. V., Goremyko M. V., Koronovskii A. A., Nedaivozov V., Runnova A. E., van Luijteleaar Gilles, Hramov A. E., Boccaletti S. Macroscopic and Microscopic Spectral Properties of Brain Networks during Local and Global Synchronization. *Physical Review E*, 2017, vol. 96, p. 012316. doi:10.1103
18. Jasper H. H. The Ten-Twenty Electrode System of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1958, no. 10, pp. 371–375.
19. Beklemishev D. V. *Kurs analiticheskoi geometrii i lineinoi algebrы* [The Course of Analytic Geometry and Linear Algebra]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 308 p. (In Russian).
20. Maksimenko V. A., Heukelum S., Makarov V. V., Kelderhuis J., Lüttjohann A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., Luijteleaar G. Absence Seizure Control by a Brain Computer Interface. *Scientific Reports*, 2017, no. 7, p. 2487. doi:10.1038/s41598-017-02626-y

## Уважаемые авторы!

**При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.**

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

**Формулы** набирайте в Word, не используя формульный редактор (Mathtype или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки:  $+ = -$ .

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

**Иллюстрации** предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (\*.vsd); Coreldraw (\*.cdr); Excel (\*.xls); Word (\*.doc); AdobeIllustrator (\*.ai); AutoCad (\*.dxf); Matlab (\*.ps, \*.pdf или экспорт в формат \*.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формате \*.ai, \*.esp, \*.wmf, \*.emf, \*.svg;

— фото и растровые — в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подписочных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

**В редакцию предоставляются:**

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате \*.tif, \*.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

**Список литературы** составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

### Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,  
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ  
Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»  
Тел.: (812) 494-70-02  
Эл. почта: [i-us.spb@gmail.com](mailto:i-us.spb@gmail.com)  
Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)

## COMPOUND MODEL OF FADING

V. Lyandres<sup>a</sup>, PhD, Professor, lyandres@ee.bgu.ac.il

<sup>a</sup>Ben-Gurion University of the Negev, POB 653, 1, Ben Gurion St., Beer Sheva, 84105, Israel

**Introduction:** Mathematical model of a signal at the output of a radio channel is the most important stage in constructing of the channel simulators using for testing of a communication system performance. The signal at the output of propagation channel suffers from random fading and Doppler frequency spread. Correlation function of the fading signal envelope is exponential, while its probability density is supposed usually to be Rayleigh. As a result, the quadrature representation of the fading signal is relevant. This approach is not correct in certain scenarios, particularly in mobile communication applications, for example in the case of shadowing. **Purpose:** To find a rather universal method of the fading signal modelling which takes into account an additional requirement of obtaining typical distribution of random Doppler spread of the received signal carrier frequency depending of the mobile speed. **Results:** The effectiveness of the presented compound method was tested by generating of a signal with sub-Rayleigh envelope distribution (*m*-Nakagami with  $m = 0,7$ ) and with the desired spectral form. It may be useful for simulating of mobile channel propagation channel with arbitrary distributed fading, while preserving the Doppler spectrum spread characteristics. In the framework of the presented concept the spectrum shape is formed via linear filtering of wide-band Gaussian random process. The resultant complex process having Rayleigh distributed envelope is multiplied by a positive real-valued stochastic process with exponential correlation function, providing opportunity to generate narrowband processes with any envelope distribution, while preserving the classical Doppler spectrum shape as defined by a system parameters.

**Keywords** – Multipath Fading, Mobile Radio Propagation Channel, Compound Stochastic Processes.

### Introduction

The propagation medium of mobile wireless communication is characterized by two phenomena: multipath propagation and signal fading. In the simulation of the land mobile radio fading signal the most widely used baseband representation is a quadrature baseband scheme [1] deploying filtering of a Gaussian white noise with identical spectrum shaping filters of the in-phase and quadrature components. The spectrum shape of the fading radio signal is characterized by a spread of Doppler frequency which has a random cosine distribution while its typical power spectrum density  $S(f)$  for particular mobile speed, antenna and polarization is given [2, 3] by

$$\begin{cases} S(f) = \frac{E^2}{2\pi f_m} \left[ 1 - (f/f_m)^2 \right]^{-1/2}, & f < f_m, \\ S(f) = 0, & f \geq f_m \end{cases}, \quad (1)$$

where  $E$  is a *rms* value of the signal envelope and  $f_m$  is the maximum Doppler spread with respect to mobile speed and the transmitted signal carrier frequency. For computer simulations an all-pole filter of the form  $H(z) = k/P_n(z)$  can be used, where  $k$  is a gain constant and  $P_n(z) = a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}$ . The coefficients  $\{a_i\}_{i=0}^n$  are to be derived with respect to the mobile speed, carrier frequency and other physical parameters. The known propagation channel simulators generate a complex signal  $x_n(t)$  having Rayleigh distributed envelope. However, this distribution is not always

the best model of the fading signal [4, 5]. We suggest here a compound generating model of a fading as narrow-band process with non-Rayleigh distributed envelope but with the same power spectrum density.

### Signal Generation Method

Multiplying the output  $x_n(t)$  of a classical channel simulator by a positive realvalued stochastic process  $s(t)$ , we obtain so called compound stochastic process

$$y(t) = x_n(t) \cdot s(t) \quad (2)$$

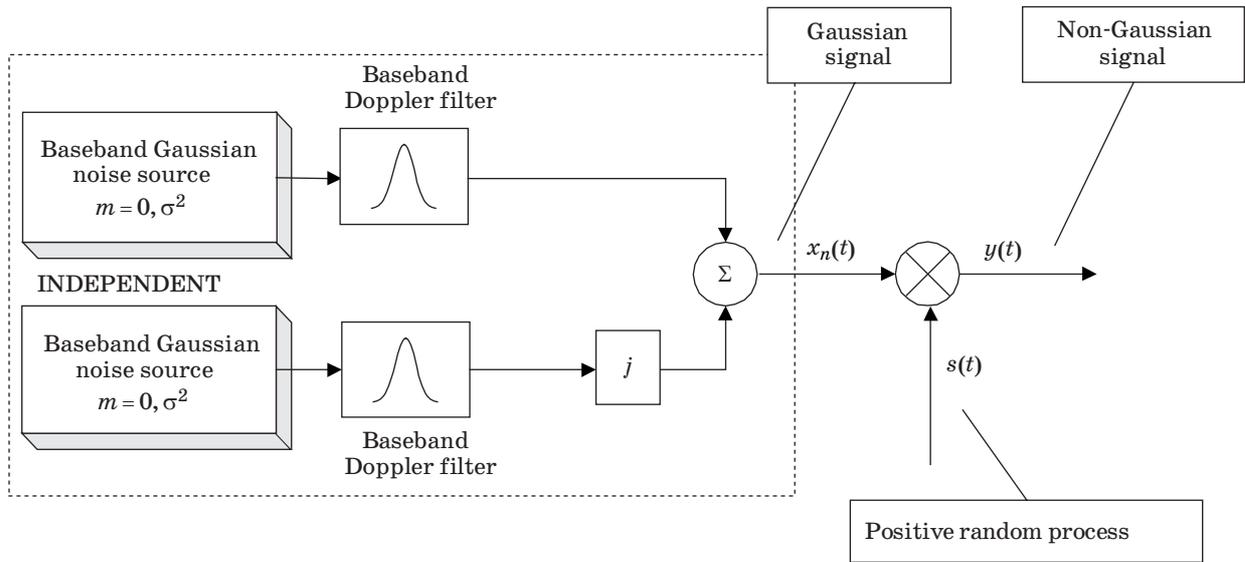
with modified envelope distribution. The Gaussian narrowband process  $x_n(t)$  in (2) defines the spectral (correlation) properties of  $y(t)$ , and the modulation  $s(t)$  defines its distribution. The block diagram of the baseband fading simulator is shown on Fig. 1.

Let the envelope of the resultant process  $y(t)$  is the generalized Gamma distribution [6]

$$f_{A_y}(A_y) = \frac{\gamma \beta^{\alpha/\gamma} A_y^{\alpha-1}}{2\Gamma(\alpha/\gamma)} \exp(-\beta A_y^\gamma), \quad (3)$$

which includes as particular cases the Rayleigh Probability Density Function (PDF) ( $\alpha = 2, \gamma = 2$ ), the Nakagami PDF ( $\alpha = 2m, \gamma = 2$ ) and the Weibull PDF ( $\alpha = \gamma$ ) [7]. The linkage between  $f_{A_y}(A_y)$  and the distribution  $f(s)$  of the modulating process is well known

$$f_{A_y}(A_y) = \int_0^\infty f(A_y/s) f(s) ds, \quad (4)$$



■ Fig. 1. Baseband fading simulator block diagram

where the process  $s(t)$  has a one-sided distribution and its mean value is to be unity to keep the mean energy of the process  $y(t)$  the same as the mean energy of the Gaussian process  $x_n(t)$ . This leads to the following condition

$$\int_0^{\infty} s f_s(s) ds = 1, \quad (5)$$

which is to be taken into account when we are looking for  $f_s(s)$  as a solution of the integral equation with the left side defined by (4). Since the modulating process  $s(t)$  has certain correlation function, it will affect the spectral characteristic of the resultant signal.

When  $s(t)$  is the so called  $\lambda$ -process [8], which has an exponential correlation function with decay  $\lambda$ , it is possible to compensate the above mentioned phenomena. The stochastic differential equation generating the  $\lambda$ -process  $s(t)$  with the PDF  $f_s(s)$  is written as [9]

$$\dot{s} = -\lambda s + \sqrt{\frac{\lambda}{f_s(s)} \int_{-\infty}^s s f_s(s) ds} \xi(t), \quad (6)$$

where  $\xi(t)$  is the White Gaussian noise with unit spectral density.

Since the power spectrum of a  $\lambda$ -process is formed by a single pole transfer function, where the pole is related to the correlation interval, one shall correct the poles of the transfer function of the spectral shaping filters. Let us consider the characteristic polynomial of the spectral shaping filter

$$P_n(z) = a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n} \quad (7)$$

and let the poles  $\{z_{ni}\}_1^N$  represent the roots of this polynomial. The Nyquist samples of  $s(t)$  are written as

$$s_i = \alpha_i + j\omega_i = F_s \ln z_i, \quad i = \{1, N\}, \quad (8)$$

where  $F_s$  is the sampling frequency. The correlation interval of the desired  $\lambda$ -process is to be defined in such a way that the condition

$$\lambda = \max\{a_i\}_1^N / 2 \quad (9)$$

holds.

Now we can correct the poles of the shaping filter

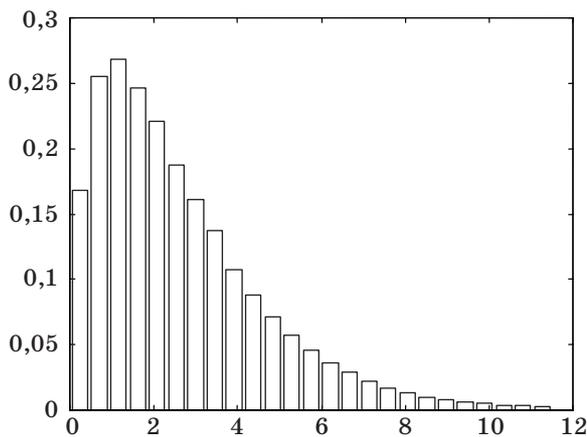
$$S_{ni} = s_i + \lambda = \alpha_i + \lambda + j\omega_i; \quad (10)$$

$$z_{ni} = z_i \exp\left(\frac{\lambda}{F_s}\right).$$

This will ensure that the modified form filter is stable (if the original was a stable one). Furthermore, if Gaussian process  $x_n(t)$  has a spectral characteristic defined by the shaping filter with the roots  $\{z_{ni}\}_1^N$  as defined in (9) and the modulating random process  $s(t)$  is a process with decay of correlation function  $\lambda$  defined by (8), then the resultant compound process  $y(t)$  has the same spectrum as the original Gaussian process  $x_n(t)$ .

## Results

The described scheme was used for simulation of a propagation channel for the case of the mobile velocity 45 mph, carrier frequency 900 MHz and sam-



■ Fig. 2. Envelope distribution of the compound process

## References

1. Salous S. *Radio Propagation. Measurement and Channel Modelling*. John Wiley & Sons, 2013. 424 p.
2. Jakes W. C. *Microwave Mobile Communications*. New York, IEEE Press, 1994. 642 p.
3. Rappaport T. S. *Wireless Communications, Principles and Practice*. Prentice Hall, 2002. 707 p.
4. Yip K., Ng T. A Simulation Model for Nakagami-m Fading Channels,  $m < 1$ . *IEEE Trans. Communications*, 2000, vol. 48, no. 2, pp. 214–221.
5. Lyandres V. Generating Model of a Sub-Rayleigh Fading. *Journal of the Franklin Institute*, 2003, vol. 340, no. 6–7, pp. 407–414.
6. Bondesson L. *Generalized Gamma Convolutions and Related Class of Distributions and Densities*. New York, Springer-Verlag, 2012. 585 p.
7. Papoulis A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. 4th ed. McGraw-Hill, 2002. 952 p.
8. Primak S., Lyandres V. Generation of Non-Gaussian Processes with Exponential Correlation. *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46, no. 5, pp. 1229–1238.
9. Primak S., Kontorovich V., Lyandres V. *Stochastic Methods and their Applications to Communications. Stochastic Differential Equations Approach*. Wiley, 2004. 434 p.

pling rate of 36 kbps. The multiplying random process was distributed according to Nakagami distribution law [7] with parameter  $m = 0,7$  (the sub-Rayleigh fading), corresponding to (4) with parameters  $1 \leq \alpha < 2$ ,  $\gamma = 2$ . The envelope probability density function of the compound process is shown on Fig. 2.

While the distributions of the envelopes for two processes are quite different, the results show a very good matching of correlation functions. Thus the presented method provides a procedure for generating of non-Gaussian processes having the desired spectral form. It may be useful for simulating of radio channel propagation with arbitrary distributed fading, while preserving the Doppler spectrum spread characteristics.

УДК 621.371

doi: 10.15217/issn1684-8853.2017. 5.113

## Компаундная модель фединга

В. З. Ляндрес<sup>а</sup>, PhD, профессор

<sup>а</sup>Негевский университет им. Бен-Гуриона, Беер Шэва, Израиль

**Введение:** выбор математической модели радиосигнала является наиболее важным этапом при конструировании имитаторов, используемых для исследования эффективности мобильных систем связи. Для такого сигнала характерны специфическая форма доплеровского спектра и случайные экспоненциально коррелированные изменения амплитуды (фединг). Обычно предполагается, что фединг имеет распределение Релея, которому соответствует представление с помощью гауссовых квадратурных компонент. Тем не менее для канала мобильной радиосвязи зачастую характерен фединг с распределением, отличным от релеевского (например, в отсутствие прямой видимости). **Цель исследования:** создание компаундной модели сигнала с любым распределением фединга с типичным распределением доплеровского смещения, зависящего от несущей частоты и скорости движения передатчика. **Результаты:** эффективность компаундной модели фединга была тестирована при моделировании канала подвижной связи с федингом, более глубоким, чем релеевский (распределение Накагами с параметром  $m = 0,7$ ), и со спектром, определяемым несущей частотой и скоростью движения передатчика. В рамках предлагаемого подхода форма спектра затухающего сигнала формируется с помощью линейной фильтрации широкополосного нормально распределенного процесса. Выход фильтра умножается на процесс с экспоненциальной корреляционной функцией и с определенным односторонним распределением. Результирующий узкополосный процесс обладает заданным распределением огибающей и типовым доплеровским спектром, определяемым параметрами системы.

**Ключевые слова** — многолучевое затухание, канал распространения мобильной радиосвязи, смешанные стохастические процессы.

**БАЛОНИН**  
**Николай**  
**Алексеевич**



Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1982 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика». В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций, в том числе трех монографий. Область научных интересов — теория динамических систем, теория идентификации, теория операторов, теория матриц, вычислительные методы, интернет-робототехника, интернет-книги с исполняемыми алгоритмами, научные социальные сети. Эл. адрес: korbendfs@mail.ru

**БЕКЕНЕВА**  
**Яна**  
**Андреевна**



Инженер кафедры вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ». В 2011 году окончила Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Приборостроение». Является автором 12 научных публикаций. Область научных интересов — компьютерная безопасность, имитационное моделирование. Эл. адрес: yana.barc@mail.ru

**БУРАКОВ**  
**Михаил**  
**Владимирович**



Доцент кафедры управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1984 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления». В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — системы интеллектуального управления, нечеткие регуляторы, нейронные сети, эволюционные алгоритмы. Эл. адрес: bmv@sknt.ru

**БАЛОНИН**  
**Юрий**  
**Николаевич**



Научный сотрудник кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». Является автором 17 научных публикаций. Область научных интересов — вычислительные методы, теория чисел. Эл. адрес: yuraball@mail.ru

**БУДКОВ**  
**Виктор**  
**Юрьевич**



Старший научный сотрудник лаборатории автономных робототехнических систем Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 2010 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Роботы и робототехнические системы». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — речевые и многомодальные пользовательские интерфейсы в робототехнике и телекоммуникациях. Эл. адрес: budkov@iias.spb.su

**БУРЯЧЕНКО**  
**Владимир**  
**Викторович**



Старший преподаватель кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск. В 2011 году окончил магистратуру Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва по специальности «Интеллектуальные системы». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 23 научных публикаций и двух свидетельств на регистрацию программных продуктов. Область научных интересов — цифровая обработка изображений и видеопоследовательностей, стабилизация видео. Эл. адрес: buryachenko@sibsau.ru

**ВЕЛИЧКО**  
Алена  
Николаевна



Программист лаборатории речевых и мультимедийных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН, магистрант Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2016 году окончила бакалавриат Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения по специальности «Теоретическая и прикладная лингвистика». Область научных интересов — речевые технологии, компьютерная паралингвистика.  
Эл. адрес: velichko.a.n@mail.ru

**ГОРШКОВ**  
Андрей  
Андреевич



Аспирант математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, стажер-исследователь лаборатории управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН. В 2015 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Математика». Является автором двух научных публикаций. Область научных интересов — теория управления в задачах нейробиологической связи, обратная задача в ЭЭГ и МЭГ, интерфейс мозг-компьютер, синхронизация сетей нейронов.  
Эл. адрес: andrey.a.gorshkov@gmail.com

**ДЖОКОВИЧ**  
Драгомир



Гражданин Канады. Почетный профессор кафедры теоретической математики Университета Ватерлоо, Ватерлоо, Онтарио, Канада. В 1960 году окончил Белградский университет по специальности «Электротехника», Белград, Югославия. В 1963 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора наук в Белградском университете. Является автором более 200 научных публикаций. Область научных интересов — линейная и полилинейная алгебра, теория групп, алгебра Ли и групп Ли, квантовая запутанность, комбинаторика.  
Эл. адрес: djokovic@uwaterloo.ca

**ЖУРАВЛЕВ**  
Максим  
Олегович



Доцент кафедры физики открытых систем Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского и кафедры геоэкологии и инженерной геологии СГТУ им. Гагарина Ю. А. В 2011 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Физик». В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов — приложение вейвлетного анализа к задачам нелинейной динамики, классическая и хаотическая синхронизация колебаний в распределенных системах электронно-волновой природы и др.  
Эл. адрес: zhuravlevmo@gmail.com

**ЗОТИН**  
Александр  
Геннадьевич



Доцент кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск. В 2005 году окончил магистратуру Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва по специальности «Информатика и вычислительная техника». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 80 научных публикаций и 16 свидетельств на регистрацию программных продуктов. Область научных интересов — цифровая обработка изображений и видеопоследовательностей, параллельные алгоритмы обработки изображений и др.  
Эл. адрес: zotin@sibsau.ru

**ИСАКОВ**  
Виктор  
Иванович



Доцент кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1977 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиоэлектронные устройства». В 1990 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций и восьми авторских свидетельств на изобретения. Область научных интересов — радиолокационные и радионавигационные системы.  
Эл. адрес: ivi@guar.ru

**КАРБОВСКИЙ  
Дмитрий  
Анатольевич**



Бакалавр кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2017 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника». Область научных интересов — вычислительные методы, теория чисел, математическое программирование. Эл. адрес: arla@inbox.ru

**КОРОНОВСКИЙ  
Алексей  
Александрович**



Проректор по научно-исследовательской работе, профессор кафедры физики открытых систем Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского. В 1995 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика и электроника». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — сложные системы, перемежаемость, динамический хаос, обработка нелинейных сигналов, моделирование живых систем. Эл. адрес: alexey.koronovskii@gmail.com

**КРАСИЛЬНИКОВА  
Ольга  
Ивановна**



Доцент кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1978 году окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиотехника». В 1991 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 90 научных публикаций и семи учебных пособий. Область научных интересов — цифровая обработка изображений. Эл. адрес: OIKrasilnikova@yandex.ru

**КАРПОВ  
Алексей  
Анатольевич**



Ведущий научный сотрудник, заведующий лабораторией речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 2002 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных публикаций, включая три монографии и три патента. Область научных интересов — многомодальные интерфейсы и системы, речевые технологии, автоматическое распознавание и синтез речи, компьютерная паралингвистика. Эл. адрес: karpov@iias.spb.su

**КРАСИЛЬНИКОВ  
Николай  
Николаевич**



Профессор кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, заслуженный деятель науки и техники РФ. В 1950 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Техническая физика». В 1963 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 240 научных публикаций, в том числе пяти монографий. Область научных интересов — цифровая обработка изображений, статистическая теория передачи и восприятия изображений, математическое моделирование процессов обработки информации зрительной системой человека. Эл. адрес: NNKrasilnikov@yandex.ru

**ЛЯНДРЕС  
Владимир  
Залманович**



Гражданин Израиля. Профессор кафедры электронных и компьютерных систем Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль. В 1966 году окончил Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. Бонч-Бруевича по специальности «Радиотехника». В 1972 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 60 научных публикаций, в том числе двух монографий и 17 патентов на изобретения. Область научных интересов — модели помех в каналах связи, марковские модели случайных процессов, алгоритмы дискретной оптимизации, алгоритмы частотного планирования. Эл. адрес: lyandres@ee.bgu.ac.il

**НОВИКОВА**  
Евгения  
Сергеевна



Доцент кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ», старший научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 2007 году окончила университет «ЛЭТИ» по специальности «Компьютерная безопасность». В 2010 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 50 научных публикаций и трех патентов на изобретения. Область научных интересов — компьютерная безопасность, информационная безопасность, выявление аномалий. Эл. адрес: novikova.evgenia123@gmail.com

**ОСАДЧИЙ**  
Алексей  
Евгеньевич



Профессор, руководитель группы методов нейрокартирования Центра нейроэкономики и когнитивных исследований Высшей школы экономики, научный сотрудник лаборатории управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН, Санкт-Петербург. В 1997 году окончил Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана. В 2003 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD) в Университете Южной Калифорнии, США. Является автором более 25 научных публикаций. Область научных интересов — алгоритмы обработки и анализа данных в методиках неинвазивного функционального картирования головного мозга человека и др. Эл. адрес: aossadtchi@hse.ru

**ПАХИРКА**  
Андрей  
Иванович



Доцент кафедры информатики и вычислительной техники Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск. В 2008 году окончил магистратуру Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва по специальности «Информатика и вычислительная техника». В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 35 научных публикаций и двух свидетельств на регистрацию программных продуктов. Область научных интересов — цифровая обработка изображений и видеопоследовательностей, распознавание образов. Эл. адрес: pahirka@sibsau.ru

**РОМАНОВСКИЙ**  
Олег  
Анатольевич



Главный научный сотрудник, заведующий Научно-образовательным центром Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, профессор Томского государственного университета. В 1985 году окончил Томский государственный университет. В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором 170 научных публикаций, пяти монографий и четырех патентов на изобретения. Область научных интересов — лазерное зондирование атмосферы, численное моделирование систем зондирования для контроля атмосферы и подстилающей поверхности, оптико-электронные приборы и системы. Эл. адрес: roa@iao.ru

**РУННОВА**  
Анастасия  
Евгеньевна



Доцент кафедры автоматизации, управления, мехатроники Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А., старший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Нелинейная динамика сложных систем», докторант Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А. В 2005 году окончила Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Физик». В 2008 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором более 40 научных публикаций. Область научных интересов — теория динамических систем, нейрофизиология, методы обработки данных. Эл. адрес: anefila@gmail.com

**САДОВНИКОВ**  
Сергей  
Александрович



Аспирант, младший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск. В 2009 году окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники по специальности «Фотоника и оптоинформатика». Является автором 12 научных публикаций. Область научных интересов — атмосферный пограничный слой, физика лазеров, спектроскопия атмосферы. Эл. адрес: sadsa@iao.ru

**СЕРГЕЕВ  
Михаил  
Борисович**



Профессор, директор Института вычислительных систем и программирования, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1980 году окончил ЛЭТИ по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и 14 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления и др.

Эл. адрес: mbse@mail.ru

**СУХАНОВ  
Александр  
Яковлевич**



Старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск.

В 2003 году окончил Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники по специальности «Программное обеспечение вычислительной техники и автоматизированных систем».

В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 40 научных публикаций.

Область научных интересов — лидарное зондирование, обратные задачи лидарного зондирования.

Эл. адрес: say@iao.ru

**ФЕДОТОВ  
Евгений  
Станиславович**



Аспирант кафедры информационных систем Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

В 2014 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Компьютерная безопасность».

Является автором четырех научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерная безопасность.

Эл. адрес: fedotov\_e1290@mail.ru

**СИТНИКОВА  
Евгения  
Юрьевна**



Ведущий научный сотрудник лаборатории нейроонтогенеза Института высшей нервной деятельности и нейрофизиологии РАН, Москва.

В 1996 году окончила Московскую академию ветеринарной медицины и биотехнологии им. К. И. Скрябина.

В 2008 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD) в Университете г. Наймеген (Radboud University Nijmegen), Нидерланды, в 2014 году — на соискание ученой степени доктора биологических наук.

Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — нейрофизиология, сенсорные системы, междисциплинарные исследования функций мозга.

Эл. адрес: jenia-s@mail.ru

**ФАВОРСКАЯ  
Маргарита  
Николаевна**



Профессор, заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск.

В 1980 году окончила Рыбинский авиационный технологический институт по специальности «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры».

В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором около 160 научных публикаций.

Область научных интересов — распознавание образов, цифровая обработка изображений, кластерный анализ, интеллектуальные технологии обработки данных и др.

Эл. адрес: favorskaya@sibsau.ru

**ФРАДКОВ  
Александр  
Львович**



Заведующий лабораторией управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

В 1971 году окончил математико-механический факультет Ленинградского государственного университета.

В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 500 научных публикаций, в том числе десяти патентов, 16 монографий и учебных пособий.

Область научных интересов — нелинейное и адаптивное управление в физико-технических системах, управление колебательными и хаотическими системами и др.

Эл. адрес: fradkov@mail.ru

**ФУРТАТ**  
**Игорь**  
**Борисович**



Доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории управления сложными системами Института проблем машиноведения РАН, профессор кафедры управления сложными системами Университета ИТМО, Санкт-Петербург.

В 2005 году окончил Астраханский государственный технический университет.

В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций.

Область научных интересов — адаптивное управление, робастное управление, оптимальное управление, системы с запаздыванием, динамические сети, электроэнергетические сети.  
Эл. адрес: cainenash@mail.ru

**ХАРЧЕНКО**  
**Ольга**  
**Викторовна**



Старший научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск.

В 1989 году окончила Томский государственный университет по специальности «Оптика».

В 2014 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором 103 научных публикаций, двух монографий и одного патента.

Область научных интересов — разработка лидарных методов зондирования параметров молекулярной атмосферы и растительности, численное моделирование, малые газовые составляющие атмосферы.

Эл. адрес: olya@iao.ru

**ХРАМОВ**  
**Александр**  
**Евгеньевич**



Заведующий кафедрой автоматизации, управления, мехатроники Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю. А., профессор кафедры электроники, колебаний и волн Саратовского государственного университета им. Н. Г. Чернышевского.

В 1996 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского.

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — нейронаука, теория сложных сетей, вейвлет-анализ и его приложения в нелинейной динамике и нейронауке, нейроинтерфейсы.  
Эл. адрес: hramovae@gmail.com

**ШЕПЕТА**  
**Дмитрий**  
**Александрович**



Доцент кафедры компьютерной математики и программирования Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, обладатель сертификата MCS.D.

В 1997 году окончил Санкт-Петербургскую государственную академию аэрокосмического приборостроения по специальности «Радиоэлектронные устройства».

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций и двух патентов на изобретения.

Область научных интересов — математическое моделирование и программирование.

Эл. адрес: alex@shepeta.com

**ШИЛОВ**  
**Николай**  
**Германович**



Доцент, старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1998 году окончил с отличием Санкт-Петербургский государственный технический университет по специальности «Экономика и управление на машиностроительных предприятиях».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов — управление знаниями, конфигурирование, профилирование, управление онтологиями, управление контекстом, проактивные рекомендуемые системы.  
Эл. адрес: nick@iias.spb.su

**ШИШЛАКОВ**  
**Владислав**  
**Федорович**



Профессор, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов».

В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных и учебно-методических публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала.  
Эл. адрес: kaf\_32@aanet.ru

**ЩЕКотов**  
**Максим**  
**Сергеевич**



Научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2013 году окончил Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Область научных интересов — управление знаниями, проектирование онтологий, управление онтологиями, управление контекстом, проактивные рекомендующие системы.

Эл. адрес: shekotov@iias.spb.su

**ШОРОВ**  
**Андрей**  
**Владимирович**



Кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник кафедры вычислительной техники Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета «ЛЭТИ».

В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный инженерно-экономический университет по специальности «Прикладная информатика в экономике».

В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 70 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерная безопасность, имитационное моделирование.

Эл. адрес: ashxz@mail.ru

**ЯКОВЛЕВ**  
**Семен**  
**Владимирович**



Научный сотрудник Института оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН, Томск, доцент кафедры управления инновациями Национального исследовательского Томского государственного университета.

В 2009 году окончил Национальный исследовательский Томский государственный университет по специальности «Оптико-электронные приборы и системы».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором 26 научных публикаций.

Область научных интересов — лазерный мониторинг атмосферы, малые газовые составляющие, физика лазеров, лидарное зондирование, спектроскопия.

Эл. адрес: ysv@iao.ru