

ISSN 1684–8853

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

4(95)/2018

4(95)/2018

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., Professor, Saint-Petersburg, Russia

Deputy Editor-in-Chief
E. Krouk
Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

Executive secretary
O. Muravtsova

Editorial Board
S. Andreev
PhD, Tampere, Finland
V. Anisimov
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
B. Bezruchko
Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia
N. Blaunstein
Dr. Sc., Professor, Beer-Sheva, Israel
C. Christodoulou
PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA
A. Dudin
Dr. Sc., Professor, Minsk, Belarus
I. Dumer
PhD., Professor, Riverside, USA
M. Favorskaya
Dr. Sc., Professor, Krasnoyarsk, Russia
L. Fortuna
PhD, Professor, Catania, Italy
A. Fradkov
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
A. Hramov
Dr. Sc., Professor, Saratov, Russia
L. Jain
PhD, Professor, Canberra, Australia
V. Khimenko
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
G. Maltsev
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
G. Matvienko
Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia
V. Melekhin
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
A. Myllari
PhD, Professor, Grenada, West Indies
Y. Podoplyokin
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
J. Seberry
PhD, Professor, Wollongong, Australia
A. Shalyto
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
A. Shelupanov
Dr. Sc., Professor, Tomsk, Russia
A. Shepeta
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
Yu. Shokin
RAS Academician, Dr. Sc., Novosibirsk, Russia
A. Smirnov
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
T. Sutikno
PhD, Associate Professor, Yogyakarta, Indonesia
Z. Yuldashev
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
R. Yusupov
RAS Corr. Member, Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia
A. Zeifman
Dr. Sc., Professor, Vologda, Russia

Editor: A. Larionova
Proofreader: T. Zvertanovskaia
Design: M. Chernenko, Y. Umniksina
Layout and composition: Y. Umniksina

Contact information
The Editorial and Publishing Center, SUAI
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia
Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: ius.spb@gmail.com
Tel.: +7 - 812 494 70 02

THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATIC

- Balonin N. A., Đoković D. Ž.** *Symmetric Hadamard Matrices of Orders 268, 412, 436 and 604* 2
- Nenashev V. A., Sergeev A. M., Kapranova E. A.** *Research and Analysis of Autocorrelation Functions of Code Sequences Formed on the Basis of Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices* 9

INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS

- Martynova L. A., Bezruk G. G., Mysliviy A. A.** *Application of Differential Mode for AUV Location* 15
- Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N., Tyurin I. V., Shamkin V. N.** *Designing a Knowledge base for Intelligent Information System of MIMO Control* 24

SYSTEM AND PROCESS MODELING

- Mikhailov V. V., Perevaryukha A. Yu., Reshetnikov Yu. S.** *Model of Fish Population Dynamics with Calculation of Individual Growth Rate and Hydrological Situation Scenarios* 31
- Runnova A. E.** *Mathematical Model of Pattern Selection for Complex Multichannel Data in EEG Processing* 39
- Ponomarev A. V.** *Model and Method for Contributor's Quality Assessment in Community Image Tagging Systems* 45

HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES

- Putin E. O., Shalyto A. A.** *Adversarial Threshold Neural Computer for Small Organic Molecular Structures* 52

INFORMATION SECURITY

- Korshunov G. I., Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A., Malyshev B. Y.** *Adaptive Management of Information Network Protection with Analysis of Intruder's Actions* 61

INFORMATION CODING AND TRANSMISSION

- Trofimov A. N.** *Random Coding Bound for Channels with Memory – Decoding Function with Partial Overlapping. Part 2. Examples and Discussion* 73

INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM

- Sergeev A. M., Blaunstein N. Sh.** *Evolution of Multiple-Access Networks – Cellular and Non-cellular – in Historical Perspective. Part 1.* 86
- Galinina O. S., Andreev S. D., Tyurlikov A. M.** *On Multiple Access of a Large Number of Machine-Type Devices in Cellular Networks* 105

CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS

- Maksimenko V. A., Harchenko A. A., Lüttjohann A.** *Automated System for Epileptic Seizures Prediction based on Multi-Channel Recordings of Electrical Brain Activity* 115

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

123

Submitted for publication 09.07.18. Passed for printing 23.08.18. Format 60×84_{1/8}.
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.

4(95)/2018

РЕЦЕНЗИРУЕМОЕ ИЗДАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Учредитель
ООО «Информационно-управляющие системы»

Издатель
Санкт-Петербургский государственный университет
аэрокосмического приборостроения

Главный редактор
М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Зам. главного редактора
Е. А. Крук,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционная коллегия:
С. Д. Андреев,
канд. техн. наук, Тампере, Финляндия
В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ
Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль
Л. С. Джайн,
д-р наук, проф., Канберра, Австралия
А. Н. Дудин,
д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь
И. И. Думер,
д-р наук, проф., Риверсайд, США
А. И. Зейфман,
д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ
К. Кристодолу,
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Г. Г. Матвиенко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ
В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
А. А. Мюллери
д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия
Ю. Ф. Подоплёкин,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Т. Сутикнуоу
д-р наук, доцент, Джокарта, Индонезия
Д. Себерри,
д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия
А. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
М. Н. Фаворская,
д-р техн. наук, проф., Красноярск, РФ
Л. Фортуна,
д-р наук, проф., Катания, Италия
А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
А. Е. Храмов,
д-р техн. наук, проф., Саратов, РФ
А. А. Шалыто,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
А. А. Шелупанов,
д-р техн. наук, проф., Томск, РФ
А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Э. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова
Корректор: Т. В. Звертановская
Дизайн: М. Л. Черненко, Ю. В. Умницына
Компьютерная верстка: Ю. В. Умницына

Адрес 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.ru

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

Balonin N. A., Doković D. Ž. Symmetric Hadamard Matrices of Orders 268, 412, 436 and 604 2

Ненашев В. А., Сергеев А. М., Капранова Е. А. Исследование и анализ автокорреляционных функций кодовых последовательностей, сформированных на основе моноциклических квазиортогональных матриц 9

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Martynova L. A., Bezruk G. G., Myslivyi A. A. Application of Differential Mode for AUV Location 15

Муромцев Д. Ю., Грибков А. Н., Тюрин И. В., Шамкин В. Н. Проектирование базы знаний интеллектуальной информационно-управляющей системы для многомерных технологических объектов 24

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Mikhailov V. V., Perevaryukha A. Yu., Reshetnikov Yu. S. Model of Fish Population Dynamics with Calculation of Individual Growth Rate and Hydrological Situation Scenarios 31

Runnova A. E. Mathematical Model of Pattern Selection for Complex Multichannel Data in EEG Processing 39

Пonomarev A. B. Модель и метод оценки качества вклада участника системы совместной разметки изображений 45

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Путин Е. О., Шалыто А. А. Нейронная сеть с конкурентным порогом для генерации малых органических молекулярных структур 52

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Коршунов Г. И., Липатников В. А., Шевченко А. А., Малышев Б. Ю. Метод адаптивного управления защитой информационно-вычислительных сетей на основе анализа динамики действий нарушителя 61

КОДИРОВАНИЕ И ПЕРЕДАЧА ИНФОРМАЦИИ

Trofimov A. N. Random Coding Bound for Channels with Memory – Decoding Function with Partial Overlapping. Part 2. Examples and Discussion 73

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Sergeev A. M., Blaunstein N. Sh. Evolution of Multiple-Access Networks – Cellular and Non-cellular – in Historical Perspective. Part 1. 86

Галинина О. С., Андреев С. Д., Тюрликов А. М. Учет специфики доступа большого числа устройств при межмашинном взаимодействии в современных сотовых сетях 105

УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ

Максименко В. А., Харченко А. А., Люттёхманн А. Автоматизированная система для предсказания эпилептического приступов по многоканальным записям электрической активности мозга 115

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Журнал входит в БД SCOPUS, в RSCI на платформе Web of Science и в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Сдано в набор 09.07.18. Подписано в печать 23.08.18. Формат 60×84^{1/8}.
Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 15,0. Уч.-изд. л. 20,8. Тираж 1000 экз (1-й завод 120 экз.). Заказ № 384.
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.

Журнал 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.
© Коллектив авторов, 2018

UDC 519.614

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-2-8

SYMMETRIC HADAMARD MATRICES OF ORDERS 268, 412, 436 AND 604

N. A. Balonin^a, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ru

D. Ž. Đoković^b, PhD, Distinguished Professor Emeritus, djokovic@uwaterloo.ca

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bUniversity 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, certain families of symmetric Hadamard matrices of small orders by using the so called propus construction. **Methods:** Orbit method for the search of three cyclic blocks to construct Hadamard matrices of propus type. This method speeds up the classical search of required sequences by distributing them into different bins using a hash-function. **Results:** Our main result is that we have constructed, for the first time, symmetric Hadamard matrices of order 268, 412, 436 and 604. The necessary difference families are constructed by restricting the search to the families which admit a nontrivial multiplier. A wide collection of new symmetric Hadamard matrices was obtained and tabulated, according to the feasible sets of parameters. **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 — Propus Construction, Difference Families, Symmetric Hadamard Matrices, Optimal Binary Sequences.

2010 Mathematics Subject Classification: 05B10, 05B20.

Citation: Balonin N. A., Đoković D. Ž. Symmetric Hadamard Matrices of Orders 268, 412, 436 and 604. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 2–8. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-2-8

Introduction

The construction of symmetric Hadamard matrices was stagnating for long time while that of skew-Hadamard matrices advanced rapidly. The reason for this discrepancy was the fact that for the latter we had a very versatile tool, namely the Goethals — Seidel (GS) array, while for the former such tool was missing. The new tool for the construction of the symmetric Hadamard matrices, so called propus array, was discovered recently [1] by J. Seberry and the first author. It was already used in [2–4] to construct many propus Hadamard matrices (such matrices are always symmetric) including some having new orders.

The authors of [1] observed that the well known Turyn series of Williamson quadruples (of symmetric circulant blocks) gives the first infinite series of propus Hadamard matrices. They also give a variation of the propus array in which they plug symmetric and commuting Williamson type quadruples to construct another infinite series of symmetric Hadamard matrices. Yet another infinite series of propus Hadamard matrices was identified in [4, Theorem 5].

In this paper we continue our previous work [2, 3] where we used the propus construction to find new symmetric Hadamard matrices. We refer to these papers and [5] for the more comprehensive description of this construction and the definitions

of the GS-array and GS-difference families. As the propus difference families play a crucial role in the paper, we shall define them precisely in the next section and specify the propus array that we use.

The first Hadamard matrix of order $4 \cdot 67 = 268$ was constructed by Sawade in 1985 [6]. The first skew-Hadamard matrix of the same order was constructed in 1992 by one of the authors [7]. However a symmetric Hadamard matrix of order 268 was not discovered so far. We present in Sect. 3 six propus difference families in the cyclic group \mathbf{Z}_{67} which we use to construct six symmetric Hadamard matrices of order 268. Moreover, in the same section we also construct the first examples of symmetric Hadamard matrices of orders 412, 436 and 604. Examples of symmetric Hadamard matrices of order $4v$ are now known [2–4, 8] for all odd positive integers $v < 200$ except for

59, 65, 81, 89, 93, 101, 107, 119, 127, 133, 149,
153, 163, 167, 179, 183, 189, 191, 193.

The binary sequences, i.e., $\{\pm 1\}$ -sequences, of length $v \equiv 1 \pmod{4}$ are called *optimal* if the off-peak values of its periodic autocorrelation function are $+1$ or -3 . Such sequence is *balanced* if its sum is ± 1 . A computer generated list of binary balanced optimal sequences of length $v \equiv 1 \pmod{4}$ is given in [9] for $v \leq 47$. As a byproduct of our computations of propus difference families we have obtained bi-

nary balanced optimal sequences of lengths 49 and 61. They are presented in Sect. 4.

In addition to the propus difference families used in Sect. 3, we give a more extensive list of such families in Sect. 5.

While trying to verify the proof of [1, Corollary 1] we observed that this corollary is stated incorrectly. The second sentence of the corollary should read: "Then there exist symmetric Williamson type matrices of order $q + 2$ and a symmetric propus-type Hadamard matrix of order $4(q + 2)$ ". Consequently, $4(2q + 1)$ should be replaced with $4(q + 2)$ in the abstract as well as in line 3 on p. 351. Further, the two lists, one on p. 352 and the other on p. 356 should be corrected. The integers 59, 67, 81, 89, 105, 111, 119, 127 should be removed from the former, while 97, 99 should be removed from and 59, 67, 89, 119, 127 inserted into the latter. (The cases 59, 89, 119, 127 are still unresolved.)

Preliminaries

Let G be a finite abelian group of order $v > 1$. Let $(X_i), i = 1, 2, \dots, m$, be a difference family in G . We fix its parameter set

$$(v; k_1, k_2, \dots, k_m; \lambda), k_i = |X_i|. \quad (1)$$

Recall that these parameters satisfy the equation

$$\sum_{i=1}^t k_i(k_i - 1) = \lambda(v - 1). \quad (2)$$

The set of difference families in G having this parameter set is invariant under the following elementary transformations:

- a) for some i replace X_i by a translate $g + X_i, g \in G$;
- b) for some i replace X_i by $-X_i$;
- c) for all i replace X_i by its image $\alpha(X_i)$ under an automorphism α of G ;
- d) exchange X_i and X_j provided that $|X_i| = |X_j|$.

Definition 1. We say that two difference families with the same parameter set are equivalent if one can be transformed to the other by a finite sequence of elementary transformations.

Definition 2. Let (X_i) be a difference family in G . We say that an automorphism α of G is a multiplier of this family if each set $\alpha(X_i)$ is a translate of X_i .

If a positive integer m is relatively prime to v then the multiplication by m is an automorphism of G . If this automorphism is a multiplier of a difference family, then we also say that the integer m is a multiplier or a numeric multiplier of that family.

The multipliers of a difference family in G form a subgroup of the automorphism group of G . All difference families that we construct in this paper

have nontrivial multipliers. This follows from the fact that we use only the base blocks X_i which are union of orbits of a fixed nontrivial subgroup H of the automorphism group of G . We refer to this method of constructing difference families as the orbit method.

We are only interested in GS-difference families formally introduced in [5] and [10]. They consist of four base blocks (X_1, X_2, X_3, X_4) and their parameter sets, also known as the GS-parameter sets, satisfy besides the obvious condition (2) (with $m = 4$) also the condition

$$\sum_{i=1}^4 k_i = \lambda + v. \quad (3)$$

By eliminating the parameter λ from the equations (2) and (3), we obtain that

$$\sum_{i=1}^4 (v - 2k_i)^2 = 4v. \quad (4)$$

If $k_i = k_j$ for some $i \neq j$ in a GS-parameter set $(v; k_1, k_2, k_3, k_4; \lambda)$ then we say that this parameter set is a propus parameter set.

In fact we shall use only a very special class of GS-difference families known as propus difference families. We adopt here the following definition of these families.

Definition 3. A propus difference family is a GS-difference family $(X_i), i = 1, 2, 3, 4$, subject to two additional conditions:

- a) two of the base blocks are equal, say $X_i = X_j$ for some $i < j$, which implies that $k_i = k_j$;
- b) at least one of the other two base blocks is symmetric.

(We say that a subset $X \subseteq G$ is symmetric if $-X = X$.)

Unless stated otherwise, we shall assume from now on that G is cyclic. We identify G with the additive group of the ring \mathbf{Z}_v of integers modulo v . We denote by \mathbf{Z}_v^* the group of units (invertible elements) of \mathbf{Z}_v . We identify the automorphism group of G with \mathbf{Z}_v^* . Thus, every automorphism α of \mathbf{Z}_v is just the multiplication modulo v by some integer k relatively prime to v .

To any subset $X \subseteq \mathbf{Z}_v$ we associate the binary sequence (i.e., a sequence with entries +1 and -1) of length v , say $(x_0, x_1, \dots, x_{v-1})$, where $x_i = -1$ if and only if $i \in X$. By abuse of language, we shall use the symbol X to denote also the binary sequence associated to the subset X .

Let (X_i) be a GS-difference family in \mathbf{Z}_v . Further, let \mathbf{A}_i be the circulant matrix having the sequence X_i as its first row. Then the \mathbf{A}_i satisfy the equation

$$\sum_{i=1}^4 \mathbf{A}_i^T \mathbf{A}_i = 4v\mathbf{I}_v, \quad (5)$$

where I_v is the identity matrix of order v . This equation guarantees that, after plugging the (A_i) into the GS-array, we obtain a Hadamard matrix.

If (X_i) is a propus difference family, we say that the corresponding matrices (A_i) are *propus matrices*. By plugging these (A_i) , in suitable order, into the *propus array*

$$\begin{bmatrix} -A_1 & A_2R & A_3R & A_4R \\ A_3R & RA_4 & A_1 & -RA_2 \\ A_2R & A_1 & -RA_4 & RA_3 \\ A_4R & -RA_3 & RA_2 & A_1 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

where R is the back-diagonal permutation matrix, we obtain a symmetric Hadamard matrix of order $4v$. The ordering should be chosen so that A_1 is symmetric and $A_2 = A_3$.

We construct the base blocks X_i as unions of certain orbits of a small nontrivial subgroup $H \subseteq Z_v^*$ (mostly of order 3 or 5). When recording a base block, to save space, we just list the representatives of the orbits which occur in the block. As a representative, we always choose the smallest integer of the orbit.

The Cases $v = 67, 103, 109, 151$

In this section we list six non-equivalent examples of propus difference families in Z_{67} , three such families in Z_{103} , two in Z_{109} , and a single one in Z_{151} . By using the propus array, they provide the first examples of symmetric Hadamard matrices of orders 268, 412, 436 and 604, respectively.

In the case $v = 67$, up to a permutation of the k_i s, there are three feasible propus parameter sets for the subgroup $H = \{1, 29, 37\} \subseteq Z_{67}^*$. For each of them we have found several propus difference families. We list only two families per parameter set. The block X_4 is symmetric in the first two families while X_1 is symmetric in the remaining four families.

Let us explain how we record the base blocks. As an example, we take the block X_2 of the first family in Table 1. It is the union of ten H-orbits whose representatives are the integers 0, 2, 4, 6, 16, 17, 25, 27, 30, 41. As each nontrivial orbit has size 3, the block X_2 has the size $1 + 9 \cdot 3 = 28$. The blocks X_1 and X_4 are given similarly. In all difference families listed in this and the next section we have $X_2 = X_3$ and we record only the blocks X_1, X_2 and X_4 in that order. The families having the same parameter set are separated by a semicolon.

■ Table 1. Propus difference families in Z_{67}, Z_{103}, Z_{109} and Z_{151}

(67; 33, 28, 28, 31; 53), $H = \{1, 29, 37\}$		
[1, 3, 4, 10, 12, 15, 17, 30, 34, 36, 41],	[0, 2, 4, 6, 16, 17, 25, 27, 30, 41],	[0, 1, 4, 5, 8, 10, 16, 18, 30, 32, 36];
[1, 2, 8, 15, 16, 18, 25, 30, 32, 34, 36],	[0, 2, 3, 6, 8, 9, 17, 18, 34, 36],	[0, 1, 2, 4, 5, 9, 16, 17, 18, 30, 41]
(67; 30, 31, 31, 27; 52), $H = \{1, 29, 37\}$		
[1, 5, 6, 15, 16, 17, 27, 30, 34, 41],	[0, 2, 4, 9, 10, 12, 16, 23, 30, 36, 41],	[5, 8, 9, 12, 16, 17, 23, 25, 41];
[3, 5, 8, 10, 12, 16, 23, 25, 32, 36],	[0, 5, 6, 9, 12, 15, 16, 17, 23, 27, 30],	[1, 2, 3, 4, 8, 27, 30, 32, 36]
(67; 30, 30, 30, 28; 51), $H = \{1, 29, 37\}$		
[3, 4, 5, 8, 10, 16, 18, 23, 32, 36],	[3, 6, 9, 10, 12, 15, 17, 23, 25, 41],	[0, 5, 9, 10, 12, 15, 17, 27, 30, 41];
[2, 3, 4, 9, 10, 17, 18, 23, 32, 41],	[1, 2, 9, 16, 17, 23, 27, 32, 34, 41],	[0, 3, 10, 15, 16, 17, 23, 27, 32, 34]
(103; 48, 51, 51, 42; 89), $H = \{1, 46, 56\}$		
[3, 4, 14, 17, 19, 21, 29, 30, 31, 33, 38, 40, 49, 51, 55, 62],	[2, 3, 4, 6, 7, 14, 15, 22, 29, 30, 31, 38, 42, 44, 47, 49, 62],	
[3, 6, 8, 10, 15, 17, 21, 31, 33, 38, 42, 44, 55, 60];		
[1, 3, 6, 8, 10, 11, 21, 30, 33, 40, 44, 47, 49, 51, 55, 62],	[5, 6, 7, 11, 12, 14, 19, 23, 29, 30, 38, 40, 47, 51, 55, 60, 62],	
[4, 6, 7, 8, 10, 12, 17, 20, 22, 33, 42, 44, 49, 55]		
(109; 52, 49, 49, 48; 89), $H = \{1, 45, 63\}$		
[0, 3, 4, 6, 9, 10, 11, 12, 18, 19, 20, 24, 31, 36, 43, 48, 50, 60],	[0, 1, 2, 3, 5, 9, 10, 16, 19, 20, 23, 25, 41, 46, 55, 57, 62],	
[1, 2, 4, 6, 9, 10, 15, 19, 20, 24, 31, 36, 38, 46, 48, 57];		
[0, 3, 5, 8, 11, 12, 13, 15, 18, 20, 30, 31, 41, 43, 46, 53, 55, 57],	[0, 1, 2, 3, 5, 8, 11, 12, 13, 16, 29, 31, 38, 41, 48, 50, 57],	
[3, 6, 8, 10, 18, 20, 23, 24, 25, 29, 41, 48, 55, 57, 60, 62];		
[0, 1, 2, 3, 6, 9, 10, 12, 15, 18, 24, 25, 36, 41, 43, 48, 53, 57],	[0, 1, 3, 6, 8, 9, 11, 12, 13, 18, 23, 29, 31, 36, 41, 43, 57],	
[1, 3, 9, 11, 13, 16, 18, 29, 30, 31, 43, 46, 50, 53, 62, 67]		
(151; 71, 71, 71, 66; 128), $H = \{1, 8, 19, 59, 64\}$		
[0, 2, 5, 6, 7, 11, 15, 17, 23, 27, 30, 34, 37, 51, 68],	[0, 1, 2, 3, 4, 14, 17, 23, 27, 28, 34, 47, 51, 68, 87],	
[0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 29, 34, 46, 47, 51, 68]		

■ **Table 3.** Propus difference families with $v \equiv 1 \pmod{6}$ a prime

(7; 3, 3, 3, 1; 3), $H = \{1, 2, 4\}$ [3], [3], [0]	(61; 30, 25, 25, 30; 49), $H = \{1, 9, 20, 34, 58\}$ [4, 5, 10, 12, 13, 26], [1, 5, 6, 8, 26], [2, 4, 10, 12, 13, 26]
(13; 6, 6, 6, 3; 8), $H = \{1, 3, 9\}$ [1, 4], [4, 7], [4]	(61; 30, 25, 25, 30; 49), $H = \{1, 13, 47\}$ [1, 4, 6, 8, 9, 11, 14, 18, 23, 32], [0, 6, 7, 8, 14, 22, 23, 27, 28], [1, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 28, 36]
(13; 6, 4, 4, 6; 7), $H = \{1, 3, 9\}$ [2, 7], [0, 4], [1, 7]	(61; 25, 30, 30, 25; 49), $H = \{1, 13, 47\}$ [0, 3, 6, 7, 8, 18, 22, 23, 31], [1, 2, 9, 14, 16, 18, 22, 23, 31, 36], [0, 1, 8, 9, 18, 27, 28, 31, 36]
(19; 7, 9, 9, 6; 12), $H = \{1, 7, 11\}$ [0, 4, 10], [2, 4, 5], [1, 10]; [0, 1, 8], [1, 4, 10], [1, 8]	(61; 28, 28, 28, 24; 47), $H = \{1, 13, 47\}$ [0, 1, 3, 4, 14, 16, 18, 23, 31, 32], [0, 3, 4, 9, 14, 16, 18, 22, 28, 32] ¹ , [2, 6, 8, 11, 18, 23, 28, 32]
(19; 9, 7, 7, 7; 11), $H = \{1, 7, 11\}$ [2, 4, 8], [0, 5, 10], [0, 1, 8]	(61; 28, 27, 27, 25; 49), $H = \{1, 13, 47\}$ [0, 1, 2, 4, 7, 8, 16, 28, 32, 36], [1, 2, 7, 8, 9, 12, 16, 27, 36], [0, 2, 7, 12, 16, 27, 28, 31, 36]
(31; 15, 15, 15, 10; 24), $H = \{1, 2, 4, 8, 16\}$ [3, 7, 15], [1, 3, 15], [1, 15]	(73; 36, 36, 36, 28; 63), $H = \{1, 8, 64\}$ [3, 5, 6, 11, 12, 21, 25, 26, 27, 33, 35, 43], [3, 4, 9, 14, 17, 18, 21, 26, 34, 35, 42, 43], [0, 1, 7, 13, 18, 21, 25, 33, 35, 42]
(31; 15, 12, 12, 13; 21), $H = \{1, 5, 25\}$ [1, 2, 4, 8, 12], [2, 4, 8, 11], [0, 2, 4, 11, 12]	(73; 36, 31, 31, 33; 58), $H = \{1, 8, 64\}$ [3, 4, 5, 6, 13, 14, 25, 27, 33, 34, 36, 42], [0, 2, 3, 5, 9, 18, 21, 26, 27, 35, 42], [1, 5, 7, 11, 18, 21, 27, 33, 34, 42, 43]
(31; 13, 13, 13, 12; 20), $H = \{1, 5, 25\}$ [0, 1, 2, 6, 12], [0, 2, 6, 8, 11], [2, 4, 12, 16]; [0, 2, 4, 11, 17], [0, 3, 8, 11, 17], [1, 4, 6, 11]	(73; 31, 36, 36, 30; 60), $H = \{1, 8, 64\}$ [0, 2, 7, 11, 12, 13, 17, 18, 26, 35, 42], [3, 5, 6, 12, 14, 18, 21, 26, 27, 33, 34, 35], [1, 2, 5, 6, 9, 12, 26, 34, 36, 42]
(37; 18, 15, 15, 15; 26), $H = \{1, 10, 26\}$ [2, 3, 5, 7, 17, 18], [1, 3, 7, 17, 21], [6, 7, 14, 17, 21]	(73; 31, 34, 34, 31; 55), $H = \{1, 8, 64\}$ [0, 1, 3, 5, 7, 9, 12, 17, 27, 33, 35], [0, 1, 2, 5, 9, 11, 12, 18, 21, 27, 36, 43], [0, 1, 3, 9, 18, 21, 26, 27, 35, 36, 42]
(37; 16, 18, 18, 13; 28), $H = \{1, 10, 26\}$ [0, 1, 7, 14, 17, 21], [1, 2, 6, 9, 14, 21], [0, 1, 2, 11, 17]	(73; 31, 36, 36, 30; 60), $H = \{1, 8, 64\}$ [0, 1, 4, 14, 17, 21, 26, 34, 36, 42, 43], [2, 3, 4, 7, 12, 14, 25, 27, 35, 36, 42, 43], [1, 4, 9, 11, 12, 13, 26, 35, 36, 42]
(43; 21, 21, 21, 15; 35), $H = \{1, 4, 11, 16, 21, 35, 41\}$ [6, 7, 9], [1, 6, 9], [0, 3, 6]	(73; 34, 33, 33, 30; 57), $H = \{1, 8, 64\}$ [0, 2, 3, 4, 6, 7, 9, 12, 13, 26, 27, 35], [1, 2, 5, 6, 7, 12, 17, 21, 25, 26, 35], [2, 4, 6, 7, 11, 17, 18, 25, 26, 36]
(43; 19, 18, 18, 18; 30), $H = \{1, 6, 36\}$ [0, 2, 4, 9, 14, 19, 20], [2, 3, 10, 13, 20, 26], [3, 4, 10, 13, 20, 21]; [0, 5, 7, 9, 10, 20, 21], [1, 3, 4, 10, 14, 21], [1, 3, 5, 7, 13, 21]	(157; 78, 78, 78, 66; 143), $H = \{1, 14, 16, 39, 46, 67, 75, 93,$ 99, 101, 108, 130, 153} [2, 3, 7, 9, 11, 13], [3, 5, 6, 11, 13, 15], [0, 3, 4, 5, 7, 13]
(43; 18, 21, 21, 16; 33), $H = \{1, 6, 36\}$ [1, 5, 7, 10, 13, 26], [2, 3, 5, 13, 14, 20, 26], [0, 1, 7, 9, 19, 20]	(307; 153, 153, 153, 136; 288), $H = \{1, 9, 81, 115, 114, 105,$ 24, 216, 102, 304, 280, 64, 269, 272, 299, 235, 273} [2, 3, 4, 5, 6, 7, 14, 20, 30], [4, 5, 7, 12, 14, 28, 30, 31, 49], [2, 6, 7, 10, 21, 28, 30, 31]
(49; 22, 24, 24, 18; 39), $H = \{1, 18, 30\}$ [0, 1, 6, 7, 8, 9, 13, 16], [3, 7, 8, 9, 13, 16, 21, 29], [3, 6, 8, 12, 16, 29]; [0, 2, 7, 8, 13, 16, 19, 26], [2, 6, 9, 12, 16, 24, 26, 29], [1, 3, 7, 8, 19, 21]; [0, 1, 3, 4, 12, 13, 16, 24], [1, 6, 8, 13, 16, 19, 24, 29], [1, 4, 6, 16, 19, 26]	
(49; 22, 22, 22, 19; 36), $H = \{1, 18, 30\}$ [0, 4, 6, 7, 9, 13, 19, 26], [0, 1, 6, 7, 9, 12, 16, 29], [0, 1, 6, 7, 16, 19, 21]; [0, 3, 4, 6, 7, 12, 19, 29], [0, 1, 2, 4, 7, 8, 13, 19], [0, 1, 3, 7, 8, 19, 21]	
(61; 30, 26, 26, 26; 47), $H = \{1, 9, 20, 34, 58\}$ [2, 6, 8, 10, 23, 26], [0, 1, 4, 5, 6, 8], [0, 3, 5, 6, 10, 12]	

¹The binary sequence of this block has only four correlation values 61, 1, -3, and -11.

Propus Difference Families

In Table 3 we list propus difference families that we constructed by using the method of orbits. We only consider the cases where the subgroup H is non-trivial. If each of the k_i is the size of an H -invariant subset of \mathbf{Z}_v , then we say that the parameter set is H -feasible (or just feasible when H is known from the context). The case $v = 67$ is omitted as it was treated separately in section 3.

We can permute the X_i and replace any X_i with its complement. When listing the propus difference families it is convenient to introduce some additional restrictions on the propus parameter sets (1). We shall assume that each $k_i \leq v/2$, $k_2 = k_3$ and that $k_1 \geq k_4$.

In Table 3 below we first record the propus parameter set, and the subgroup H of the multiplicative group of the finite field \mathbf{Z}_v . Each of the three blocks $X_1, X_2 = X_3, X_4$ is a union of orbits of H acting on the additive group of \mathbf{Z}_v . In order to specify which orbits constitute a block we just list the representatives of these orbits. As representative we choose the smallest integer in the orbit. For instance, 0 is the unique representative of the trivial orbit $\{0\}$, and 1 is the representative of the orbit H .

When two or more difference families are listed for the same parameter set, they are separated by a semicolon. When $k_1 > k_4$ we have tried to find propus difference families with X_1 symmetric as well as those with X_4 symmetric. However, in some cases we did not succeed.

The last two families have the same parameter sets as the corresponding Turyn propus families of the same lengths but they are not equivalent to them.

Acknowledgements

The authors are indebted to an anonymous referee for his comments and to Tamara Balonina for converting the manuscript into the printing format. The research of the first author 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. The second author acknowledges generous support by NSERC. His work was enabled in part by support provided by the Shared Hierarchical Academic

Research Computing Network (www.sharcnet.ca) and Compute/Calcul Canada (www.computecanada.ca).

References

1. Seberry J., and Balonin N. A. Two Infinite Families of Symmetric Hadamard Matrices. *Australasian Journal of Combinatorics*, 2017, no. 69(3), pp. 349–357.
2. Balonin N. A., Balonin Y. N., Đoković D. Ž., Karbovskiy D. A., Sergeev M. B. Construction of Symmetric Hadamard Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 5, pp. 2–11 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.5.2
3. Balonin N. A., Đoković D. Ž., and Karbovskiy D. A. Construction of Symmetric Hadamard Matrices of Order $4v$ for $v = 47; 73; 113$. *Spec. Matrices*, 2018, vol. 6, pp. 11–22. doi:https://doi.org/10.1515/spma-2018-0002
4. Di Mateo O., Đoković D. Ž., Kotsireas I. S. Symmetric Hadamard Matrices of Order 116 and 172 Exist. *Special Matrices*, 2015, vol. 3, pp. 227–234.
5. Đoković D. Ž., and Kotsireas I. S. Goethals-Seidel Difference Families with Symmetric or Skew Base Blocks. *Math. Comput. Sci.* <https://doi.org/10.1007/S11786-018-0381-1>
6. Sawade K. A Hadamard Matrix of Order 268. *Graphs and Combinatorics*, 1985, vol. 1, iss. 1, pp. 185–187.
7. Đoković D. Ž. Construction of Some New Hadamard Matrices. *Bull. Austral. Math. Soc.*, 1992, vol. 45, pp. 327–332.
8. Craigen R., and Kharaghani H. Hadamard Matrices and Hadamard Designs. In: *Handbook of Combinatorial Designs*. 2nd ed. C. J. Colbourn, J. H. Dinitz (eds.). Discrete Mathematics and its Applications (Boca Raton). Chapman & Hall, 2007. Pp. 273–280.
9. Arasu K. T. Sequences and Arrays with Desirable Correlation Properties. *Information Security, Coding Theory and Related Combinatorics*, IOS Press, 2011, vol. 29, pp. 136–171. doi:10.3233/978-1-60750-663-8-136
10. Đoković D. Ž., and Kotsireas I. S. Algorithms for Difference Families in Finite Abelian Groups. *arXiv:1801.07627* [math.CO], 23 Jan 2018.
11. Mertens S., and Bessenrodt C. On the Ground States of the Bernasconi Model. *Journal of Physics A: Mathematical and General*, 1998, vol. 31, iss. 16, pp. 3731–3749. doi:10.1088/0305-4470/31/16/004

УДК 519.614

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-2-8

Симметричные матрицы Адамара порядков 268, 412, 436 и 604

Балонин Н. А.^а, доктор техн. наук, профессор, korbendfs@mail.ru

Джокович Д. Ж.^б, PhD, профессор, djokovic@uwaterloo.ca

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

^бУниверситет Ватерлоо, Ватерлоо, Онтарио, N2L 3G1, Канада

Цель: исследовать более полно, чем это было известно ранее, выделенные семейства симметричных матриц Адамара малых порядков, используя так называемую пропуск-конструкцию. **Методы:** метод орбит поиска трех циклических блоков, составляющих матрицу Адамара типа пропуск. Этот метод ускоряет классический поиск требуемых последовательностей с предварительной сортировкой их на непересекающиеся множества потенциальных решений с помощью хэш-функции. **Результаты:** основной результат состоит в том, что впервые удалось сконструировать симметричные матрицы Адамара порядков 268, 412, 436 и 604. Необходимые разностные семейства сконструированы посредством выделения тех из них, которые содержат заданный нетривиальный множитель. Получено и классифицировано в таблицы обширное множество новых симметричных матриц Адамара, отличающихся между собой индивидуальными наборами параметров. **Практическое значение:** матрицы Адамара имеют непосредственное практическое значение для 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 — пропуск-конструкция, разностные семейства, симметричные матрицы Адамара, оптимальные бинарные последовательности.

Цитирование: Balonin N. A., Đoković D. Ž. Symmetric Hadamard Matrices of Orders 268, 412, 436 and 604 // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 2–8. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-2-8

Citation: Balonin N. A., Đoković D. Ž. Symmetric Hadamard Matrices of Orders 268, 412, 436 and 604. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 2–8. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-2-8

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.

ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ АВТОКОРРЕЛЯЦИОННЫХ ФУНКЦИЙ КОДОВЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ, СФОРМИРОВАННЫХ НА ОСНОВЕ МОНОЦИКЛИЧЕСКИХ КВАЗИОРТОГОНАЛЬНЫХ МАТРИЦ

В. А. Ненашев^а, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-5285-2051, nenashev.va@gmail.com

А. М. Сергеев^а, старший преподаватель, orcid.org/0000-0002-4788-9869, mbse@mail.ru

Е. А. Капранова^а, студент, katyakatya1998-2010@mail.ru

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: при решении задачи повышения помехоустойчивости радиолокационных каналов широкое распространение получили коды Баркера, представляющие собой двоичные последовательности (коды) конечных длин 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13. Однако кодовые последовательности для $n > 13$ неизвестны, также не применялись для подобных целей и последовательности, полученные из квазиортогональной матрицы Мерсенна. **Цель:** исследовать применимость к сжатию сложного модулированного сигнала последовательностей Мерсенна, полученных из первых строк моноциклической квазиортогональной матрицы Мерсенна, как альтернативы кодам Баркера. **Результаты:** выявлено, что характеристики автокорреляционных функций для кодов Мерсенна длины 3, 7 и 11 превышают аналогичные характеристики кодов Баркера. Это является основой для обеспечения большей помехоустойчивости зондирующих сигналов в радиолокационных каналах, а также повышения вероятности их правильного обнаружения и доказывает целесообразность и эффективность их применения для амплитудного и фазового модулирования радиосигналов. **Практическая значимость:** использование полученных результатов позволяет повысить характеристики сжатия в радиолокационных системах при решении задачи обнаружения целей на фоне шумов и помех. Широкое применение кодов Баркера длины 3, 7 и 11 в цифровых системах передачи данных обеспечивает особый интерес к аналогичным кодам Мерсенна при реализации помехоустойчивой передачи данных в радиоканалах в условиях сложной электромагнитной обстановки.

Ключевые слова — моноциклические квазиортогональные матрицы, матрицы Мерсенна, коды Баркера, коды Мерсенна, сжатие, модулированные сигналы, радиолокационный канал, помехоустойчивость, автокорреляционная функция.

Цитирование: Ненашев В. А., Сергеев А. М., Капранова Е. А. Исследование и анализ автокорреляционных функций кодовых последовательностей, сформированных на основе моноциклических квазиортогональных матриц // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 9–14. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-9-14

Citation: Nenashev V. A., Sergeev A. M., Kapranova E. A. Research and Analysis of Autocorrelation Functions of Code Sequences Formed on the Basis of Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 9–14 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-9-14

Введение

В настоящее время в интересах повышения помехоустойчивости каналов радиолокационных систем (РЛС) находят широкое применение методы сжатия сложных сигналов, в частности сигналов с фазовой модуляцией (ФМ) [1–4]. Применение ФМ-сигналов позволяет существенно повысить помехоустойчивость радиолокационных каналов.

Наибольшее распространение при решении указанной задачи получили коды Баркера, представляющие собой двоичные последовательности (коды) конечных длин 2, 3, 4, 5, 7, 11, 13.

Коды Баркера являются особыми двоичными кодами с максимальными уровнями боковых лепестков по шкале времени, равными $-20\log(n)$, где n — длина кода. Энергия в области бокового лепестка минимальная и одинаково распределена, за счет чего реализуется равенство амплитуд

всех боковых максимумов автокорреляционных функций (АКФ) при их минимально возможном уровне. Код Баркера является единственным однородным фазовым кодом, достигающим этого уровня. Кодовые последовательности, обладающие такими свойствами, для $n > 13$ неизвестны.

Кодовые последовательности Баркера и Мерсенна

До сих пор не в полной мере исследован вопрос, возможно ли получить совершенные кодовые последовательности длины, большей 13. Известно, что не существует решений для нечетных длин со значениями n между 13 и 101. Кроме того, утверждается, что надежда на существование нескольких решений для нечетных длин, превышающих 101, маловероятна [5].

Очевидно, что один из путей поиска решений может состоять в том, чтобы несколько ослабить требования к АКФ и допустить значения вторичных пиков, превышающих 1. Это было бы приемлемым в том случае, когда центральный пик значительно больше 1. Однако до настоящего времени общая теория этого вопроса остается непроработанной.

В последнее время сформировалась и развивается теория квазиортогональных матриц, к которым относятся специальные матрицы Мерсенна, существующие на порядках $n = 4t - 1$, где t — натуральное число.

Квазиортогональными матрицами Мерсенна порядка $n(M_n)$ [6] называются матрицы с двумя значениями элементов $\{1, -b\}$, где $|b| < 1$, удовлетворяющие квадратичному условию связи $M_n^T M_n = \omega(n)I$. Здесь I — единичная матрица;

$$\omega(n) = \frac{(n+1) + (n-1)b^2}{2} \text{ — переменный вес.}$$

Указанные матрицы, являясь ядром матриц Адамара и обобщая их, могут, как и они, иметь различные конструкции, в том числе циклическую симметричную [7–10].

Было замечено, что кодовые последовательности Баркера длины 3, 7 и 11 являются кодовыми последовательностями мерсеннова типа, сформированные на основе моноциклических квазиортогональных матриц. Количество положительных элементов кода отличается от количества отрицательных на единицу (табл. 1).

Однако у кодовых последовательностей Мерсенна, в отличие от последовательностей Баркера, отрицательный элемент равен $-b$ [6]. Таким образом, при $n = 3$ значение $b = 1/2$, в остальных

$$\text{случаях } b = \frac{s \pm \sqrt{4s}}{s-4}, \text{ где } s = n + 1.$$

На портретах матриц Мерсенна (рис. 1) белое поле соответствует элементу матрицы со значением 1, черное поле — элементу со значением $-b$.

Сами же конструкции последовательности Мерсенна могут быть получены для всех простых чисел длины $p = 4t - 1$ с помощью вычисления последовательности Лежандра [11].

Эти последовательности формируются через вычисления «квадратичных символов» (символов Лежандра), определенных на $1 \leq a \leq p - 1$ по выражению

$$\left(\frac{a}{p}\right) = \begin{cases} -1, & \text{если } x^2 = a \pmod{p} \\ 1 & \text{в остальных случаях} \end{cases},$$

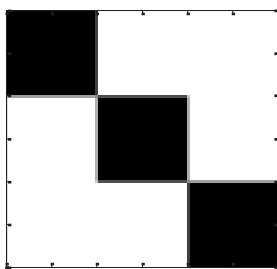
где p — длина последовательности; $\left(\frac{a}{p}\right)$ — вычисленные позиции отрицательных и положительных элементов последовательности; x — номер позиции последовательности от 1 до p .

Таким образом, можно предположить, что имеется возможность получить кодовые последовательности Мерсенна, аналогичные по своим свойствам кодовым последовательностям Баркера.

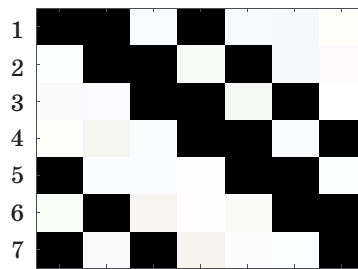
■ Таблица 1. Кодовые последовательности Баркера и Мерсенна

■ Table 1. Barker and Mersenne code sequences

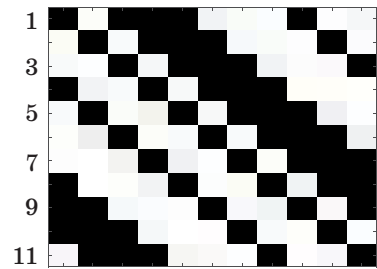
Длина кода, n	Коды Баркера	Коды Мерсенна
3	1 1 -1	-b 1 1
7	1 1 1 -1 -1 1 -1	-b -b 1 -b 1 1 1
11	1 1 1 -1 -1 -1 1 -1 -1 1 -1	-b 1 -b -b -b 1 1 1 -b 1 1



M_3



M_7



M_{11}

■ Рис. 1. Портреты моноциклических квазиортогональных матриц Мерсенна порядков 3, 7 и 11

■ Fig. 1. Portraits of monocyclic quasi-orthogonal Mersenne matrices of orders 3, 7 and 11

Однако следует провести сравнительный анализ кодовых последовательностей Мерсенна и Баркера в целях оценки характеристик АКФ.

Модель огибающей модулированного сигнала

Математическая модель ФМ-сигнала представляет собой последовательность примыкающих элементарных (простых) импульсов одинаковой формы длительностью $t_{и}$, начальные фазы высокочастотного заполнения которых могут принимать заданные дискретные значения. Элементарные импульсы ФМ-сигнала обычно имеют форму, близкую к прямоугольной. При этом амплитуды элементарных импульсов равны, а начальная фаза принимает значения 0 либо π . Тогда последовательность значений начальной фазы высокочастотного заполнения элементарных импульсов $\{\varphi_i, i = \overline{1, n}\}$ можно определить последовательностью чисел $\{d_i, i = \overline{1, n}\}$, принимающих значения 0 и 1 по следующему правилу [12, 13]:

$$d_i = 0, \text{ если } \varphi_i = 0;$$

$$d_i = 1, \text{ если } \varphi_i = \pi.$$

Из этого следует, что свойства ФМ-сигнала определяются свойствами выбранной последовательности. Поэтому синтез ФМ-сигнала обычно сводится к ее выбору. Поскольку огибающая сигнала на выходе согласованного фильтра определяется корреляционной функцией сигнала, на который он настроен, то определяющим при выборе кодирующей последовательности является ее АКФ. Она должна обладать необходимыми свойствами, в частности, заданным уровнем боковых лепестков и шириной главного лепестка [12–14].

Код Баркера длиной 11 и соответствующая ему огибающая ФМ-сигнала представлены на рис. 2, а и б.

Сравнительный анализ АКФ кодовых последовательностей Баркера и Мерсенна

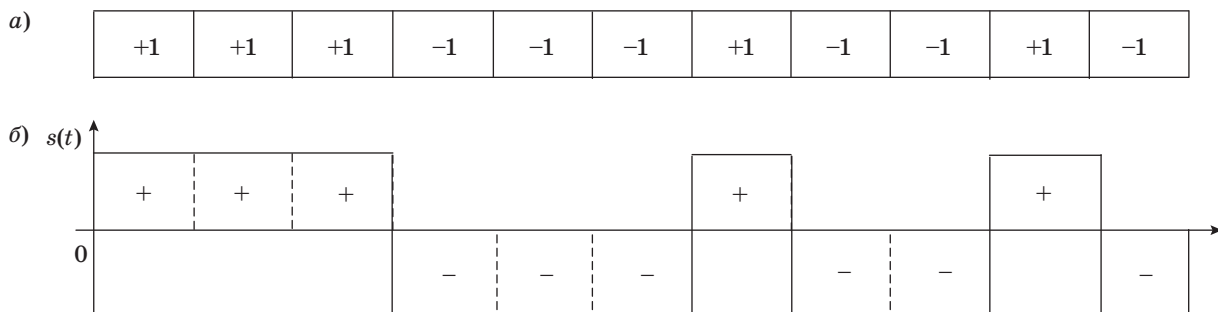
С целью определить характеристики сжатия кодовых последовательностей Баркера и Мерсенна были проведены эксперименты для кодов длины 3, 7 и 11, в которых сравнивались АКФ огибающих (рис. 3, а–в) и оценивалось отношение пика АКФ к максимальному «боковому лепестку» (ОПМБЛ).

Результаты оценки характеристики АКФ для кодовых последовательностей Баркера и Мерсенна (табл. 2) показывают, что оценка ОПМБЛ АКФ для кодовой последовательности Мерсенна при $n = 7$ равна $-18,68$ дБ, а для второго максимального по номеру бокового лепестка $-21,69$ дБ (см. рис. 3, б). Особый интерес представляет результат, приведенный на рис. 3, а, где оценка ОПМБЛ АКФ кода Мерсенна при $n = 3$ превышает аналогичную оценку для кода Баркера на $3,52$ дБ.

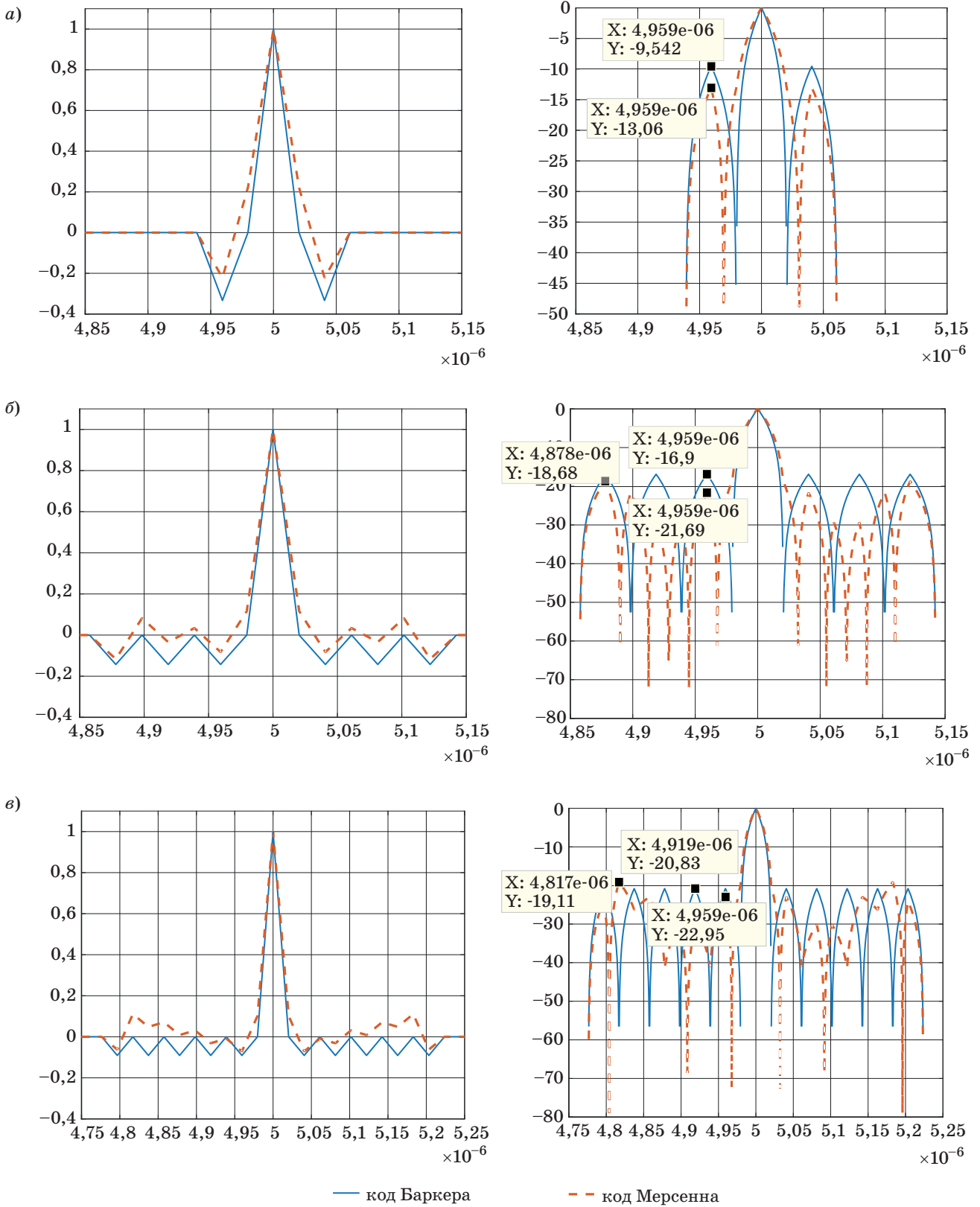
Для кодовой последовательности Мерсенна длины 11 оценка ОПМБЛ АКФ получилась хуже, чем у кода Баркера, на $1,72$ дБ, однако этот максимальный боковой лепесток находится на достаточном удалении от главного лепестка АКФ. Для второго максимального по номеру бокового лепестка, расположенного по соседству с глав-

■ **Таблица 2.** Оценка характеристик АКФ
 ■ **Table 2.** Evaluation the performance of ACF

Длина кода, n	Оценка ОПМБЛ, дБ, для кода	
	Мерсенна	Баркера
3	-13,06	-9,54
7	max	-18,68
	second max	-21,69
11	max	-19,11
	second max	-22,95



■ **Рис. 2.** Код Баркера $n = 11$ (а) и огибающая ФМ-сигнала этим кодом (б)
 ■ **Fig. 2.** Barker code $n = 11$ (а); FM signal envelope with this code (б)



■ **Рис. 3.** АКФ огибающей для кодов Баркера и Мерсенна при $n = 3$ (а); $n = 7$ (б) и $n = 11$ (в): слева — АКФ, нормированная к единице; справа — АКФ в децибелах

■ **Fig. 3.** The envelope of the ACF at $n = 3$ (a); $n = 7$ (б) and $n = 11$ (в) for the Barker code and Mersenne code: on the left — ACF normalized to unity; right — ACF in decibels

ным боковым лепестком, аналогичная оценка превышает уровень боковых лепестков кода Баркера на 2,12 дБ (см. рис. 3, в).

Заключение

Полученные в работе характеристики АКФ для кодовых последовательностей Баркера и Мерсенна длины 3, 7 и 11 позволяют сделать вывод о перспективности использования кодов Мерсенна как альтернативы кодам Баркера.

Нерешенным пока остается вопрос несимметричности элементов кодовой последовательности Мерсенна. Однако, как нам видится, решение возможно с использованием как специального аппарата синтеза сигналов, модулированных ко-

дами Мерсенна, так и новых подходов к сжатию этих сигналов.

В целом результаты моделирования, впервые приведенные в данной работе, имеют теоретическое и практическое значения при исследованиях, связанных с:

— помехоустойчивостью зондирующего сигнала в радиолокационных каналах,

— выбором характеристик сигналов радиолокационных систем в условиях сложной электромагнитной обстановки,

— помехоустойчивостью систем передачи данных.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ при проведении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 2.2200.2017/4.6.

Литература

1. Трухачев А. А. Радиолокационные сигналы и их применения. — М.: Воениздат, 2005. — 320 с.
2. Радиолокационные системы многофункциональных самолетов. Т. 1: РЛС — информационная основа боевых действий многофункциональных самолетов. Системы и алгоритмы первичной обработки радиолокационных сигналов / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2006. — 656 с.
3. Mahafza B. R. Radar Systems Analysis and Design using MATLAB. — Chapman&Hall, 2000. — 532 p.
4. Шепета А. П., Ненашев В. А. Система сжатия ФМ импульса в задачах высокоточного картографирования // Хроники объединенного фонда электронных ресурсов. Наука и образование. 2014. № 10 (65). С. 14. <http://ofernio.ru/portal/newspaper.php> (дата обращения: 09.10.2014).
5. Современная радиолокация. Анализ, расчет и проектирование / под ред. Ю. В. Кобзарева. — М.: Сов. радио, 1969. — 704 с.
6. Сергеев А. М. Обобщенные матрицы Мерсенна и гипотеза Балонина // Автоматика и вычислительная техника. 2014. № 4. С. 35–43.
7. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы Мерсенна и Адамара // Информационно-управляющие системы. 2016. № 1. С. 2–15. doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.2
8. Балонин Ю. Н., Востриков А. А., Сергеев А. М., Егорова И. С. О взаимосвязях квазиортогональных матриц, построенных на известных последовательностях чисел // Тр. СПИИРАН. 2017. № 1 (50). С. 209–223.
9. Сергеев А. М., Блаунштейн Н. Ш. Ортогональные матрицы симметричных структур для задач цифровой обработки изображений // Информационно-управляющие системы. 2017. № 6. С. 2–8. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.2
10. Balonin Yu. N., Sergeev A. M. Two-Circulant Hadamard Matrices, Weighing Matrices, and Ryser's Conjecture // Информационно-управляющие системы. 2018. № 3. С. 2–9. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.2
11. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы локального максимума детерминанта // Информационно-управляющие системы. 2014. № 1. С. 2–15.
12. Св-во гос. рег. прогн. для ЭВМ 2016618938, Российская Федерация. Моделирование алгоритма сжатия ФМ-сигнала при влиянии активной помехи для решения задач помехоустойчивости / Шепета А. П., Каплин А. Ю., Ненашев В. А., Юдин И. А.; правообладатель Санкт-Петербургский гос. аэрокосм. ун-т. — № 2016618938; дата поступл. 14.06.2016; дата регистр. 10.08.2016.
13. Ненашев В. А., Сеницын В. А., Страхов С. А. Исследование влияния промышленных помех на характеристики сжатия фазоманипулированных сигналов в первичных РЛС // Инновационные технологии и технические средства специального назначения: тр. IX общерос. науч.-практ. конф.: в 2 т. Сер. «Библиотека журнала «Военмех. Вестник БГТУ»» / Министерство образования и науки Российской Федерации; Балтийский государственный технический университет «Военмех» им. Д. Ф. Устинова. 2017. С. 351–355.
14. Дудник П. И., Ильчук А. Р., Татарский Б. Г. Многофункциональные радиолокационные системы. — М.: Дрофа, 2007. — 283 с.

UDC 621.391.82

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-9-14

Research and Analysis of Autocorrelation Functions of Code Sequences Formed on the Basis of Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices

Nenashev V. A.^a, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0001-5285-2051, nenashev.va@gmail.com

Sergeev A. M.^a, Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-4788-9869, mbse@mail.ru

Kapranova E. A.^a, Student, katyakaty1998-2010@mail.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Barker codes representing binary sequences (codes) of finite lengths 2, 3, 4, 5, 7, 11 and 13 are widely used in solving the problem of increasing the noise immunity of radar channels. However, the code sequences for $n > 13$ are unknown. Sequences derived from quasi-orthogonal Mersenne matrices also have not been used for these purposes. **Purpose:** Studying the ways to compress a complex modulated signal by Mersenne sequences obtained from the first rows of a monocyclic quasi-orthogonal Mersenne matrix, as an alternative to Barker codes. **Results:** It has been found out that the characteristics of autocorrelation functions for Mersenne codes 3, 7 and 11 exceed those for Barker codes. This is a basis for ensuring greater noise immunity of probing signals in radar channels, as well as for increasing the probability of their correct detection, proving the expediency of their application for amplitude and phase modulation of radio signals. **Practical relevance:** The obtained results allow you to increase the compression characteristics in radar systems when solving the problem of detecting targets under noise and interference. The wide application of Barker codes of length 3, 7 and 11 in digital data transmission systems provides a special interest in similar Mersenne codes when implementing noise-resistant data transmission in radio channels in a complex electromagnetic environment. **Discussion:** An unresolved problem is the non-symmetry of elements in a coding Mersenne sequence. This problem can be solved either by special synthesis of a phase-modulated signal or by finding new approaches to their compression.

Keywords — Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices, Mersenne Matrices, Barker Codes, Mersenne Codes, Compression, Modulated Signals, Radar Channel, Noise Immunity, Autocorrelation Function.

Citation: Nenashev V. A., Sergeev A. M., Kapranova E. A. Research and Analysis of Autocorrelation Functions of Code Sequences Formed on the Basis of Monocyclic Quasi-Orthogonal Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 9–14 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-9-14

References

1. Trukhachev A. A. *Radiolokatsionnye signaly i ih primeneniya* [Radar Signals and their Applications]. Moscow, Voenizdat Publ., 2005. 320 p. (In Russian).
2. *Radiolokatsionnye sistemy mnogofunktsional'nykh samoletov. T. 1: RLS — informatsionnaya osnova boevykh deystviy mnogofunktsional'nykh samoletov. Sistemy i algoritmy pervichnoy obrabotki radiolokatsionnykh signalov* [Radar-Tracking Systems of Multipurpose Planes. Vol. 1. Radar Station — Information basis of Fighting of Multipurpose Planes. Systems and Algorithms of Preprocessing of Radar Signals]. Eds. A. I. Kanashchenkova and V. I. Merkulova. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2006. 656 p. (In Russian).
3. Mahafza B. R. *Radar Systems Analysis and Design using MATLAB*. Chapman and Hall, 2000. 532 p.
4. Shepeta A. P., Nenashev V. A. The System of Compression of FM of an Impulse in Problems of High-Precision Mapping. *Khroniki ob'edinennogo fonda elektronnykh resursov. Nauka i obrazovanie* [Chronicles of the Joint Fund of Electronic Resources. Science and Education], 2014, no. 10 (65), p. 14. Available at: <http://ofernio.ru/portal/newspaper.php> (accessed 9 October 2014) (In Russian).
5. *Sovremennaya radiolokatsiya. Analiz, raschet i proektirovanie* [Modern radar-location. Analysis, Calculation and Design.] Ed. Yu. V. Kobzareva. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1969. 704 p. (In Russian).
6. Sergeev A. M. The Generalized Mersenne's Matrixes and Balonin's Hypothesis. *Avtomatika i vychislitel'naya tekhnika* [Automatic Control and Computer Sciences], 2014, no. 4, pp. 35–43 (In Russian).
7. Balonin N. A., Sergeev M. B. Mersenne and Hadamard Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 1, pp. 2–15 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.2
8. Balonin Yu. N., Vostrikov A. A., Sergeev A. M., Egorova I. S. About Interrelations of the Quasiorthogonal Matrixes Constructed on the Known Sequences of Numbers. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2017, no. 1 (50), pp. 209–223 (In Russian).
9. Sergeev A. M., Blaunstein N. Sh. Orthogonal Matrices with Symmetrical Structures for Image Processing. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 6, pp. 2–8 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.2
10. Balonin Yu. N., Sergeev A. M. Two-Circulant Hadamard Matrices, Weighing Matrices, and Ryser's Conjecture. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 2–9. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.2
11. Balonin N. A., Sergeev M. B. Local Maximum Determinant Matrices. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 1, pp. 2–15 (In Russian).
12. Shepeta A. P., et al. *Modelirovanie algoritma szhatiya FM-signala pri vliyaniy aktivnoy pomekhi dlya resheniya zadach pomekhoustojchivosti* [Modeling of the Compression Algorithm of the FM Signal under the Influence of an Active Interference for Solving the Problem of Noise-Immunity]. Certificate of state registration no. 2016618938, 2016.
13. Nenashev V. A., Sinitsyn V. A., Strakhov S. A. Research of Influence of Industrial Radio Noises on Characteristics Compression of Phase-Shifted Signals in Primary Radar Stations. *Trudy IX obscherossijskoj nauchno-tehnicheskoy konferentsii "Innovatsionnye tekhnologii i tekhnicheskije sredstva spetsial'nogo naznacheniya"* [Proc. of the IX all-Russian Scientific and Practical Conf. "Innovative Technologies and Technical Means of a Special Purpose"], 2017, pp. 351–355 (In Russian).
14. Dudnik P. I., Ilchuk A. R., Tatarsky B. G. *Mnogofunktsional'nye radiolokatsionnye sistemy* [Multipurpose Radar-Tracking Systems]. Moscow, Drofa Publ., 2007. 283 p. (In Russian).

APPLICATION OF DIFFERENTIAL MODE FOR AUV LOCATION

L. A. Martynova^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, martynowa999@bk.ru

G. G. Bezruk^a, PhD, Tech., geoint99@mail.ru

A. A. Mysliviy^a, PhD, Tech., aam-07@mail.ru

^aPrincipal Research and Development Test Centre of Robotic Technology Ministry of Defence of the Russian Federation (PRDCR), 5, Seryogin St., 125167, Moscow, Russian Federation

^bConcern CSRI Elektropribor, JSC State Research Center of Russia, 30, Malaya Posadskaya St., 197046, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Signals from satellite radio navigation systems cannot penetrate seawater. Therefore, autonomous underwater vehicles are located with the use of one or more support objects. Because of the layered nature of a marine environment, a sound beam goes not in a straight line as radio signals do, but along an arcuate trajectory. Therefore, the correction of the vehicle location by the differential method has a large error. **Purpose:** Assessing the requirements and conditions necessary for using the differential mode of correcting a vehicle location. **Results:** We have simulated the propagation of sound beams in a vertical plane according to Snell's law, under the condition that sound beam propagation follows the Rice distribution. We have determined the distance covered by a sound beam, evaluated its dependence on the emission direction, specified the procedure of locating a vehicle with the use of the differential mode for correcting the location, and formulated the conditions for using the differential method which are determined by the sound emission direction, by the sound speed profile and by the mutual position of the emitting buoys, the correcting base station and the underwater vehicle. **Practical relevance:** The obtained results can be used for locating vehicles in areas where you cannot use the traditional methods of precise location.

Keywords — Autonomous Underwater Vehicle, Route Trajectory, Current, Efficiency Evaluation.

Citation: Martynova L. A., Bezruk G. G., Mysliviy A. A. Application of Differential Mode for AUV Location. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 15–23. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-15-23

Introduction

Increasing the accuracy of locating autonomous underwater vehicles (AUV), especially in the case of using them in groups, for example, when conducting seismic survey or searching for anthropogenic objects [1–10], is of paramount importance. By now, a large number of methods for positioning an underwater object have been developed [11–16], including AUV positioning, a comprehensive review of which is given in [17]. To locate an AUV under water, range-measurement hydroacoustic navigation systems [18] or systems with a single mobile beacon [19] are used. Some recent attempts have been made to conduct underwater positioning in accordance with the principles of satellite radio navigation systems [20–22].

At the same time, the peculiarity of locating an AUV in a group is that:

- the location should be conducted aboard the AUV;
- there can be no emitting devices or hydroacoustic modems aboard the AUV;
- there can be no inertial navigation system or auxiliary equipment like lags or echosounders aboard the AUV due to the limitations on weight-size parameters and power consumption.

A way to increase the accuracy of locating an object in satellite radio navigation is the use of differ-

ential corrections to pseudoranges or pseudospeeds of radio signal propagation [23]. The transfer of the differential method of object location correction into a marine environment requires taking into account the laws of sound signal propagation in water and the dependence of the propagation on the mutual position of the AUV and reference objects (other underwater or surface vessels with known coordinates, bottom beacons, surface buoys, escort vessels, etc.), as well as the dependencies on the state and parameters of the marine environment determined by the location, weather conditions, time of year and time of day.

Marine environment has the following features:

- significant attenuation of sound in water;
- sound propagation along multiple directions;
- refraction of beams causing a curvature of the trajectory along which a sound beam propagates;
- layered nature of the medium and the dependence of the sound speed on depth.

The above-mentioned studies on navigational location of AUV do not discuss the ways to apply the differential method to correcting underwater object location.

Differential Mode Description

The idea of the differential mode of correcting an object location is based on developing corrections

to pseudoranges from the source of a hydroacoustic signal to its consumer. As signal sources, we will consider transmitter buoys (further referenced to as buoys). The consumer is an AUV. The prefix “pseudo-” is added because the time scales of the radiation source and the AUV are not synchronized with one another and hence the measured range value differs from the actual one. To maintain the differential mode of pseudorange correction, in a specified seabed area a base station (BS) is established in advance, whose coordinates are being determined over a long period of time by means of precise measurement of its position [24].

We will assume that the buoys on the sea surface are located using the signals of satellite radio navigation systems. The same signals are used to synchronize the time scales of the buoys with high accuracy.

The formation of differential corrections of the BS with their transfer to consumers, including AUV, goes as follows. The buoys periodically emit signals into the seawater. The period of the signals is maintained with high accuracy. The frequency of the signals is known to the BS and the AUV. Aboard the AUV, using the signal received from the buoy, the signal arrival delay is determined, counting from the moment of its emission. According to the delay, distance to the buoy is calculated. In this manner, distances to at least four buoys are found. The distances to the buoys determine the AUV position by the difference-ranging method. This method is used because of the mismatch between the time scales of the buoys and the AUV: the beginning of the AUV time scale does not coincide with the beginnings of the time scales of the buoys mutually coordinated by the signals of satellite radio navigation systems.

With this measurement, the evaluation of the pseudoranges between the AUV and the buoys has a certain error similar to the errors in satellite radio navigation systems caused by the features of both signal propagation environment and signal delay measurement hardware. AUV onboard delay calculation is so sophisticated because marine environment is very different from aerial: the signals of satellite radio navigation systems propagate in space rectilinearly and almost without distortion, while acoustic signals propagating through water are influenced by a host of unfavorable factors. The world ocean is an inhomogeneous medium; there are warm and cold currents, whirlpools, areas with different concentrations of dissolved salts, etc. Acoustic signals propagating with a low speed relative to radio signals will physically move, shift in phase, be reflected and distorted while passing through the inhomogeneities of a marine environment. Partially, their influence can be compensated by choosing appropriate mathematical processing methods, as all the above-mentioned factors are

constant [25, 26]. However, not everything can be compensated only mathematically; there are errors in the measurements as such, which also contribute to the error of pseudorange calculation.

The base station, similarly to AUV, also estimates the distance to the buoys by the delays of the received signals. Simultaneously, the BS evaluates the calculated distance to the buoy, knowing its exact and constant location and the position of the buoy at the signal emission moment. It is assumed that the emitted signal contains the coordinates of the buoy and the emission time. The BS compares the obtained distance values with the calculated ones; on the base of this comparison it produces a correction, and emits it into the water for the consumers, including the AUV. Receiving these corrections and adding them up, the AUV updates its estimation of the distance to the buoy. The updated distances to four buoys are then used in the difference-ranging method.

Mathematically, it can be described as follows. Let it be given that:

x_{BS}, y_{BS}, z_{BS} are BS coordinates known with the required accuracy;

x_i, y_i, z_i are the coordinates of the i^{th} buoy with a high accuracy; $i = 1, \dots, M$, where M is the number of the buoys, $M = 4$.

At some instant of time t , all the M buoys emit sonar signals carrying the information about the time t and each i^{th} buoy coordinates x_i, y_i, z_i .

Let the time in which a signal from the i^{th} buoy reaches the BS be $\tau_{BS i}$ and the time in which it reaches the AUV be $\tau_{AUV i}$.

Then the actual distance between the i^{th} buoy and the BS is defined by the following expression:

$$R_{BS i} = \tau_{BS i} C,$$

where C is the speed of sound in water in this particular area.

From the i^{th} buoy coordinates x_i, y_i, z_i and the base station coordinates x_{BS}, y_{BS}, z_{BS} precisely known at the base station, the distance between the buoy and the base station is calculated:

$$R_{calc_{BS}i} = \sqrt{(x_i - x_{BS})^2 + (y_i - y_{BS})^2 + (z_i - z_{BS})^2}.$$

It determines the differential correction to the distance to each i^{th} buoy as the difference between the actual and calculated values:

$$\Delta R_i = R_{act_{BS}i} - R_{calc_{BS}i}.$$

The distance from the i^{th} buoy to the AUV is defined by the following expression:

$$R_{AUV i} = \tau_{AUV i} C.$$

Using the correction ΔR_i produced at the BS and transferred to the AUV, the distance between the buoy and the AUV is calculated:

$$R_{\text{calc}_{\text{AUV}i}} = R_{\text{act}_{\text{AUV}i}} - \Delta R_i.$$

Having these values for the distances from the AUV to four or more buoys, the AUV locates itself by the difference-ranging method through solving a system of equations

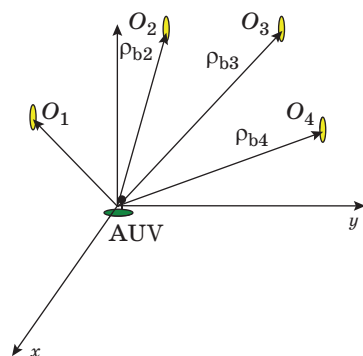
$$\begin{cases} \sqrt{(x_2 - x)^2 + (y_2 - y)^2 + (z_2 - z)^2} - \\ - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = \Delta r_{21} \\ \sqrt{(x_3 - x)^2 + (y_3 - y)^2 + (z_3 - z)^2} - \\ - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = \Delta r_{31} \\ \sqrt{(x_4 - x)^2 + (y_4 - y)^2 + (z_4 - z)^2} - \\ - \sqrt{(x_1 - x)^2 + (y_1 - y)^2 + (z_1 - z)^2} = \Delta r_{41} \end{cases},$$

where Δr_{i1} is the difference between the distances from a couple of reference points $\{O_i, O_1\}$ to the point in question; x, y, z are the AUV position point coordinates; x_i, y_i, z_i are the coordinates of the i^{th} buoy; $i = 1, \dots, 4$.

Fig 1 explains the difference-ranging method; the symbol ρ_{bi} designates the distance from the buoy reference points to the AUV position point.

The calculation of ΔR_i corrections and their transfer to the consumers occur with a certain constant periodicity, which is why this is called a differential mode of pseudorange correction. The differential mode is successfully used in satellite navigation, improving object location accuracy.

Applying the differential mode in a marine environment requires that we consider how the marine environment affects the propagation of sound and the determination of distances between objects.



■ Fig. 1. Diagram explaining the difference-ranging method

Let us assume that:

- the beam propagation follows the Rice distribution [27] with the dominance of one beam;
- a BS knows the sound speed profile (SSP) which is periodically measured with a pulsed SSP meter [28];
- the AUV also knows the SSP which can either coincide with the BS SSP or differ from it;
- signals formed by a buoy correlate with one another.

Estimating the Influence of Seawater Stratification on the Sound Beam Trajectory

The curvature of a sound beam propagation trajectory caused by seawater stratification is schematically shown in Fig. 2.

The distance to which a beam deviates from the vertical because it was emitted at an angle to the horizontal is determined by the expression [29]

$$\Delta R_j = \rho_j (\sin \alpha_j - \sin \alpha_{j-1}), \quad (1)$$

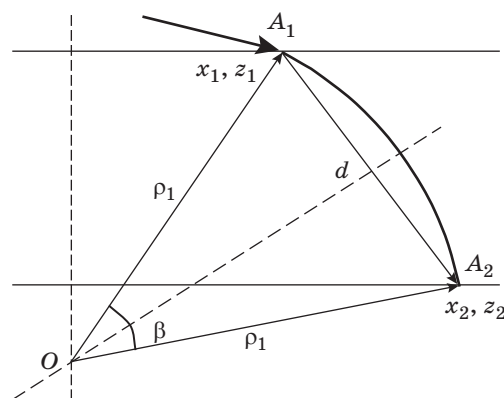
where j is a layer number $j = 1, \dots, n$; n is the number of the layers; ρ_j is the radius of the circle whose arc is the beam trajectory in the j^{th} layer; α_j is the angle of the beam entry into the j^{th} layer; α_{j-1} is the angle of the beam entry into the $(j-1)^{\text{th}}$ layer; when $j = 1$ the direction of the signal emitted by the buoy is α_{j-1} .

The radius of the circle is determined by the expression

$$\rho_j = \frac{1}{a \cos \alpha_j},$$

a is a relative gradient:

$$a = \frac{G_C}{c_0},$$



■ Fig. 2. Schematic representation of beam curvature

where G_C is a gradient of the speed of sound in water determined by the expression

$$G_C = \frac{c_{j+1} - c_j}{z_{j+1} - z_j}.$$

Let us assume that $G_C = \text{const}$. Then the full horizontal distance of the beam deviation from the vertical will be determined by the following expression:

$$R_f = \sum_{j=1}^n \Delta R_j. \quad (2)$$

From triangle ΔOO_1O_2 we can express the distances between the point of the beam entry into the j^{th} layer and the point where the beam leaves the j^{th} layer:

$$d_j = \sqrt{(x_{j+1} - x_i)^2 + (z_{j+1} - z_i)^2}. \quad (3)$$

Besides, from triangle ΔOO_1O_2 we can derive an expression for finding the angle β_j at a vertex as a half-angle between the directions to the point of the beam entry into the j^{th} layer and the point where the beam leaves it (see Fig. 2). This expression looks like

$$\frac{d_j}{2} = \rho_j \sin \frac{\beta_j}{2},$$

from which it follows that

$$\beta_j = 2 \arcsin \left(\frac{d_j}{2\rho_j} \right). \quad (4)$$

Then, knowing the vertex angle β_j and radius ρ , we can determine the length of the arc l , along which the beam propagated:

$$l_j = \beta_j \rho_j. \quad (5)$$

The angle β_j is expressed in radians.

The above expressions (1)–(5) allow us to estimate the distance covered by the beam in the j^{th} layer.

Then, depending on the AUV immersion depth, the beam path trajectory length is estimated as a sum of the beam trajectories through the layers:

$$L = \sum_{j=1}^n l_j.$$

If the AUV does not know the speed of sound, the following averaging formulas can be used:

— weighted average speed of sound

$$C_w = \frac{\sum_{j=1}^n (c_j - c_{j-1})(z_j - z_{j-1})}{2(z_{\text{AUV}} - z_i)},$$

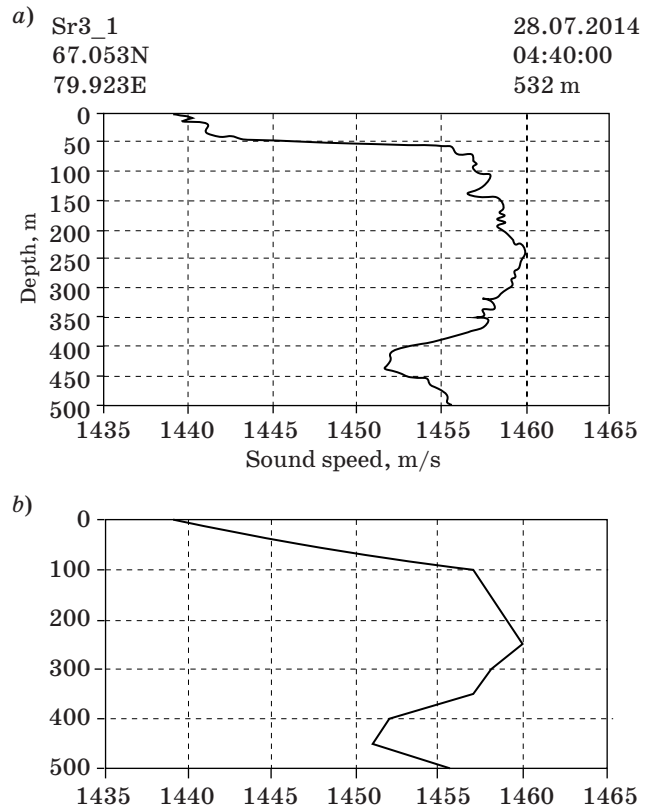
where z_i is the i^{th} buoy antenna immersion depth; in the problem under discussion $z_i = 0$;

— harmonic mean of the speed of sound

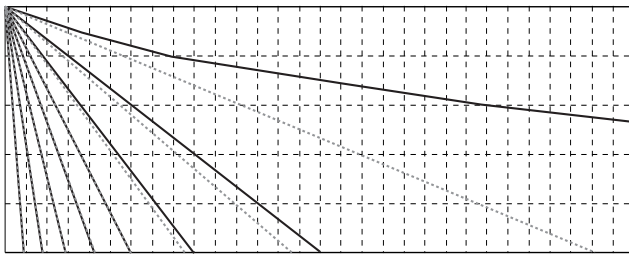
$$C_h = \frac{(z_{\text{AUV}} - z_i)}{2 \sum_{j=1}^n \frac{(c_j - c_{j-1})}{(z_j - z_{j-1})}}.$$

To estimate the change in the calculated range when the curvilinear trajectory of the sound propagation is taken into account, we estimated the deviations of an arcuate beam trajectory from the rectilinear path connecting these points. As initial data, a real SSP was considered (Fig. 3, *a* and *b*). In the calculations, the width (thickness) of a step layer was equal to 50 m. The size of the chosen sampling interval was determined by the data error [30]. The beam pattern representation is shown in Fig. 4.

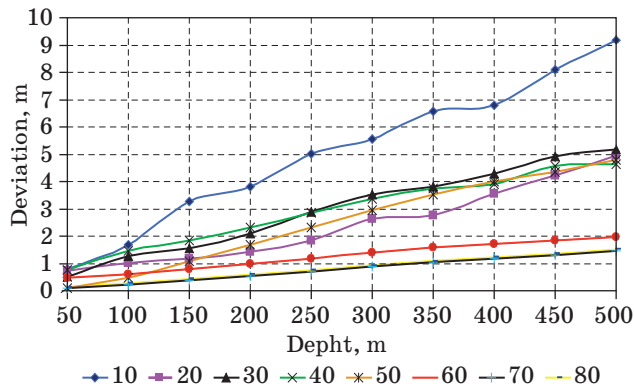
The results of the calculations (Fig. 5) showed that the deviation of an arcuate trajectory from the rectilinear one is about 9 m. This value was obtained for near-surface emission of an acoustic beam at an angle of 10° to the horizontal. When the emission direction changed to 80° , the deviation decreased from 9 down to 1.5 m.



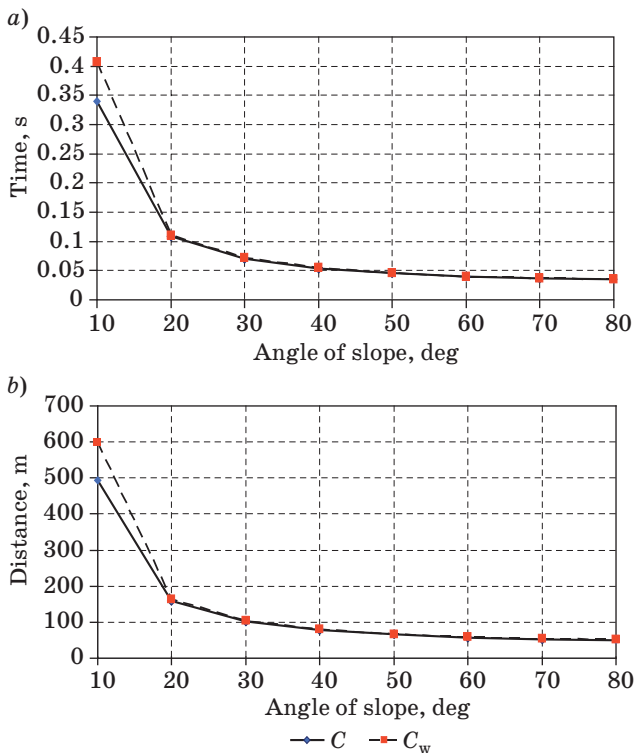
■ Fig. 3. The sound speed profile for the Kara Sea: *a* — data of the source [30]; *b* — digital representation for use in modeling



■ Fig. 4. Beam pattern representation



■ Fig. 5. Deviation of an arcuate beam propagation trajectory from the straight line connecting the points of the buoy position on the sea surface and the position of the receiver (AUV)



■ Fig. 6. An estimate of signal travel time (a) and covered distance (b) along the beam, at a known sound speed C (dashed line) and a weighted average C_w (solid line)

Besides, we estimated the duration of the beam travel and the distance it covers for the case when the speed of sound is considered weighted average (Fig. 6, a and b).

The obtained results allow us to state that when the emission angle relative to the water surface is 20° or more, we can use the weighted average value of the sound speed, rather than counting it literally by layers, because the results for the time and distance at $\alpha \geq 20^\circ$ nearly coincide.

Determining a Distance Covered by a Beam Along an Arcuate Trajectory by Layers

As discussed above, a beam propagation trajectory can be sophisticated. Therefore, when you calculate the length covered by a beam using the measured delay between the emission of a signal and its reception in a certain point, you have to take into account the complex curvilinearity of its trajectory. To use the formulas (1)–(5), you need to know the direction in which the buoy emits the beam, i. e. the beam angle α in the top layer. Since the trajectory is curvilinear, the emission direction is not obvious, requiring a special approach to its determination.

Mathematically, the problem of determining the emission direction α can be formulated as follows:

Let the beam arrive to an AUV point whose coordinates are unknown and need to be found. We know the time necessary for the signal to cover the curvilinear trajectory, and we know the SSP.

We need to find the coordinates of the AUV point to which the beam arrives.

This means we need to find a triplet of coordinates which would meet the following criterion:

$$(x_{AUV}, y_{AUV}, z_{AUV}) = \left\{ \begin{aligned} & \left\{ (x, y, z) \in K : \Delta T[(1); (2)] = \right. \\ & \left. = \sum_{j=1}^n \Delta t_j \right\} \end{aligned} \right\},$$

where K is the set of all points of possible AUV position in the given area, and $\Delta T[(1); (2)]$ is the time of sound travel between points 1 and 2.

In order to determine the emission direction, let us consider two cases. In the first case, the AUV has the information about its immersion depth; in the second case, it has not.

1. *The AUV has the information about its immersion depth.*

Let us assume that the AUV measures the depth by a special pressure gauge. Aboard the AUV, the delay is determined between the moments of emission and reception of the sound. To determine the

AUV position, you need, for various values of α , to go through all the variants for the time of signal travel through the layers and to calculate the total signal travel time. The value closest to the measured time will be the problem solution. It will allow you to uniquely determine the emission direction for the signal accepted by the AUV.

Mathematically, this approach is called a net method: we build a net and find a solution in its knots. A net is characterized by its cell size.

The result of modeling the beam travel time for different emission directions from 10 to 80° is shown in Fig. 7.

Knowing the depth of the AUV position and the duration of the sound signal travel from a buoy to the AUV, we estimate the distance and, according to the chart (see Fig. 7), find the beam angle at the moment of its emission.

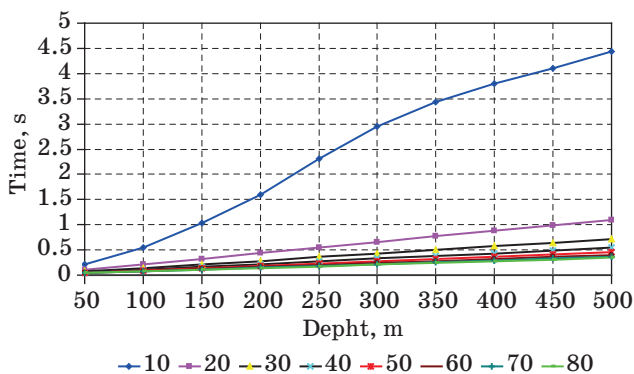
For example, the time of signal travel along the arc from the surface to the depth of 270 m is 0.5 s. For this conditions, the following variants are possible:

- the emitted signal inclination angle is 10°, and the depth of the AUV is $H = 105$ m;
- the emitted signal inclination angle is 20°, and the depth of the AUV is $H = 270$ m.

Out of these two variants, the more suitable one is the second ($\alpha = 20^\circ$), because the actual depth coincides with the calculated one. This variant is chosen as a solution. To find the AUV coordinates, the coordinates of the signal reception point are used.

However, as shown above, at emission angles bigger than 20° we can use weighted average value of the sound speed. In this case, we estimate the distance covered by the beam immediately by the delay. Knowing the depth H (cathetus) and inclined range of the beam travel L (hypotenuse), we can find the emission direction angle

$$\alpha = \arccos\left(\frac{H}{L}\right).$$



■ Fig. 7. Calculated time of signal travel along the arc for different emission angles

2. The AUV has no information about its immersion depth.

In this case, we need to simultaneously use two measurements from two buoys, because one measurement can only provide a multivalued solution.

If the depth is unknown, we will take into account the fact that everything happens in one vertical plane: the two buoys and the AUV are three points through which one and only one plane passes. Since the buoys emit sound in all directions, and the arc length does not depend on the direction in the horizontal plane, depending only on the inclination angle in the vertical plane, the solution will be the intersection point of two arcs whose length depends on the inclination angle and the AUV depth.

In the same way as described above, the emission direction is determined for the signal from the first buoy. For the buoy signal arrival delay measured aboard the AUV, several variants come out which differ from each other in the signal arrival depths and emission directions. These variants form a set of solutions for the first buoy.

After that, the same procedure is applied to the delay of the second buoy signal. The solution variants form a set of solutions for the second buoy.

Out of the two solution sets related to the first and second buoys, an element is found which is an intersection of the two. This element is the solution. It is uniquely associated with the emission direction of the first and second buoys and the AUV position coordinates which correspond to the arrival point of the signal from the first and second buoys.

Similarly to the known depth variant, we get expressions to determine the inclination angles α_1 and α_2 :

$$\alpha_1 = \arccos\left(\frac{H_1}{L_1}\right);$$

$$\alpha_2 = \arccos\left(\frac{H_2}{L_2}\right),$$

$$H_1 = H_2.$$

The given expressions can be used for inclination angles α_1 and α_2 bigger than 20°.

Finding AUV Coordinates with the Difference-Ranging Method

The arcuate curvilinear trajectory of the beam travel from two spatially separated buoys gets into a certain point at a certain depth where the AUV is positioned which has received a sound signal from both the buoys. In the same way as if they were rectilinear inclined trajectories, after determining

the point to which the beams from both the buoys come, inclined straight line segments are calculated. The set of possible solutions for two buoys form a hyperbola. By the intersection of three hyperbolas formed by four buoys using the difference-ranging method, the AUV determines its coordinates.

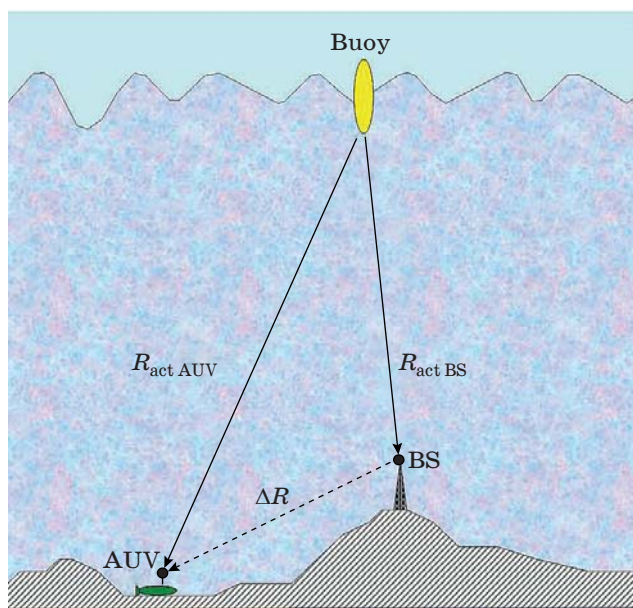
Differential Method Description

The mutual position of the AUV, BS and one of the four buoys in the marine environment is shown in Fig. 8. The AUV location is adjusted using the differential mode as follows.

A buoy emits a navigational hydroacoustic signal into the seawater. The BS receives it. Knowing its precise location, SSP and the precise location of the buoy, the BS estimates the signal travel time: calculated T_{calc} and actual T_{act} . The calculated time is determined taking into account the refraction which depends on the current SSP in this area according to Snell's law, so that the beam comes to the BS point. For that, all possible positions of the beam arrival to the BS area are considered and the best one is chosen for various emission directions α by the criterion how close the beam arrival point is to the BS location. Finally, the actual beam travel time from the buoy to the BS is found, and the distance $R_{\text{act BS}}$ is determined which differs from the calculated distance $R_{\text{calc BS}}$ by ΔR :

$$R_{\text{act BS}} = R_{\text{calc BS}} + \Delta R.$$

On this basis, the correction ΔR is determined on the BS as the difference between the calculated



■ Fig. 8. General scheme of differential mode

beam travel distance $R_{\text{calc BS}}$ and the actual distance $R_{\text{act BS}}$ which is precisely known at the BS:

$$\Delta R = R_{\text{act BS}} - R_{\text{calc BS}}.$$

When estimating the rectilinear range of the beam travel between the emission point and the BS position, you can use not only the average value of the sound speed according to the SSP, but also any other value, provided that this value is used by the AUV. This should be agreed upon in advance when you perform a differential correction of the AUV location. Besides, it is desirable that the processing principles of the navigation receivers at the BS and the AUV are similar; ideally, the receivers should be identical. The signal travel correction ΔR calculated at the BS is then emitted from the buoy to the consumers in the marine environment, including the AUV. Such corrections are emitted to the signals of all the four buoys.

The autonomous underwater vehicle near the BS measures the delays of the signals from the four buoys. The obtained delays are converted into the ranges to the buoys as discussed above. Based on these ranges, the beam trajectory projections are determined. An obtained range is a sum of the calculated range and the correction:

$$R_{\text{act AUV}} = R_{\text{calc AUV}} + \Delta R.$$

Simultaneously with the measurement of the actual range, the AUV receives from the BS the information about the pseudorange corrections ΔR for each of the four buoys, and then specifies the pseudoranges to the buoys:

$$R_{\text{calc AUV}} = R_{\text{act AUV}} - \Delta R,$$

using them for locating itself by the difference-ranging method.

Conclusion

The work is aimed at finding the ways of using the differential method to locate an AUV in a marine environment. Our research was focused on the parameters which considerably affect the usage of difference-ranging method for AUV location: sound emission direction, vertical distribution of the sound speed, sound travel trajectory, and the distance covered by a sound beam. The paper discusses an approach to applying the differential method of correcting an AUV location in a marine environment. The obtained results can be used for a more precise location of AUV or other underwater objects.

The research was supported by RFBR grant 17-07-00125.

Reference

- Gizitdinova M. R., Kuz'mitski M. A. Mobile Underwater Robots in Modern Oceanography and Hydrophysics. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2010, vol. 3, no. 1 (7), pp. 4–13 (In Russian).
- Bozhenov Yu. A. Using Autonomous Underwater Vehicles for Research in Arctic and Antarctic. *Fundamental'naya i prikladnaya gidrofizika* [Fundamental and Applied Hydrophysics], 2011, vol. 4, no. 1, pp. 4–68 (In Russian).
- Ilarionov G. Yu., Sidenko K. S., Bocharov L. Yu. *Ugroza iz glubiny: XXI vek* [Threat from the Depth: 21st Century]. Khabarovsk, Khabarovskaya kraevaya tipografiya Publ., 2011. 304 p. (In Russian).
- Bezruk G. G., Martynova L. A., Saenko I. B. Dynamic Method of Searching Anthropogenic Objects in the Seabed with use of Autonomous Underwater Vehicles. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2018, no. 4, pp. 203–226 (In Russian). doi:10.15622/sp.58.9
- Martynova L. A., Karsaev O. V. A Method of Coordinating the Behavior of Autonomous Underwater Vehicles Group on a Multi-Agent Basis in the Conduct of the Seismic Survey. *Izvestiia YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2018, no. 1(195), pp. 52–67 (In Russian).
- Martynova L. A., Grinenkov A. V., Pronin A. O., Kulikovskikh J. V. Research of the Functioning of a Multi-Agent Control System for an Autonomous Underwater Vehicle using Simulation. *Naukoemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli* [High Technologies in Earth Space Research], 2017, vol. 9, no. 5, pp. 52–65 (In Russian).
- Martynova L. A. Concerted Action of a Radiator and Autonomous Uninhabited Submersibles for Effective Seismic Exploration. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 83–92 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.83
- Martynova L. A. Differential Method of Positioning a Standalone Unmanned Submersible in Seismic Exploration. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 4, pp. 77–85 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.77
- Martynova L. A. Underwater Observation under Intellectual Interference. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 1, pp. 31–41 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2018.1.31
- Martynova L. A., Konyukhov G. V., Pashkevich I. V., Rukhlov N. N. Peculiarities of Group Control of AUV in Seismic Exploration. *Izvestiia YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2017, no. 9(194), pp. 53–63 (In Russian).
- Kebkal K. G., Kebkal V. K., Kebkal A. G., Petrocchia R. Experimental Estimation of Delivery Success of Navigation Data Packages Transmitted via Digital Hydroacoustic Communication Channel. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2016, no. 2 (93), pp. 107–122 (In Russian). doi:10.17285/0869-7035.2016.24.2107-122
- Kebkal K. G., Banasch R. Sweb-Spread Carrier for Underwater Communication over Acoustic Channels with Strong Multipath Propagation. *Journal of the Acoustical Society of America*, 2002, vol. 12(5), pp. 2043–2052.
- Kebkal K. G., Kebkal V. K., Kebkal A. G. Digital Hydroacoustic Networks for Communication in Conditions of Long Delays and Breaks the Connection: an Experimental Research. *Podvodnye issledovaniia i robototekhnika* [Underwater Research and Robotics], 2001, no. 2(20), pp. 12–19 (In Russian).
- Dubrovina F. S., Scherbatyuk A. F. Study of the Algorithms for the Single Beacon Mobile Navigation of Unmanned Underwater Vehicles: Results of Simulation and Sea Trials. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2015, no. 4 (91), pp. 160–172 (In Russian). doi:10.17285/0869-7035.2015.23.4.160-172
- Kebkal K. G., Kebkal A. G., Kebkal O. G. Synchronization Tools of Acoustic Communication Devices in Control of Underwater Sensors, Distributed Antennas, and Autonomous Underwater Vehicles. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2014, no. 2, pp. 70–85 (In Russian).
- Kebkal K. G., Kebkal O. G., Glushko E., Kebkal V. K., Sebastião L., Pascoal A., Gomes J., Ribeiro J., Silva H., Ribeiro M., Indivery G. Underwater Acoustic Modems with Integrated Atomic Clocks for One-Way Travel-Time Underwater Vehicle Positioning. *UACE2017 4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition*, At Skiathos, Greece, 2017, pp. 315–323.
- Kebkal K. G., Mashoshin A. I. Hydro-Acoustic Methods of Positioning Autonomous Unmanned Underwater Vehicles. *Giroskopiya i navigatsiya* [Gyroscopy and Navigation], 2016, vol. 24, no. 3 (94), pp. 115–130 (In Russian).
- Scherbatyuk A. Ph., Dubrovina F. S., Rodionov A. Yu., Unru P. P. Group Navigation and Control for Marine Autonomous Robotic Complex Based on Hydroacoustic Communication. *Proc. of the IROS 2016 IEEE/RSJ Conf.*, October 9–14, 2016, Daejeon, Korea, 2016. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/Group-navigation-and-control-for-marine-autonomous-Scherbatyuk-Dubrovina/4853b452a93a52c8288823a83b583d1ee18eeaeaf> (accessed 5 March 2018).
- Scherbatyuk A. Ph., Dubrovina F. S. About Accuracy Estimation of AUV Single-Beacon Mobile Navigation using ASV, Equipped with DGPS. *Proc. of the OCEANS 2016 MTS/IEEE Conf.*, Shanghai, China, 2016. Available at: <https://www.semanticscholar.org/paper/About-accuracy-estimation-of-AUV-single-beacon-ASV%2C-Dubrovina-Scherbatyuk/41763212d8011a4d06f6014b63a6d4ee8fb84373> (accessed 5 March 2018).

20. *Podvodnyi GPS s nulia za god* [Underwater GPS from Scratch for the Year]. Available at: <https://geektimes.ru/post/284902/> (accessed 5 March 2018).
21. *Podvodnyi GPS: prodolzhenie*. Available at: <https://geektimes.ru/post/289159/> (accessed 5 March 2018).
22. *POSYDON – proekt podvodnoi navigatsionnoi sistemy, kotoraiia pozvolit opredeliat' mestopolozhenie v glubinakh morei i okeanov* [POSYDON is a Project of an Underwater Navigation System that will allow to Determine the Location in the Depths of the Seas and Oceans]. Available at: <https://dailytechinfo.org/news/8169-posydon-proekt-podvodnoy-navigatsionnoy-sistemy-kotoraya-pozvolit-opredeliat-mestopolozhenie-v-glubinah-morey-i-okeanov.html> (accessed 5 March 2018).
23. *Iatsenkov B. B. Osnovy sputnikovoi navigatsii* [Fundamentals of Satellite Navigation]. Moscow, Katalog Publ., 2002. 106 p. (In Russian).
24. *Buia M., Flores P. E., Hill D., Palmer E., Ross R., Walker R., Houbiers M., Thompson M., Laura S., Menlikli C., Moldoveanu N., Snyder E.* Shooting Seismic Surveys in Circles. Available at: https://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors08/aut08/shooting_seismic_surveys_in_circles.pdf (accessed 5 March 2018).
25. *Raskita M. A.* Sound Velocity Profiles Reconstruction Error Estimate at Water Masses Remote Ecological Monitoring. *Izvestiia YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2009, no. 6(95), pp. 91–95 (In Russian).
26. *Gurbatov S. N., Kurin V. V., Kustov L. M., Pronchato-Rubtsov N. V.* Physical Modeling of Nonlinear Sound Wave Propagation in Oceanic Waveguides of Variable Depth. *Acoustical Physics*, 2005, vol. 51, no. 2, pp. 152–159.
27. *Karabanov I. V., Burdinskiy I. N., Mironov A. S., Linnik M. A.* Model of Spread Spectrum Phase-Shift Keyed Signal Propagation in Underwater Acoustic Channel. *Izvestiia YUFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2013, no. 3 (140), pp. 102–112 (In Russian).
28. *Kolomiets S. M.* The Determination of the Vertical Profile of the Speed of Sound in the Ocean with using the Doppler Locator. *Issledovaniia v oblasti estvennykh nauk* [Researches in Science], 2014, no. 9, pp. 16–25. Available at: <http://science.snauka.ru/en/2014/09/8305> (accessed 5 March 2018) (In Russian).
29. *Zaraiskii V. A., Tiurin A. M.* *Teoriia hydrolokacii* [Theory of Sonar]. Leningrad, Voenno-morskaya akademiya Publ., 1975. 604 p. (In Russian).
30. *Balakin R. A., Golavskii V. E., Timets V. M.* Applied Research of Hydroacoustic Fields in the Arctic Seas. *Trudy Gosudarstvennogo okeanograficheskogo instituta im. N. N. Zubova* [Proc. of N. N. Zubov State Oceanographic Institute], 2016, no. 217, pp. 312–322 (In Russian).

УДК 519.87

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-15-23

Исследование возможности применения дифференциального режима уточнения местоположения АНПА под водой

Мартынова Л. А.^{а, б}, доктор техн. наук, старший научный сотрудник, martynowa999@bk.ru

Безрук Г. Г.^а, канд. техн. наук, geoint99@mail.ru

Мысливый А. А.^а, канд. техн. наук, aam-07@mail.ru

^аГлавный научно-исследовательский испытательный центр робототехники Министерства обороны Российской Федерации, Серегина ул., 5, Москва, 125167, РФ

^бАО «Концерн «ЦНИИ «Электрон»», Малая Посадская ул., 30, Санкт-Петербург, 197046, РФ

Постановка проблемы: ввиду отсутствия под водой сигналов спутниковых радионавигационных систем позиционирование автономных необитаемых подводных аппаратов происходит с использованием одного или нескольких опорных объектов. Слоистость морской среды является причиной распространения звукового луча не по прямой, как у радиосигналов, а по дугообразной траектории, из-за чего корректировка местоположения аппарата дифференциальным методом происходит с большой погрешностью. **Цель:** оценка требований и условий, необходимых для использования дифференциального режима уточнения местоположения аппарата. **Результаты:** проведено моделирование распространения звуковых лучей в вертикальной плоскости согласно закону Снеллиуса при условии подчинения распространения звуковых лучей распределению Райса, определен пройденный звуковым лучом путь, оценена его зависимость от направления излучения звукового сигнала, а также определен порядок оценки местоположения аппарата с использованием дифференциального режима уточнения его местоположения. Установлены условия использования дифференциального метода корректировки местоположения аппарата, определяемые направлением излучения; профилем распределения скорости звука; взаимным положением излучающих буев, корректирующей базовой станции и подводного аппарата. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы для уточнения местоположения аппарата в районах с отсутствием возможности применять традиционные методы точного позиционирования аппарата.

Ключевые слова — автономный необитаемый подводный аппарат, маршрутная траектория, течение, оценка эффективности.

Цитирование: Martynova L. A., Bezruk G. G., Myslivyi A. A. Application of Differential Mode for AUV Location // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 15–23. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-15-23

Citation: Martynova L. A., Bezruk G. G., Myslivyi A. A. Application of Differential Mode for AUV Location. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 15–23. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-15-23

ПРОЕКТИРОВАНИЕ БАЗЫ ЗНАНИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МНОГОМЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

Д. Ю. Муромцев^а, доктор техн. наук, профессор, mdjur@mail.ru

А. Н. Грибков^а, доктор техн. наук, профессор, gribkovalexey@yandex.ru

И. В. Тюрин^а, канд. техн. наук, доцент, tyrinilja@yandex.ru

В. Н. Шамкин^а, доктор техн. наук, профессор, shamkin-v@mail.ru

^аТамбовский государственный технический университет, Советская ул., 106, Тамбов, 392000, РФ

Введение: проблема проектирования информационно-управляющих систем для многомерных технологических объектов требует комплексного анализа их эксплуатационно-технологических режимов промышленного оборудования. Решение ситуационных задач, связанных с построением моделей и оптимизацией в условиях неопределенности при оперативном принятии решений, приводит к необходимости использовать методы искусственного интеллекта. **Цель:** развитие методологии проектирования интеллектуальной информационно-управляющей системы, инвариантной различным многомерным технологическим объектам управления, позволяющей с учетом особенностей этих объектов оперативно синтезировать в реальном масштабе времени энергосберегающие управляющие воздействия. **Результаты:** разработана статическая модель фреймовой базы знаний информационно-управляющей системы для динамических режимов работы энергоемких технологических установок, позволяющая учитывать множество состояний работоспособности объекта управления, множество состояний его функционирования и дестабилизирующие факторы различной природы. Предложен интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза энергосберегающих управляющих воздействий для многомерных тепловых технологических объектов в режиме разогрева: многозонных печей конвекционного нагрева, многосекционных сушилок, котельных установок и других тепло-технологических аппаратов. **Практическая значимость:** созданная структура базы знаний позволяет оперативно предоставлять информационную поддержку модулям, реализующим алгоритмическое обеспечение интеллектуальной информационно-управляющей системы, что в свою очередь дает возможность синтеза энергосберегающего управления многомерным тепловым технологическим объектом в реальном масштабе времени. Кроме того, энергосберегающее управление характеризуется плавным протеканием тепловых процессов, а это ведет к повышению долговечности и безопасности эксплуатации оборудования.

Ключевые слова — энергосбережение, многомерные объекты, база данных, база знаний, экспертная система, информационно-управляющие системы, множество состояний функционирования.

Цитирование: Муромцев Д. Ю., Грибков А. Н., Тюрин И. В., Шамкин В. Н. Проектирование базы знаний интеллектуальной информационно-управляющей системы для многомерных технологических объектов // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 24–30. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-24-30

Citation: Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N., Tyurin I. V., Shamkin V. N. Designing a Knowledge base for Intelligent Information System of MIMO Control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 24–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-24-30

Введение

Современные требования к экологичности и экономичности промышленного оборудования предполагают широкое внедрение перспективных инновационных — интеллектуальных и энергосберегающих — методов управления энергоемкими объектами.

В мировой практике к настоящему времени выработано несколько основных подходов к снижению потребления энергетических ресурсов. Во-первых, оптимизация технологических процессов, использование новой материально-технической базы. Во-вторых, широкое использование альтернативных возобновляемых источников энергии: солнечных, геотермальных, ветровых, приливных и др. В-третьих, развитие энергосберегающих технологий, в частности, за счет опти-

мального управления энергоемкими объектами [1, 2].

К наиболее энергоемким объектам следует отнести тепловые технологические установки: разнообразие печи, сушилки, вулканизаторы, котельные и холодильные установки. Особенность данного оборудования как объектов управления заключается в том, что большинство из этих устройств являются типичными многомерными объектами, в которых каждый входной сигнал влияет на группу выходных сигналов и, соответственно, выход зависит от нескольких входов. Эффективность функционирования многомерного технологического объекта определяется его свойствами безотказности, режимами работы, внешними воздействиями и другими дестабилизирующими факторами детерминированной, вероятностной или нечеткой природы. Поэтому

проектирование информационно-управляющих систем для подобных установок требует тщательного изучения их особенностей как объектов управления [3–10].

Особенности многомерных объектов управления

Основными особенностями многомерных технологических установок как объектов управления являются:

- существенные энергетические затраты;
- жесткие требования к поддержанию параметров технологических процессов;
- важность учета процессов, протекающих в оборудовании и оказывающих взаимное влияние друг на друга;
- наличие внешних и внутренних воздействующих факторов в каналах управления и измерения;
- изменение параметров многомерных объектов в процессе реальной эксплуатации [3, 11].

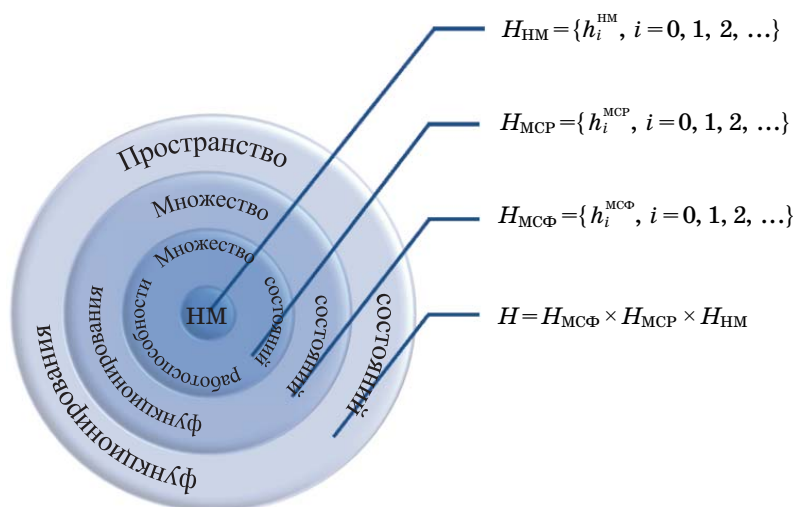
Эффективность функционирования многомерного технологического объекта определяется его свойствами безотказности, режимами работы, внешними воздействиями и другими дестабилизирующими факторами детерминированной, вероятностной или нечеткой природы. Для учета всех этих факторов в совокупности вводятся множество состояний работоспособности (МСР), множество состояний функционирования (МСФ) и нечеткое множество (НМ), образующие некое пространство, схематичное представление которого показано на рис. 1, где H — пространство состояний функционирования; $H_{МСФ}$ — множество производственных ситуаций; $H_{МСР}$ — множество

состояний работоспособности; $H_{НМ}$ — дискретное множество, получаемое из нечетких множеств с применением процедуры, аналогичной лингвистической аппроксимации.

Множество состояний работоспособности позволяет анализировать ситуации, для которых накоплены достаточные статистические данные, например, по отказам оборудования, информационных систем, ошибкам персонала и другим факторам. Расчет вероятностей состояний работоспособности (как стационарных, так и нестационарных) проводится с использованием различных методов [3, 8, 11], основанных на декомпозиции системы, построении моделей состояний работоспособности составных частей и системы в целом, а затем решении систем уравнений или использовании рекуррентных формул.

Однако знания состояний работоспособности системы и вероятностей этих состояний во многих случаях недостаточно для определения рисков и прогнозирования показателей эффективности проектируемых систем в процессе реальной эксплуатации. Более полно возможные состояния функционирования при длительной эксплуатации системы отражает МСФ, в котором наряду с состояниями работоспособности учитываются смены режимов работы, связанные с новыми производственными заданиями; изменения постановок задач управления; интенсивности внешних воздействий и т. д. [12]. Структура МСФ аналогична МСР, и для определения вероятностей состояний функционирования используются практически те же методы.

В то же время ни МСР, ни МСФ не позволяют учитывать быстро меняющуюся обстановку внешнего окружения. Это может быть связано, например, с изменением спроса потребителей,



■ **Рис. 1.** Компоненты пространства состояний функционирования
 ■ **Fig. 1.** Components of the space of functioning states

цен на энергоносители, сырье, а также другими факторами, для которых нет достаточного статистического материала, поэтому они могут быть описаны лишь на качественном уровне. Решение подобного рода ситуационных задач, связанных с построением моделей и оптимизацией в условиях неопределенности при оперативном принятии решений, приводит к необходимости использовать методы искусственного интеллекта [13]. Недостаточная теоретическая подготовка пользователей и недостаточное использование опыта и знаний экспертов в соответствующей предметной области также требует интеллектуализации разрабатываемой системы при реальной ее эксплуатации. Поэтому развитие методологии проектирования интеллектуальной информационно-управляющей системы, инвариантной различным многомерным технологическим объектам управления и позволяющей с учетом особенностей этих объектов оперативно синтезировать в реальном масштабе времени энергосберегающие управляющие воздействия, является востребованной задачей.

Информационное обеспечение интеллектуальной информационно-управляющей системы

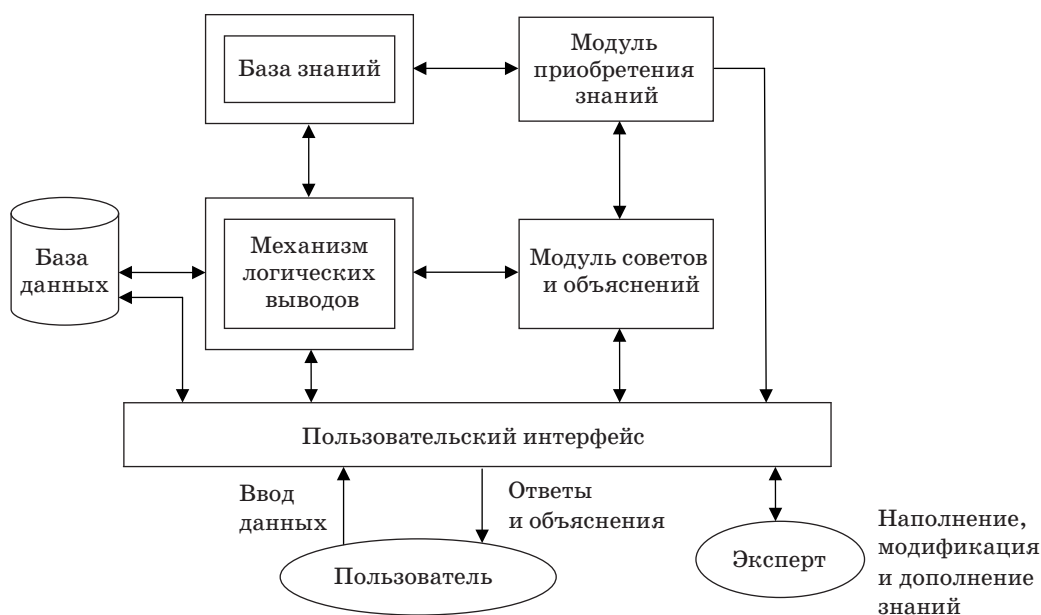
Основу интеллектуальной информационно-управляющей системы энергосберегающего управления (ЭУ) составляет экспертная система (рис. 2) [14]. В ней реализована методология по-

строения гибридных экспертных систем, предназначенных для решения задач управления многомерными энергоемкими технологическими объектами.

База данных содержит сведения о результатах внедрения системы интеллектуального ЭУ, полученный эффект использования синтезированных алгоритмов управления, различные виды моделей процессов, параметры и состав моделей для многомерных объектов, а также используемые стратегии, условия решения задач управления и т. д.

В базе знаний (БЗ) содержатся как общие знания о математических методах анализа и синтеза, так и знания прикладного характера, полученные от экспертов и используемые разработчиками алгоритмического обеспечения. Пользователи и эксперты взаимодействуют с экспертной системой через пользовательский интерфейс. При этом предусматривается пополнение БЗ результатами реальной эксплуатации объектов. Механизм логических выводов применяет знания и сведения из баз знаний и данных при решении практических задач. Модуль приобретения знаний позволяет пополнять и модифицировать знания в процессе эксплуатации системы, а модуль советов и объяснений выдает заключения и необходимые пояснения пользователю [15].

База знаний имеет стратифицированную иерархическую структуру в виде множества взаимосвязанных фреймов, образующих единую фреймовую систему, в которой объединяются декларативные и процедурные знания, а также



■ Рис. 2. Обобщенная структурная схема экспертной системы интеллектуальной информационно-управляющей системы
 ■ Fig. 2. Generalized block diagram of the expert system of intelligent information-control system

организованы принципы, присущие объектно-ориентированному подходу, такие как инкапсуляция, наследование и полиморфизм. Фреймы БЗ имеют слоты, содержащие не только конкретное значение, но также имена процедур, позволяющих вычислять это значение по заданному алгоритму. Некоторые фреймы содержат слоты, заполнителями которых являются правила продукций, используемые для определения конкретного значения.

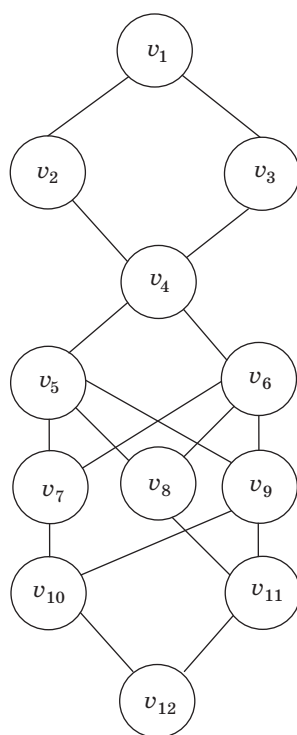
В качестве примера на рис. 3 представлен интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза энергосберегающих управляющих воздействий для многомерных тепловых технологических объектов в режиме разогрева, а в таблице — описание стратифицированной структуры графа.

Из таблицы видно, что высший уровень иерархии интегрированного графа содержит фрейм для определения состояния функционирования многомерного объекта. На следующем уровне представлены фреймы, позволяющие идентифицировать его режим работы. Далее идет уровень, содержащий фреймы для дефиниции цели управления. За ним расположен уровень с фреймами для структурной и параметрической идентификации математических моделей объекта. На последующих уровнях находятся фреймы анализа задачи управления, определения стратегии реализации

управляющих воздействий и синтеза алгоритмического обеспечения. Последний иерархический уровень представлен фреймами имитационных моделей для верификации и тестирования синтезированного алгоритмического обеспечения.

Данная иерархическая структура позволяет организовать процесс приобретения и использования знаний и интеллектуализировать синтез решения задачи ЭУ режимами работы многомерного энергоемкого объекта [16]. Программная реализация фреймовой БЗ интеллектуальной энергосберегающей системы управления представляет собой набор классов, созданных в интегрированной среде программирования CodeGear RAD Studio 2007 Professional на языке Object Pascal. Статические модели фрагментов структуры БЗ для режима разогрева, представленные в спецификации унифицированного языка графического моделирования UML, показаны на рис. 4 в виде диаграммы классов.

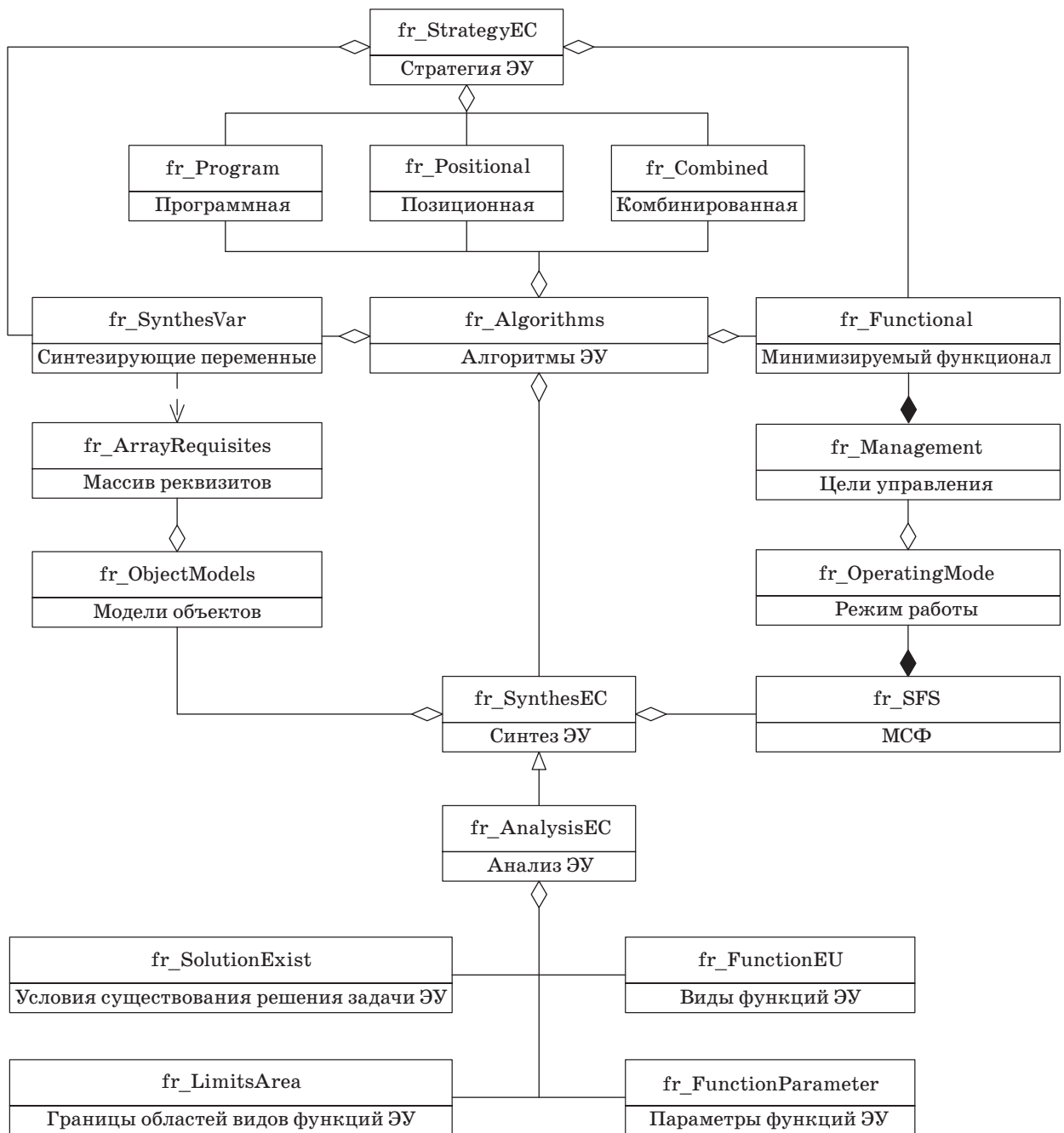
Модуль, осуществляющий идентификацию состояния функционирования, использует фрейм *fr_SFS*, включающий в себя фрейм *fr_OperatingMode*, агрегирует фрейм *fr_Management*. Фрейм *fr_Management* содержит фрейм *fr_Functional* для расчета значения функционалов затрат энергии и топлива. Модуль анализа ЭУ в зависимости от объекта управления использует фрейм анализа ЭУ *fr_AnalysisEC*,



■ **Рис. 3.** Интегрированный граф обобщенной технологии интеллектуализации синтеза ЭУ
 ■ **Fig. 3.** Integrated graph of generalized intellectualization technology for energy-saving control synthesis

- Описание структуры графа
- Description of the graph structure

Страта	Вершина	Описание
Режимов	v_1	Разогрев
Целей управления	v_2	Энергосбережение
	v_3	Ресурсосбережение
Математических моделей	v_4	Модель нагревательных элементов
Особенностей задач управления	v_5	Экономия электроэнергии
	v_6	Экономия топлива
Стратегий	v_7	Комбинированная
	v_8	Позиционная
	v_9	Программная
Анализа и синтеза	v_{10}	Синтезирующая функция
	v_{11}	Программа управления
Имитационного моделирования	v_{12}	Модели разогрева рабочих зон



■ **Рис. 4.** Статическая модель фреймовой БЗ для режима разогрева
 ■ **Fig. 4.** Static model of frame knowledge base for heating mode

агрегирующий фреймы получения условий существования решения задачи ЭУ *fr_SolutionExist*, определения видов функций ЭУ *fr_FunctionEU*, границ их областей *fr_LimitsArea* и оценки их параметров *fr_FunctionParameter*.

Модуль синтеза для решения задач управления многомерным тепловым технологическим объектом использует фрейм *fr_SynthesEC*, включающий фреймы:

- математических моделей объектов *fr_ObjectModels*;
- алгоритмов управления *fr_Algorithms*;
- множества состояний функционирования *fr_SFS*.

Фрейм массива реквизитов *fr_ArrayRequisites* агрегирует фрейм моделей *fr_ObjectModels* и связан отношением зависимости с фреймом расчета синтезирующих переменных *fr_SynthesVar*.

Заключение

Созданная структура БЗ предусматривает оперативную работу модулей, реализующих алгоритмическое обеспечение интеллектуальной информационно-управляющей системы, что дает возможность синтезировать ЭУ многомерным тепловым

технологическим объектом в реальном масштабе времени. Энергосберегающий разогрев позволяет добиться экономии 5–7 % энергоресурсов без снижения качества выпускаемой продукции [3, 9, 11].

Работа выполнена при поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 17-08-00457-а.

Литература

1. Пастушенко И. Л. Управление энергосберегающими инновациями в нефтяной и газовой промышленности // Бизнес. Образование. Право. 2017. № 4 (41). С. 240–245.
2. Конькова М. К. Управление энергосберегающими процессами // Аллея науки. 2017. № 9 (4). С. 599–601. <http://alley-science.ru/> (дата обращения: 15.05.2018).
3. Артемова С. В., Артемов А. А. Энергосберегающее управление технологическими процессами нагрева (на примере установки отжига магнитопроводов) // Вестник Тамбовского университета. Сер.: Естественные и технические науки. 2012. Т. 17. № 5. С. 1375–1379.
4. Соболев А. В., Ляшенко А. И., Соболева Ю. В., Вент Д. П. Энергосберегающее управление технологическими процессами // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 3. С. 326–334.
5. Алимбеков А. Р. Энергосберегающее устройство управления технологическим процессом // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2012. № 3 (14). С. 146–148.
6. Парсункин Б. Н., Булычева С. В. Оперативное энергосберегающее оптимальное управление технологическими процессами // Приложение математики в экономических и технических исследованиях. 2014. № 4 (4). С. 271–281.
7. Парсункин Б. Н., Самарина И. Г. Система автоматического энергосберегающего управления на основе математической модели газодинамического режима нагревательной методической печи // Электротехнические системы и комплексы. 2017. № 2. С. 55–60.
8. Андреев С. М., Парсункин Б. Н., Ахметов Т. У. Разработка и исследование работы системы энергосберегающего управления нагревом заготовок в методических печах листопрокатных станков // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова. 2014. № 1 (45). С. 122–128.
9. Pchelintsev A. N., Pogonin V. A. A Method of Determining the Control Parameters in the Energy-Saving Control Problem // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10. N 2. P. 33–36.
10. Yakushkin I. P. Methodology to Determine Heat Losses as an Element of a Ventilation Automatic Control Energy-Saving System // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. 2016. Vol. 7. N 5. P. 390–396.
11. Shamkin V. N., Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N. Using Destabilization Control to Improve the Functioning of Complex Multidimensional Technological Objects on the Time Interval // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. N 24. P. 7198–7217.
12. Шепель В. Н., Трипкош В. А. Алгоритм распознавания производственных ситуаций в информационно-управляющих системах на основе решения составной байесовской задачи // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2017. № 12. С. 97–101.
13. Степанов М. Ф., Степанов А. М., Михайлова Л. С., Жеронкина А. А. Система моделирования процессов управления нестационарными нелинейными объектами интеллектуальными системами управления // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ. 2015. № 7. С. 179–186.
14. Джамбакиева Н. Р. Методологии и технологии разработки баз знаний // Аллея науки. 2018. Т. 2. № 4 (20). С. 1000–1002. <http://alley-science.ru/> (дата обращения: 18.05.2018).
15. Анисимов Д. Н., Фёдорова Е. В., Грязнов С. М. Оценка свойств нечетких систем управления на этапе формирования базы знаний // Мехатроника, автоматизация, управление. 2018. Т. 19. № 5. С. 291–297.
16. Kondratenko Y., Korobko O. V., Kozlov O. V. PLC-based Systems for Data Acquisition and Supervisory Control of Environment-Friendly Energy-Saving Technologies // Studies in Systems, Decision and Control. 2017. Vol. 74. P. 247–267.

UDC 62-503.55

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-24-30

Designing a Knowledge base for Intelligent Information System of MIMO Control

Muromtsev D. Yu.^a, Dr. Sc., Tech. Professor, mdjur@mail.ruGribkov A. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, gribkovalexey@yandex.ruTyurin I. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, tyurinilja@yandex.ruShamkin V. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, shamkin-v@mail.ru^aTambov State Technical University, 106, Sovetskaya St., 392000, Tambov, Russian Federation

Introduction: The problem of designing information control systems for MIMO systems requires a comprehensive analysis of their operational and technological regimes. Artificial intelligence methods can be used to solve problems related to building models and their optimization in conditions of uncertainty when it is necessary to make prompt decisions. **Purpose:** Developing a methodology for designing an intelligent information control system which would be invariant to various MIMO systems and could promptly synthesize energy-efficient control actions in real time, taking into account the features of these objects. **Results:** A static model has been developed for a frame-based knowledge base of an information-control system for energy-intensive process plants in dynamic operation modes. It allows you to take into account the number of states of the operating capability of the control object, many states of its operation, and destabilizing factors of various types. An integrated graph is proposed for generalizing intellectualization technology of synthesizing energy-saving control actions for MIMO thermal facilities in warm-up mode. **Practical relevance:** The created knowledge base structure allows you to promptly provide information for modules realizing algorithmic support of an intelligent information and control system, which in turn makes it possible to synthesize energy-efficient control of a MIMO thermal facility in real time. In addition, energy-saving control is characterized by a smooth flow of thermal processes, and this leads to increased durability and safety of the equipment operation.

Keywords — Energy Saving, MIMO Systems, Database, Knowledge Base, Expert System, Information and Control Systems, Set of States of Functioning.

Citation: Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N., Tyurin I. V., Shamkin V. N. Designing a Knowledge base for Intelligent Information System of MIMO Control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 24–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-24-30

References

- Pastushenko I. L. Management of Energy-Saving Innovations in the Oil and Gas Industry. *Biznes. Obrazovanie. Pravo*, 2017, no. 4 (41), pp. 240–245 (In Russian).
- Kon'kova M. K. Managing Energy-Saving Processes. *Alleya nauki*, 2017, no. 9(4), pp. 599–601. Available at: <http://alley-science.ru/> (accessed 15 May 2018) (In Russian).
- Artemova S. V., Artemov A. A. Energy-Saving Control of Technological Processes of Heat (on Example of Installation of Magnetic Circuits Annealing). *Vestnik Tambovskogo universiteta. Seriya "Estestvennye i tekhnicheskie nauki"* [Tambov University Reports. Series Natural and Technical Sciences], 2012, no. 17(5), pp. 1375–1379 (In Russian).
- Sobolev A. V., Lyashenko A. I., Soboleva Yu. V., Vent D. P. Energy-Saving Control of Technological Processes. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proc. of the TSU], 2012, no. 3, pp. 326–334 (In Russian).
- Alimbekov A. R. Energy Saving Device of the Technological Process Control. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*, 2012, no. 3 (14), pp. 146–148 (In Russian).
- Parsunkin B. N., Bulycheva S. V. Operational Energy Saving Optimal Control of Technological Processes. *Prilozheniya matematiki v ekonomicheskikh i tekhnicheskikh issledovaniyakh*, 2014, no. 4 (4), pp. 271–281 (In Russian).
- Parsunkin B. N., Samarina I. G. Automatic Energy-saving Control System based on a Mathematical Model of the Gas-dynamic Mode of a Continuous Furnace. *Elektrotekhnicheskie sistemy i kompleksty* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2017, no. 2, pp. 55–60 (In Russian).
- Andreev S. M., Parsunkin B. N., Akhmetov T. U. The Development and Investigation of Billet Heating Energy Saving Control System in Sheet Mill Reheating Furnaces. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2014, no. 1 (45), pp. 122–128 (In Russian).
- Pchelintsev A. N., Pogonin V. A. A Method of Determining the Control Parameters in the Energy-Saving Control Problem. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2015, no. 10(2), pp. 33–36.
- Yakushkin I. P. Methodology to Determine Heat Losses as an Element of a Ventilation Automatic Control Energy-Saving System. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 2016, no. 7(5), pp. 390–396.
- Shamkin V. N., Muromtsev D. Yu., Gribkov A. N. Using Destabilization Control to Improve the Functioning of Complex Multidimensional Technological Objects on the Time Interval. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2017, no. 12(24), pp. 7198–7217.
- Shepel' V. N., Tripkosh V. A. The Recognition Algorithm of the Production Situations in Management Information Systems Based on Compound Bayesian Task Decision. *Intellekt. Innovatsii. Investitsii* [Intelligence. Innovations. Investments], 2017, no. 12, pp. 97–101 (In Russian).
- Stepanov M. F., Stepanov A. M., Mihajlova L. S., Zheronkina A. A. System for Modeling Control Processes of Non-Stationary Nonlinear Objects by Intelligent Control Systems. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyah — MMTT*, 2015, no. 7, pp. 179–186 (In Russian).
- Dzhambakieva N. R. Methodologies and Technologies for the Development of Knowledge Bases. *Alleya nauki*, 2018, vol. 2 no. 4 (20), pp. 1000–1002. Available at: <http://alley-science.ru/> (accessed 18 May 2018). (In Russian).
- Anisimov D. N., Fyodorova E. V., Gryaznov S. M. Evaluation of the Properties of Fuzzy Control Systems in the Stage of Formation of the Knowledge Base. *Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2018, no. 19(5), pp. 291–297 (In Russian).
- Kondratenko Y., Korobko O. V., Kozlov O. V. PLC-based Systems for Data Acquisition and Supervisory Control of Environment-Friendly Energy-Saving Technologies. *Studies in Systems, Decision and Control*, 2017, no. 74, pp. 247–267.

MODEL OF FISH POPULATION DYNAMICS WITH CALCULATION OF INDIVIDUAL GROWTH RATE AND HYDROLOGICAL SITUATION SCENARIOS

V. V. Mikhailov^a, Dr. Sc., Tech., Professor, mwwcari@gmail.com

A. Yu. Perevaryukha^a, PhD, Tech., Senior Researcher, madelf@pisem.net

Yu. S. Reshetnikov^b, Dr. Sc., Biol., Professor, ysreshetnikov@gmail.com

^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bA. N. Severtsov Institute of Ecology and Evolution RAS, 33, Lenin Ave., 117071, Moscow, Russian Federation

Introduction: Populations of commercially valuable fish species develop in aquatic ecosystems according to internal mechanisms of their evolutionary adaptations, which do not always suit the environmental conditions which can change due to anthropogenic pressure. Often the factors of reservoir eutrophication or introduction of new species into the ecosystem aggravate the competitive confrontation of the populations. The changes spread by domino effect and complicate the development of a strategy for rational exploitation of biological resources. Species under non-optimal anthropogenic conditions are vulnerable. **Purpose:** Developing a model for introduced population dynamics, implemented as a group of scenarios for a volatile environment. **Results:** We developed a computational model of a population to describe the scenarios for its adaptation to environmental conditions. The scenarios include the pace of dimensional development and nutrition of fish. The model includes a unit for calculating diets, taking into account the hydrological situation factors: the oxygen content and the activity of hydrogen ions. The model is capable of operating in two modes: under standard environmental conditions (without specifying the hydrological situation) and with preset conditions for anthropogenic changes. Our approach allowed us to predict changes in the population structure with variability in abiotic factors. The model demonstrates the risk of taking out the fish which make the greatest contribution to the biomass growth rate. **Practical relevance:** The model was identified using the data on whitefish population in the Lake Sevan. It is suitable for computer simulation experiments, which made it possible to describe specific features of scenarios of population dynamics for the cases of increased fishing, limited feeding and changes in the hydrological conditions of the lake.

Keywords – Nonlinear Models of Populations, Fish Growth Models, Energy Balance Calculation, Commercial Exploitation Scenarios, Eutrophication.

Citation: Mikhailov V. V., Perevaryukha A. Yu., Reshetnikov Yu. S. Model of Fish Population Dynamics with Calculation of Individual Growth Rate and Hydrological Situation Scenarios. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 31–38. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-31-38

Introduction

In our previous work [1], we used mathematical methods to analyze the dynamic balance of the main biogenic elements which form the first level of an ecosystem. We developed a computational model for the consequences of excessive accumulation of nitrogen and phosphorus in the bottom sediments of a large reservoir. As more nutrients flow into the reservoir due to human economic activity, eutrophication processes start (algal bloom and oxygen deficiency). We successfully parameterized the model by real waterbody data and calculated a forecast of hydrochemical indicators. Ecosystems are highly prone to domino effect. Transformation of the trophic status of a reservoir from oligotrophic to eutrophic type after a certain time interval is also manifested in its aquatic community. Species adapted to the local conditions cannot change quickly, so the advantage is given to active unwanted invaders, less demanding of low oxygen content.

In another work [2], we developed a continuous-discrete model in the form of a differential equation system with a redefinable computational structure in order to describe sturgeon reproduction efficiency on the basis of various survival factors at juvenile development stages. For an exploited population with adaptive cyclicality, we described a computational scenario of degradation in the form of a sudden collapse. This paper is a logical continuation of our research in mathematical biology. It represents an aggregated model of fish population dynamics associated with environmental conditions by the key hydrological indicators through the efficiency of biomass accumulation and the rates of linear growth, taking into account unbalanced feeding. It should be noted that fishery forecasts are formed on the basis of statistical processing and averaged observation data for the previous period, but statistical methods for assessing the stock replenishment efficiency are often unpromising when the trophic status of a reservoir undergoes drastic

shifts. We took into account possible methodological errors in mathematical analysis [3, 4]. Note that *Coregonus* fishes are typical representatives of the Arctic ichthyofauna [5–9], therefore their habitat in middle latitudes is possible only in high mountain lakes like Issyk-Kul, Sorulukel or Sevan.

Characteristics and Components of the Model

The population model structure unites three submodels: 1) a model of individual weight dynamics; 2) a model of age group size dynamics; 3) a model of spawn yield dynamics with continuous calculation of fry loss. These submodels are adjusted for joint calculations, but they can be used independently to calculate particular problems, for example, analyzing the data on fish nutrition energetics and respiration (important for the case of reservoir eutrophication), or estimating the coefficients of natural and commercial mortality by fish age groups.

The interaction of the submodels is organized in such a way that they can describe important intrapopulation mechanisms: dependence of the diet and weight on the size of fish age groups; dependence of the fish spawn yield on the diet; dependence of the natural mortality coefficients on the actual diet; dependence of the natural mortality coefficients on the participation in spawning; dependence of the fecundity on the fish weight and age. To set up the initial state, parameters for the standard environmental conditions are specified.

We accept that abiotic factors directly affect two population indices: the diet of the fish and the mortality of their eggs; and indirectly they affect the weight of individuals, their mortality and fecundity, which was shown by the example of *Coregonus* fishes [4, 10, 11]. In our model, the temperature of the water and the concentration of dissolved O_2 affect the amount of food and the mortality of eggs; the water pH has a predominant effect on the egg mortality.

The general algorithm of our model implies that initially for all age groups, on the base of the initial data on individual weight, we determine the maximum amount of food, the expenditure on respiration, and the increase in fish weight corresponding to the maximum food amount. After that, based on the scenario data, the actual amount of energy received by a fish age group is calculated, and the weight value is corrected, taking into account the diet. The next step is to calculate the size of the age groups in accordance with the natural mortality and fishing seizures. It is assumed that all the fish that have reached the given weight by the time of spawning participate in the reproduction, and the spawn amount is proportional to the weight and age of the spawning fish.

Calculation units for Individual Indicators

The maximum amount of food and the body weight gain for fish are determined within a month, provided that their nutritional needs are fully met. The internal time step of a unit is considered equal to a day. Since the mortality of juveniles is extremely high, the calculation of the daily amount of food is carried out according to their actual number taking into account the daily mortality. For other age groups, the food amount is calculated on the basis of a fixed abundance in each month. The weight gain is calculated as follows:

$$W_m(t+1) = W(t) + \Delta W_m(t+1),$$

$$\Delta W_m(t+1) = C_m \times U - R,$$

where W , W_m are the actual and maximum weights of a fish; ΔW_m is the maximum gain; C_m is the maximum amount of food; U is the food assimilation coefficient; R is the expenditure on respiration. The standard amount of food corresponds to an average monthly amount at which a fish gains the given standard weight. On the basis of biological data [12, 13], we define the food amount as a power function of weight:

$$C_m = \alpha_0 \times C_{ct1} \times W^{\alpha_1},$$

where C_{ct1} is the standard food amount for a fish weighing 1 kg; α_0 is a correction for the excess of the maximum food amount over the standard food amount; $\alpha_1 \in [1/2, 2/3]$; C_m is the maximum food amount for a fish weighing W kg.

The standard amount of food is calculated based on the average monthly water temperature and oxygen content in water: $C_{ct1} = \alpha_2 \times A_t \times A_k$, where α_2 is a constant coefficient, and A_t, A_k are corrections for temperature and oxygen.

The dependence of the food amount on temperature is nonlinear; when the temperature is optimal for a given fish species, the curve has a maximum. When the temperature reaches the limit, the food amount drops to zero, and the nutrition stops. In the model, the dependence is approximated by the following formulas:

$$0 \leq T \leq T_{opt}, A_t = \alpha_3 \times T^2 - \alpha_4 \times T^3;$$

$$T_{opt} < T < T_{max}, A_t = 1 - \alpha_5 \times (T - T_{opt})^2;$$

$$T > T_{max}, T < 0, A_t = 0.$$

Let us assume that when the oxygen concentration is more than a given limit value $O_2 > O_2 \text{ lim}$, this factor is not a limiting factor anymore. As the oxygen content in water drops during eutrophication, the food amount first quickly decreases from normal down to 0.1, and then gradually decreases

down to zero. The dependencies are approximated in the model as follows:

$$\begin{aligned} O_2 \min < O_2 \leq O_2 \text{ lim}, A_k &= \alpha_6 + \alpha_7 \times \\ &\times (O_2 - O_2 \min + \alpha_8 (O_2 - O_2 \min)^2 - \alpha_9 (O_2 - O_2 \min)^3); \\ O_2 < O_2 \min, A_k &= \alpha_{10} \times O_2. \end{aligned}$$

The calculation of energy consumption is based on the assumption that the expenditure on respiration consists of two components which are the expenditure related to the maintenance of the ichthyomass and the expenditure related to its growth according to the formula $R = A(W) \times (R_n - R_p)$.

To figure out the structure of the dependencies of expenditure on respiration, the Brett and Groves scheme was used [14], which defines the ratio of active and standard metabolism as a function of temperature. We took into account the data on the change in the ratio of active and standard metabolism, and the distribution of the energy supplied with food to biomass and respiration in fish ontogeny [15, 16].

It has been found that the maintenance expenditure is proportional to the biomass, increasing as the temperature increases according to the Krogh function: $R_n = K(T) \times W \times \alpha_{16}$, where $K(T)$ is the Krogh function, and α_{16} is an empirical coefficient. The expenditure related to growth is proportional to the food amount, decreasing linearly as the temperature increases, according to the law $R_p = C(1 - \alpha_{17}) \times \alpha_{18}$.

Food spectrum calculation unit. The model identification approach uses the data on the food biomass and the priorities of its consumption by whitefish age groups. The data are represented in tables of average annual changes in the food spectrum depending on the age of the fish. The unit calculates the actual food amount for the fish in accordance with the available food biomass, and with the requests for a particular food type from all the competing whitefish age groups [17]. The average monthly biomass of various food types is represented in proportion to their share in the diet, ensuring the constant tension in the food relations. The absolute value of the food biomass is given by a periodic function in order to provide the standard amount of food for the fish at their normal level of eating (30–40 % of the average monthly biomass). Note that a sharp change in conditions can force whitefish to drastically change their food spectrum, up to becoming predators sometimes [18–20].

Biomass increment correction algorithm. An iterative algorithm corrects the biomass increment and the expenditure on respiration, taking into account the actual diet:

$$\begin{aligned} W(t+1) &= W(t) + \Delta W_m(t) \times C / C_m; \\ R(t+1) &= R_m(t+1) \times C / C_m. \end{aligned}$$

It is assumed in the calculations that the food distribution structure does not depend on the food amount. Separately, a weight correction is introduced after spawning for the age groups involved in reproduction.

Calculation of natural mortality coefficients. A very important component of the simulation model is the estimation of biological resource loss. The curve of natural mortality has a U-shape. Mortality in the first age group is large, then it decreases, reaching its minimum before spawning, and grows again, approaching the maximum during the 10th year of a whitefish's life [5, 21]. Let us assume that the mortality of fish depends on the degree of satisfying their nutritional needs. The loss from the lack of food can be simulated by the following dependence:

$$\begin{aligned} C / C_m &\geq Kg, KCg = 0; \\ C / C_m &< Kg, KCg = \\ &= 1 - \exp(-\alpha_{18} \times (C_m / C - \alpha_{19})) \times \\ &\times \Delta W(t+1) / W_m(t+1) + W(t), \end{aligned}$$

where KCg is the mortality coefficient which depends on starvation, and Kg is the starvation threshold. In the exponential factor we take into account the dependence between the mortality and the relative monthly increment. The natural mortality coefficient KC as a whole by groups can be found by the following formula:

$$KC = 1 - (1 - KCct) \times (1 - KCner) \times (1 - KCg),$$

where $KCct$ is the mortality without spawning, at normal feeding conditions; and $KCner$ is the spawning loss. We have to calculate the loss associated with density and competition.

Method for Evaluating the Reproduction Efficiency

Let us separately introduce an estimate of the loss at the earliest stages of development, which would additionally depend on the initial spawn density $N(0)$. The well-known Ricker function $R = \xi N(0) \exp(-bN(0))$ is not suitable here because the iteration trajectory shows chaotization properties with the increase of $\xi > e^2$ which is an unexplained mode for biology [2]. For our calculations we will use the implementation of a continuous segment in the iterative model construction. Here we apply a modification of our reserve-replenishment model for a decrease in the abundance from $N(0)$ down to $R = N(T)$ in the form of a system of equations on a time interval which makes up a continuous vulnerability interval $t \in [0, T]$:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -(\gamma w(t)N(t) + \Theta(S)\beta)N(t); \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{\sqrt{N^k(t) + \sigma}}, \Theta(S) = (1 - e^{-cS})^{-1}, \end{cases} \quad (*)$$

γ is a coefficient of mortality which depends on the group density; β is a coefficient of neutral loss; $w(t)$ is a parameter of individual development in early ontogeny under the influence of group huddling. $\Theta(S)$ reflects the drop in spawning efficiency for a small population after overfishing: $\lim_{S \rightarrow \infty} \Theta(S) = 1$.

A computational solution of the Cauchy problem (*) will provide a calculation of the loss from spawn to fry, by a dependence with a pronounced maximum which will be the most efficient size of a spawning group. With an increase in the reserve size, the reproduction efficiency decreases, though with a non-zero horizontal asymptote.

Only the use of empirical dependencies for each type in tabular form can allow us to perform predictive calculations of the model in order to study the survival of spawn taking into account the changes in the environment parameters. The death of eggs, apart from predation, is associated with the water temperature and the amount of oxygen dissolved in the water. For the reservoir eutrophication scenario [5], we can use corrections based on the algorithm for calculating the oxygen content in the model of the biogenic element balance described in our previous paper.

In calculating the total number of eggs $N(0)$ for the system of equations (*), it is assumed that a fish participates in spawning if by the spawning time it reaches the weight W_{ner} . The amount of spawn $N(0)$ is defined proportional to the fish weight and age: $N(0) = \alpha_{20} + \alpha_{21} \times W(L) + \alpha_{22} \times L$, where L is the age of a spawning fish; W is the fish weight, and $W > W_{ner}$. If by the spawning time the fish gains a weight larger than W_{ner} , it can spawn again; if not, it has to miss the spawning season.

The balance of the size of age groups is calculated at the end of each month, taking into account the natural mortality and the share $F \in [0, 1]$ of the fishery (which can be legal and unaccounted): $N(t+1) = N(t) \times (1 - (1 - KC) \times (1 - F))$. Finally, the iterative algorithm calculates the transition of the fish to their next age group and the population replenishment by the fish which have survived the juvenile stage when they are most vulnerable. Mature whitefish have no natural enemies.

Identification of the Population Model

The population model was identified based on data on the whitefish population in the Lake Sevan, Armenia. This whitefish is a hybrid between *Core-*

gonus lavaretus maraenoides and *Coregonus lavaretus ludoga* which were both introduced into the Lake Sevan during the 1920s. After their natural hybridization, many morphological and biochemical indicators allow us to consider Sevan whitefish as a single population in our model [22]. Long after their introduction, they did not play a large role in the fishery, but since the 1960s increased their abundance, and in 1980s became the most important fish for the local fishing industry. The fishery intensification has changed the population age structure, and now fish older than 8 years are rare. In accordance with this, the maximum age of a fish in our model is specified as 10 years. The average weight of fish in catches is equal to 840 g at the age of 3 years. Available literature data describe the fish nutrition spectrum in the Lake Sevan quite fully [23]. We managed to determine the daily food ration SR for whitefish, calculating it according to A. V. Kogan's method [24]. It was found equal to 4.3 % of a fish body weight. The daily fullness index is 1/4 of a daily food ration. Taking into account the food in relation to the water temperature, a table of annual changes in the diet was compiled. On average throughout a year, a daily food ration is 1.9 % of a fish weight, and the annual ration is about 7 fish weights. Similar values describe the feeding of whitefish in a fry nursery model [4].

It is interesting to see how the energy obtained from food is distributed between body weight gain, gonads, respiration and other expenditures. Juvenile whitefish use their food most efficiently: the ratio of ichthyomass increment to assimilated food can be as high as 60 %; then it decreases down to 35 % by the end of the first year of their life and down to 20 % by the third year. The percentage of assimilated food in whitefish is about 80 % of their diet. With these ratios of energy expenditure for biomass increment and respiration, the fish can get the necessary food volume at plausible daily amounts of food. Theoretically, according to the model, whitefish have an opportunity to gain weight of 6 kg by 10 years of age. In fact, the maximum weight of whitefish varies within 2–4 kg, being limited by interspecific competition.

At the initialization, three age groups dominate in a spawning stock: 3+, 4+ and 5+, which together account for more than 80 % of the stock population. Males mature at the age of 2+ when they reach a weight of more than 480 g; females mature at the age of 3+ when they reach a weight of 650–1000 g. The model assumes that fish participate in spawning when they reach a weight of 700 g. With an equal sex ratio in the spawning stock, we assume that about 22.5 % of the spawning fish weight is consumed for reproduction. Each participation in spawning leads to a decrease in survival. Usually 1/3 of the spawning fish die. A similar post-spawning death of whitefish has been observed in nature [5, 6, 9, 11].

Our identification method was used to choose a step-by-step approach which presumed decomposing the model, overbuilding the unit structure, and subsequently taking into account the internal relationships, as well as external influences in simulation experiments.

At the **1st step**, the submodels were adjusted for the standard conditions. The submodel of individual weight dynamics selected and adjusted the functions which determine how the food amount and respiration expenditure depend on the fish weight, based on the data about standard diet, distribution of the energy obtained from food, and growth rate. A good agreement between the actual and calculated data was obtained when choosing power-law dependencies of the food amount and respiration expenditure on the fish weight with a constant distribution of the obtained energy for fish of 2–10 years of age. In the submodel of age group size dynamics, the value of natural mortality coefficient (KC) in a stable population was determined based on data about the age structure, the above-mentioned assumptions about the age changes in KC and the standard catch rate $F = 0.45$. The submodel of spawn yield dynamics determined how the number of spawned eggs depends on the fish weight and age based on data about the fecundity of whitefish in the Lake Sevan.

At the **2nd step** of the identification, the submodels were united and jointly adjusted. The influence of the population abundance on the fish weight was taken into account by introducing actual diet which depends on nutritional needs of the fish and the food availability. The maximum amount of food was considered equal to the amount which allowed a whitefish to gain the weight of 6 kg by 10 years of age. The natural mortality coefficient was decomposed into three components: normal mortality with the standard diet and no spawning, reproductive mortality, and starvation mortality. To determine the starvation mortality, we used the data on fluctuations in the fish weight over the age groups. Let us assume that the fish which fail to reach the minimum weight die. Mortality was determined depending on the ratio of the actual amount of food to the maximum one. The threshold is equal to the ratio at which a whitefish could only gain the minimum weight. Mortality is known to be higher in the situation of food deficiency and excessive juvenile density during the introduction into the reservoir [4], as our model for sturgeons confirmed.

At the **3rd step**, the identification closely considered the influence of external abiotic factors on the standard amount of food calculated by the average monthly water temperature and the content of oxygen in it determined by a balance equation according to G. G. Vinberg's method [12].

Eggs and juveniles are most sensitive to changes in the reservoir trophicity. Some environmental

conditions suitable for mature fish can be disastrous for eggs. The model took into account the effect of temperature, pH and dissolved oxygen content on the egg mortality coefficients. When calculating the natural mortality of mature fish, it operated with the boundary values of abiotic factors known for this particular species.

Adjustment of the model showed that introduction of only few cause-and-effect relationships allowed us to reflect the main ecological aspects of a whitefish population in a certain stable state. Forage limitations keep the population from growing to infinity. The influence of population density on the growth rate allows the whitefish to gain their weight; malnutrition leads to a slower growth and late maturation of the fish; in extreme cases it can lead to their death. In the model, a fish almost never can get as much food as it wants, so the actual amount of the consumed food is equal to 0.6 of the maximum amount, on average. The model successfully took into account some well-known ecological facts: 1) the life expectancy of an individual depends on the age of its first spawning; 2) whitefish can miss some spawning seasons; 3) spawning reduces the chances for survival.

Results of Computational Experiments

Standard environmental conditions are chosen for the convenience of setting up the model and conducting experiments. For the initial state of the model population, the number N of the fish and their biomass B were taken (by age groups) from a population of 16.4 million fish with a total mass of 7124 tons, as estimated for 1980. After that, the age groups iteratively change their number / biomass. The greatest changes occur in the group of underyearlings where the average weight increases by 5 orders of magnitude and the number decreases by 3 orders of magnitude. With 6.64 billion larvae in the beginning, the total mortality of whitefish larvae and fry is 99.8 %. By the end of the year, out of all the larvae hatched 7800 million individuals remain. The high mortality rate cannot prevent a rapid increase in the population biomass. The weight gain rate drops sharply during the winter months. The relative weight loss caused by spawning is constant in all age groups from 3 to 10 and equal to 22.5 %.

The average annual expenditure on respiration is 31 % in the first age group and 68 % in the second one. In older groups, it almost does not change, making up about 80 % of the diet. The coefficient of food use efficiency (P/A) varies little with age, ranging from 19.4 to 19.8 %.

An important computational scenario considered how a whitefish population would react to changes in fishery and forage. Let us assume that intensive

fishing takes up the majority of the population, without selection between fish sizes. The abundance and biomass of the population fall sharply, decreasing in 10 years by about 100 times. Fishery undermines itself: by the 20th year it can take up just 0.7 tons when the population is about 1 thousand fish. In nature, such a decline in population size usually results in irreversible degradation; this is what happened to Canadian cod or Caspian starry sturgeon. Similar influence of overfishing was observed in the Lake Sevan during the 2000s. But some peculiarities of *Coregonus* fish population structure (formation of local subpopulation groups) give them chances to restore their abundance on the base of reproductively isolated groups which have partially survived. The population of the whitefish in the Canadian part of Lake Ontario successfully restored its abundance in the 1990s [25] after overfishing in the 1960s. In our model, a ban on fishing from the 21st year allowed the population to gradually restore its abundance. Calculations have shown that a population can be destroyed in 10 years, and the restoration would take more than 20 years without any fishing.

Fishery as intense as $\Delta F = [0,30; 0,45]$ keeps the population at the level of 20–40 million fish with a biomass of 12–18 thousand tons, maintaining stable catches at the level of 3000 tons. Increasing the intensity of fishing and reducing the minimum weight of fish caught rapidly deplete the biological resources. Excessive fishing decreases the population abundance especially badly in the case of sharp fluctuations in the food supply. The ecological niche is occupied by species-concurrent of lower value. Recent works on other *Coregonus* populations confirm the conclusions about the influence of density factors on the fish growth rate [26], the significance of eutrophication for the welfare of lake populations in Canada and Germany [27, 28], and the effect of temperature [29].

Conclusion

Using the data on the introduced Sevan whitefish, a segmented model has been developed which simulates the dynamics of abundance and biomass for fish population age groups depending on the fishery and such environmental factors as food availability, temperature, pH of the water and dissolved oxygen concentration. The model can be classified as simulative, deterministic and discrete-continuous. The model was identified and verified with a mandatory biological substantiation of its results by the data on whitefish stock [17, 23]. The model can work in two modes: under standard environmental conditions (without specifying the hydrological situation) and with a scenario of anthropogenic changes. The scenario approach allows you to use lake eutrophication data for predicting changes in the fish population structure when abiotic factors change. Ultimately, a shift in the upper level of the trophic chain will affect the entire biotic community of the lake. Scenarios demonstrate that it is unreasonable to take out the individuals which make the greatest contribution to the biomass growth rate. A depleted population will recover with a rate lower than the anticipated value.

This research confirms the conclusion made in our previous RFBR projects on Caspian sturgeon reproduction efficiency. Even small fluctuations in fish mortality rate during early ontogeny lead to changes in the population size, which is difficult to take into account in fishery forecasts based only on statistical averaging of a data set which may be large but obtained under different conditions of the population existence and unstable hydrological situation caused by hydropower industry needs [30].

The research was supported by RFBR grant 17-07-00125.

References

1. Mikhailov V. V., Perevaryukha A. Yu. Modeling the Dynamics of Nutrient Loading in Assessing the Effectiveness of Replenishment of Biological Resources. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 4, pp. 103–110 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.103
2. Solovyeva T. N., Perevaryukha A. Yu. Dynamic Model of Depletion of Sturgeon Stocks with Complex Intrapopulation Structure. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 4, pp. 60–67 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.60
3. Reshetnikov Yu. S., Tereshchenkov V. G. Quantitative Level of Research in Fish Ecology and Errors Associated with it. *Russian Journal of Ecology*, 2017, vol. 48, no. 3, pp. 233–239.
4. Reshetnikov Yu. S., Sukhanov V. V., Sterligov A. V. *Matematicheskaja model pitomnika molody sigovih rib* [Mathematical Model of Fish Rearing Station for Coregonid Fingerlings]. Moscow, Nauka Publ., 1990. 148 p. (In Russian).
5. Reshetnikov Yu. S., Popova O. A., Sterligova O. P. *Izmenenie v structure populiatsij rib evtrofiruemogo ozera* [Change in the Structure of the Fish Population of the Eutrophicated Lake]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 248 p. (In Russian).
6. Nikolsky G. V. *Teoriya dinamiki stada rib* [Theory of the Dynamics of a Herd of Fish]. Moscow, Pischevaya promyshlennost' Publ., 1974. 447 p. (In Russian).
7. Nelson J. S., Grande N. C., Wilson M. V. H. *Fishes of the World*. John Wiley & Sons, New Jersey, 2016. 707 p.

8. *Eschmeyer*. Available at: www.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatsearch.html (accessed 12 March 2018).
9. **Sidorov U. P., Reshetnikov Yu. S.** *Lososeobraznye ryby vodoemov evropejskogo Severo-Vostoka* [Salmonid Fishes of the Waterbodies of European North-East]. Moscow, Tov-vo nauchnyh izdanij KMK Publ., 2014. 342 p. (In Russian).
10. **Zhuravlev V. B., Lomakin S. L., Reshetnikov Yu. S.** Morphoecological Characteristics of Whitefish, *Coregonus lavaretus* (L.), from Lake Sorulukel, Altai Republic. *Russian Journal of Ecology*, 2014, vol. 45, no. 5, pp. 421–428.
11. **Reshetnikov Yu. S., Bogdanov V. D.** Features of Reproduction of Whitefishes. *J. of Ichthyology*, 2011, vol. 51, no. 6, pp. 432–456.
12. **Winberg G. G.** *Intensivnost obmena i puschevie potrebnosti rib* [Intensity of Metabolism and Nutritional Needs of Fish]. Minsk, Belorusskij gosudarstvennyj universitet Publ., 1966. 251 p. (In Russian).
13. **Macfediene E.** *Ekologija zivotnih* [The Ecology of Animals]. Moscow, Mir Publ., 1965. 374 p. (In Russian).
14. **Brett J. R., Groves T. D. D.** Physiological Energetics. *Fish Physiology*, ed. by W. A. Hoar, Academic Press, New York, 1979, vol. 7, pp. 279–352.
15. **Shatunovsky M. I.** *Ekologicheskie zakonomernosti obmena veschestv i morskikh rib* [Ecological Regularities in the Metabolism of Marine Fish]. Moscow, Nauka Publ., 1960. 283 p. (In Russian).
16. **Klyashtorin L. B.** *Vodnoe dihanie i kislorodnie potrebnosti rib* [Water Breathing and Oxygen Needs of Fish]. Moscow, Lyogkaya i pischevaya promyshlennost' Publ., 1982. 168 p. (In Russian).
17. **Reshetnikov Yu. S., Mikhailov V. V.** Issledovanie pischevix vzaimootnoshenii rib i obespechennostij ih pischei na modeli. In: *Biologija sigovih rib* [Investigation Food Relation and Fish Food Supply in the Model. In: Biology of Whitefish]. Eds. Yu. S. Reshetnikov, O. A. Popova. Moscow, Nauka Publ., 1988. Pp. 63–77. (In Russian).
18. **Sommerwerk N., Wolter C., Tockner K.** Components and Drivers of Change in European Freshwater Fish Faunas. *Journal of Biogeography*, 2017, vol. 44, iss. 8, pp. 1781–1790.
19. **Zajiceka P., Radingerab J., Wolter C.** Disentangling Multiple Pressures on Fish Assemblages in Large Rivers. *Science of The Total Environment*, 2018, vol. 627, pp. 1093–1105.
20. **Liso S., Gjeland R. Ø., Reshetnikov Y. S., and Amundsen P.-A.** A Planktivorous Specialist Turns Rapacious: Piscivory in Invading Vendace *Coregonus albula*. *J. Fish Biol.*, 2011, vol. 78, pp. 332–337.
21. **Tyurin P. V.** Normal Curve Survival and the Temps of Natural Mortality under Influenced of Fishery. *Izvestija GosNIORH* [Revue of GosNIORH], 1972, vol. 71, pp. 71–127 (In Russian).
22. **Rukhtjan R. G., Arakelyan G. L.** Karyology Study of Sevan White Fish. *Trudy Sevanskoj gidrobiologicheskoi stantsii*, 1979, no. 17, pp. 143–152 (In Russian).
23. **Yuzhakova G. G., Nivazyan S. A.** State of Stocks of Whitefish, Acclimatized in Lake Sevan. *Izvestija GosNIORH* [Revue GosNIORH], 1975, vol. 103, pp. 202–206 (In Russian).
24. **Kogan A. V.** About the Daily Ration and the Index of Filling the Intestines of Fish. *Problemi ihtologii*, 1969, vol. 9, no. 5, pp. 956–958 (In Russian).
25. **Owens W. R.** Recovery and Decline of Lake Whitefish in U.S. Waters of Eastern Lake Ontario. *Proc. of a Workshop on the Dynamics of Lake Whitefish (Coregonus Clupeaformis) in the Great Lakes. Great Lakes Fish. Comm. Tech. Rep.*, 2005, pp. 141–155.
26. **Mayr C.** The Influence of Population Density on Growth of Whitefish (*Coregonus lavaretus* L.) in Four Prealpine Lakes. *Limnologica — Ecology and Management of Inland Waters*, 2011, vol. 31, iss. 1, pp. 53–60.
27. **Thomas G.** The Influence of Eutrophication and Population Biomass on Common Whitefish (*Coregonus lavaretus*) Growth — the Lake Constance Example Revisited. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2007, vol. 64, pp. 402–410.
28. **Thomas G., Hartmann J., Eckmann R.** Human-induced Changes in the Reproductive Traits of Lake Constance Common Whitefish (*Coregonus lavaretus*). *Journal of Evolutionary Biology*, 2009, vol. 2, iss. 1, pp. 88–96.
29. **Fickera H., Mazzucco R.** Stocking Strategies for a Pre-alpine Whitefish Population under Temperature Stress. *Ecological Modelling*, 2016, vol. 320, pp. 170–176.
30. **Veshchev P. V., Guteneva G. I.** Efficiency of Natural Reproduction of Sturgeons in the Lower Volga under Current Conditions. *Russian Journal of Ecology*, 2012, vol. 43, no. 2, pp. 142–147.

УДК 639.215.2

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-31-38

Модель динамики популяции рыб с расчетом темпов роста особей и сценариев гидрологической обстановкиМихайлов В. В.^а, доктор техн. наук, профессор, mwwcari@gmail.comПереварюха А. Ю.^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, madelf@pisem.netРешетников Ю. С.^б, доктор биол. наук, профессор, ysreshetnikov@gmail.com^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ^бИнститут проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Ленина пр., 33, Москва, 117071, РФ

Постановка проблемы: популяции ценных промысловых видов рыб развиваются в водных экосистемах по внутренним механизмам эволюционных адаптаций, не всегда соответствующим измененным из-за антропогенного давления условиям среды. Часто фактор эвтрофирования водоема или вселения в экосистему новых видов обостряет конкурентное противоборство популяций. Изменения распространяются эффектом домино и осложняют выработку стратегии рациональной эксплуатации биоресурсов. Виды в неоптимальных антропогенных условиях развития организма уязвимы. **Цель:** разработка модели динамики интродуцированной популяции, реализованной в форме группы сценариев для изменчивой среды. **Результаты:** разработана вычислительная модель популяции для описания сценариев ее адаптации к условиям среды. Сценарии включают темпы размерного развития и питания особей. В модель включен блок расчета рационов питания с учетом факторов гидрологической обстановки: содержания кислорода и активности ионов водорода. Модель способна работать в двух режимах: при стандартных условиях среды (без задания информации о гидрологической обстановке) и при задании условий антропогенных изменений. Подход позволил прогнозировать изменения в структуре популяции при вариативности абиотических факторов. Модель показывает опасность изъятия рыб, обеспечивающих наибольший вклад в темпы прироста биомассы. **Практическая значимость:** модель идентифицирована по данным для популяции интродуцента сига Севана и пригодна для имитационных вычислительных экспериментов, что позволило описать специфические особенности сценариев популяционной динамики при усилении промыслового изъятия, ограниченности питания и изменения гидрологических условий водоема.

Ключевые слова — нелинейные модели популяций, модели роста, расчет энергетического баланса, сценарии промысловой эксплуатации, эвтрофикация.

Цитирование: Mikhailov V. V., Perevaryukha A. Yu., Reshetnikov Yu. S. Model of Fish Population Dynamics with Calculation of Individual Growth Rate and Hydrological Situation Scenarios // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 31–38. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-31-38

Citation: Mikhailov V. V., Perevaryukha A. Yu., Reshetnikov Yu. S. Model of Fish Population Dynamics with Calculation of Individual Growth Rate and Hydrological Situation Scenarios. *Informatsionno-upravliaiushchiesistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 31–38. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-31-38

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Научные базы данных, включая SCOPUS и Web of Science, обрабатывают данные автоматически. 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, есть возможность провести регистрацию на 12-ти языках, включая русский (чтобы выбрать язык, кликните на зеленое поле сверху справа на стартовой странице): <https://orcid.org>

MATHEMATICAL MODEL OF PATTERN SELECTION FOR COMPLEX MULTICHANNEL DATA IN EEG PROCESSING

A. E. Runnova^a, PhD, Phys.-Math., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-2102-164X, anefila@gmail.com
^aYuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politechnicheskaya St., 410054, Saratov, Russian Federation

Introduction: Research on real systems relies now on processing big experimental data volumes. Recognition of short oscillatory patterns corresponding to different states of complex non-stationary systems requires new processing methods. **Purpose:** Design of a mathematical model for objective and expertise-independent recognition of patterns corresponding to various states of real systems. **Results:** We propose a new method of modeling short oscillatory events (patterns) for complex non-stationary multichannel data. A mathematical realization of the model is described in terms of continuous wavelet transformation. Human brain activity states can be recognized automatically for the analysis of long EEG registrations. The proposed mathematical model application is demonstrated by the example of processing human EEG signals non-invasively recorded in the occipital scalp region. We demonstrate successful recognition of various human states based on the analysis of EEG from the visual analyzer area. We discuss the analysis of various patterns in experimental data corresponding to the state of active visual recognition of objects. **Practical relevance:** This modelling method can be recommended for neurophysiological data processing.

Keywords – Mathematical Modeling, Non-Stationary Data, Continuous Wavelet Transformation, Electroencephalography, Mathematical EEG Processing.

Citation: Runnova A. E. Mathematical Model of Pattern Selection for Complex Multichannel Data in EEG Processing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 39–44. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-39-44

Introduction

The modern development of natural sciences and the practical application of their results poses the task of investigating complex objects, described, in general, by a large number of recorded noisy signals coming through many channels. The study of such signals is of considerable interest, in particular, for neurophysiology, and some other scientific fields [1–6]. At the same time, special attention is drawn to the problems of selection of short time intervals (“patterns”) from the structure of these signals. A large number of publications are devoted to the problems of selection and analysis of patterns [1–3, 5]. Today continuous wavelet analysis is one of the tools recognized for such processing. However, most modern techniques require expert evaluations at different stages of processing real signals, which makes this processing more difficult and expensive and it’s capable of introducing subjective distortions in the analyze results.

Pattern Selection and Classification Model

Let the signal $\{X(t)\}$ consist of n components: $\{X(t)\} = \{x_1(t), \dots, x_i(t), \dots, x_n(t)\}$. Each component $x_i(t)$ of the signal $\{X(t)\}$ is the recording of a strongly non-stationary process of a real system in one of the n channels.

For mathematical modeling, we introduce the following assumption. Let each one-dimensional signal $x_i(t)$, registered in channel i of the multivariate signal $\{X(t)\}$ in the time period $[T_s, T_{s+\Delta t}]$, be a linear superposition written in the following form:

$$x_i(t) = \sum_{j=0}^{\infty} a_i^j y_i^j(t) + \xi(t) + \eta(t), \quad (1)$$

where $y_i^j(t)$ — signal component having a closing to the stationary frequency $f_{y_i^j}$ for time registration t in a certain interval $t_f^j, t_f^j \leq \Delta t$ for $\forall j, a_i^j$ is the scale factor of the level of the presence of the component $y_i^j(t)$ in the signal $x_i(t)$. Further, let us assume that the number of components $y_i^j(t)$ significant for the processing and analysis problems is finite and takes the value of n_p , and the remainder terms of the sum

$\sum_{j=n_p}^{\infty} a_i^j y_i^j(t)$ can be referred to regular disturbances $\xi^y(t)$. Then expression (1) takes the form:

$$x_i(t) = \sum_{j=0}^{n_p} a_i^j y_i^j(t) + \xi(t) + \xi^y(t) + \eta(t). \quad (2)$$

Performing continuous wavelet transform (CWT) for each one-dimensional signal $x_i(t)$, we obtain:

$$W_i(f, t_0) = \sum_{j=0}^{n_p} a_i^j W_i^j(f_{y^j}, t_0) + W_{\xi}(f, t_0) + W_{\xi^y}(f, t_0) + W_{\eta}(f, t_0). \quad (3)$$

The CWT for an arbitrary signal $z(t)$ in the general form is defined as follows [7]:

$$W_i(s, t_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} z(t) \psi^* \left(\frac{t - t_0}{s} \right) dt, \quad (4)$$

where $\psi_{s,t_0}(t)$ is the maternal wavelet, complex function; s is the time scale defining the width of the wavelet; the symbol “*” denotes complex conjugation. Note that the time scales s of the CWT allow a transition to the classical frequencies f of the Fourier spectrum, therefore, for convenience and simplicity of the interpretation of the results, we will consider the results in the traditional plane (f, t_0) .

In considering expression (3), it is easy to see that each term of the form $W_i^j(f_{y^j}, t_0)$ is close to the stationary value f_{y^j} of the skeleton sc of the CWT at time intervals t_i^j , and, in this case, expression (3) takes the form:

$$W_i(f, t_0) = \sum_{j=0}^{n_p} a_i^j f_{y^j} + W_{\xi}(f, t_0) + W_{\xi^y}(f, t_0) + W_{\eta}(f, t_0). \quad (5)$$

Thus, for selection of the desired patterns necessary for the study of experimental signals, it is sufficient to introduce the skeleton characteristics of the CWP of the original signals in the manner described below. For the initial one-dimensional signal $x_i(t)$ for each instant t_0 , we introduce the instantaneous spectral slice $E_{t_0}^i(f)$ of the CWT $W_i^j(f, t_0)$:

$$E_{t_0}^i(f) = |W_i(f, t_0)|^2. \quad (6)$$

Over the whole significant frequency range f , $f \in (F_{\min}; F_{\max})$ Hz, for each instant t_0 , we define the n_p extrema $\max_p(E_{t_0}^i)$, which are the local maxima of the dependence $E_{t_0}^i(f)$ (6) which sc_i^p , where $p = 1, 2, \dots, n_p$ corresponds to the number of the extremum in the order of their decrease; i — as well as the registration channel number in the multivariate signal $\{X(t)\}$. Thus, the skeleton of the wavelet transform takes the form:

$$\forall f_{\Delta} \in \Delta f_p, E_{t_0}^i(f_p) \geq E_{t_0}^i(f_{\Delta}) \Rightarrow s. \quad (7)$$

For each channel register with a sampling frequency time exceeding 250 Hz, the multidimensional signal $\{X(t)\}$ described above can be calculat-

ed origin minimum quantity $n_p = 5$ skeletons sc_i^p , further calculation is not always possible, leading to the situation.

$$sc_i^{n_p+1} \approx sc_i^{n_p+2} \approx \dots \approx sc_i^{n_p+\infty} \approx const.$$

In practice, for the signals $\{X(t)\}$ of the experimental nature, it is often sufficient for an investigation to analyze $n_p = 2...3$ skeletons sc_i^p .

So, based on the model (5) for each channel $x_i(t)$ of the multivariate signal $\{X(t)\}$, we calculate the discrete set of skeletons $\{sc\}$, where $p = 1...n_p$ and $i = 1...n$. At each instant t we introduce the Heaviside function of the following form:

$$H_i^P(t) = \begin{cases} 1, & f_1^p < sc_i^p < f_2^p \\ 0, & sc_i^p \notin (f_1^p, f_2^p) \end{cases}. \quad (8)$$

Here, the frequencies f_1^p, f_2^p can be chosen both on the basis of exclusively a priori representations of the desired pattern, i.e., the component $y_i^j(t)$ close to stationarity has the frequency f_p and $f_{1,2}^p = f^p \mp \Delta f$, so and by means of automated search over the entire frequency range $(F_{\min}; F_{\max})$ Hz. Next, we take into account a certain stationarity of the frequencies f_{y^j} of the desired patterns in the experimental signal $x_i(t)$, introducing the time analysis of the function $H_i^P(t)$ (8):

$$H_i^P |_{\Delta t} = \int_{\Delta t} H_i^P(t) dt, \quad (9)$$

where the selection of the parameter Δt is carried out by means of a sliding window with respect to the time duration of the recorded signal $x_i(t)$ with the following condition:

$$\frac{1}{\Delta t} H_i^P \geq 0.9. \quad (10)$$

For a multidimensional signal $\{X(t)\}$, one can proceed from an analysis of the multidimensional function $H^P |_{\Delta t} = \{H_1^P |_{\Delta t}, \dots, H_i^P |_{\Delta t}, \dots, H_n^P |_{\Delta t}\}$ to a one-dimensional resulting function of the following form:

$$H^P |_{\Delta t} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n H_i^P |_{\Delta t}, \quad (11)$$

where n is the dimension of the original multivariate signal $\{X(t)\}$ (n — the number of registered channels). This integral function $H^P |_{\Delta t}$ is capable of taking a maximum value as 1 and a minimum value 0.

We analyze the dynamics of function $H_{sc}(t)$ for the objective separation of experimental signal pat-

terns. Further classification of patterns is based on the analysis of frequencies f_p (8), time intervals Δt (9) and their possible dynamics over time of the total recording time T of the signal $\{X(t)\}$. The mathematical modeling carried out is designed to fill the lack of automated techniques that would be capable of identifying and classifying patterns without involving experts in processing multicomponent multidimensional experimental $\{X(t)\}$ signals.

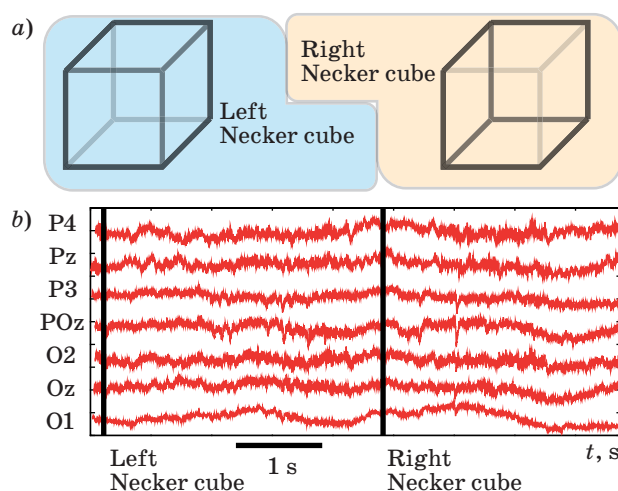
Practical Relevance

We illustrate the practical using of the developed model on the neurophysiological data — the human electroencephalogram. The electroencephalogram (EEG), which is the sum of electrical currents that are generated by a small group of neurons and recorded using an electrode, is one of the most widespread brain signals that are used in research [8–11]. Since the neural network of the brain is a very complicated oscillatory system, the EEG signal also has a very complex spectral structure with a few frequency ranges (delta, alpha, beta, gamma, etc.), different characteristic rhythms, and oscillatory patterns that attract interest of researchers both during the study of different pathologies (e. g., epilepsy) and during analysis of different functional tests and cognitive processes [3, 6, 9–11].

Experimental Data

In our physiological experiment with EEG activity registration we used a set of images based on a well-known bistable object, the Necker cube [12] as a visual stimulus. Ambiguous (bistable) stimuli are a very useful tool for studying the decision-making process [13–16]. This is a cube Necker with transparent faces and visible ribs; an observer without any perception abnormalities treats the Necker cube as a 3D-object thanks to the specific position of the cube ribs. Bistability in perception consists in the interpretation of this 3D-object as to be oriented in two different ways, in particular, if the different ribs of the Necker cube are drawn with different intensity. In our experimental works we have used the Necker cube images with varying parameter I to be the brightness of the cube wires converging in the right upper inner corner (Fig. 1, *a*). The brightness of the wires converging in the left lower inner corner is defined as $(1 - I)$.

The experimental studies were performed in accordance with the ethical standards of the World Medical Association [17]. Six healthy subjects from a group of unpaid male volunteers, between the ages of 20 and 25 with a normal visual acuity participated in the experiments. The purpose of this



■ Fig. 1. Examples of Necker cube images (*a*) and typical segments of the EEG recording from O1, Oz, O2, POz P3, Pz, P4 channels (*b*). Vertical lines show the time moments of presentation of various Necker cubes images to the volunteer

experiment is the study of multichannel EEG data registration in the unconscious decision on ambiguous image interpretation. We demonstrated the Necker cube images with different wireframe contrasts for a short time, each lasting between 1.0 and 1.5 s, interrupted by a background abstract picture for 5.0–5.5 s. The using of the background abstract images allows the neutralization of possible negative secondary effect of the previous Necker cube image. The whole experiment lasted about 40 min for each patient. During the experiment we exhibited the pictures of the Necker cube randomly, all for about 150 times, and recorded brain activity with multi-channel EEG. As a tool for EEG recording we used the electroencephalograph–recorder Encephalan-EEGR-19/26 (Russia) with multiple EEG channels and the two-button input device. To study EEGs the monopolar registration method and the classical ten-twenty electrode system were used [18].

Figure 1, *b* shows an example of a typical EEG data set from EEG registration channels of occipital area, corresponded the visual analyzer area. It seems occipital region associated with cognitive processes of perception of complex spatial objects, which include the Necker cube.

Processing of Experimental Data

In our experimental studies we recorded EEG data during the sufficiently regular ambiguous perception of complex objects. Between the two moments of the perception of ambiguous object associated with a spatial imagination Necker cube, a pause is enough

to restore the background activity is not associated with the cognitive process of spatial modeling. At the moment, we are not interested in causes, for example, the phenomenon of cognitive noise, forcing Necker cube with intensity I perceived as the “left” and “right” [11, 19–21]. However, we directly focused on the processes that occur in the perception and the internal filling volume of a two-dimensional object Necker ambiguous image.

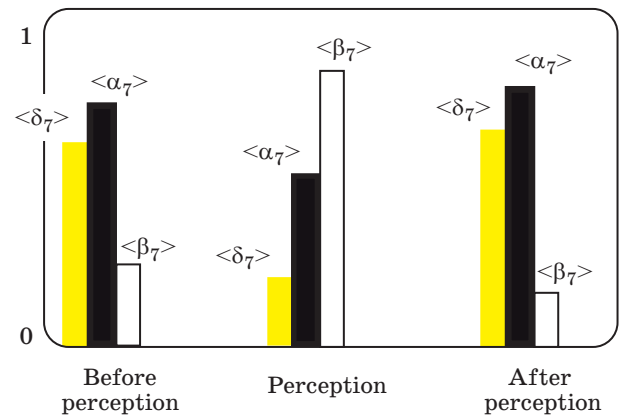
We consider the main characteristic of the frequency range of $[F_{\min}; F_{\max}]$: $[F_{\min}; F_{\max}]_{\alpha} = [8-12]$ Hz for alpha-rhythms, $[F_{\min}; F_{\max}]_{\beta} = [30-40]$ Hz for beta-rhythms, $[F_{\min}; F_{\max}]_{\Delta} = [4-7]$ Hz for delta/theta-rhythms [22].

Next, for each presentation of the cube, we calculate the function (11) for alpha-, beta- and delta/theta-activity on the EEG data in time intervals corresponding to different stages of the visual stimulus perception. We distinguish three stages in this experimental data: (i) the state before the presentation of the cube, the passive waiting, (ii) the state when the cube is presented, the active recognition, (iii) the rest state after the recognition, passive state. To determine the time duration of these stages we used the following design of preliminary experiments. After each presentation of the cube, the person had to tell the character of his recognition of this bistable object (the left or right cube of Necker) by pressing the remote control. Preliminary studies were conducted on 15 volunteers and showed that the duration of the active stage is about 0.6 s. Function $H^P|_{\Delta t}$ (11) was calculated for a given time interval $\Delta t = 0.6$.

Results

The result of the selection three types of EEG patterns shown in Fig. 2 for different states of brain visual analyzer. For the Fig. 2 first and last states “before/after perception of ambiguous image (Necker cube)” are characterized by the predominance of low frequencies (alpha- and delta-rhythms). To obtain this statistic, the calculated function $H^P|_{\Delta t}$ (11) was averaged over all experimental events (about 150).

Active state characterized a pronounced high-frequency activity is observed. It is clear that visual analysis is not enough, and we propose a method for an estimation of level and nature of beta-activity for occipital region in the human brain. For this, well traced throughout the duration of the processes associated with the recognition of ambiguous images for the majority of volunteers. Note that one volunteer with displacement of the pattern frequency to 25–32 Hz was found in the processing data. However, it is clear that this fact is easily detected and can be corrected adaptation algorithm. Now we are limiting our processing of multi-channel EEG



■ Fig. 2. Averaged criteria $\langle \delta_7 \rangle$, $\langle \alpha_7 \rangle$, $\langle \beta_7 \rangle$ during different phases of bistable stimulus perception

data exceptionally occipital area of a brain electrical activity registration, in particular O1, Oz, O2, POz, P3, Pz, P4 channels of the classical ten-twenty electrode system [12, 23–25].

According to modern concepts of beta and alpha, EEG activity in the occipital region of the scalp is related to the processes of human visual analyzers [24–27]. With alpha activity, the processes of human relaxation are traditionally associated, occurring either with closed eyes, or in a calm environment without pronounced external stimuli. Beta-processes are associated, most likely, with the activity of the visual analyzer when recognizing complex objects and/or with processes of focusing on visual objects.

In Fig. 2, the recognition of the stage of human recognition of a visual bistable object (stage “perception”), associated with a fall in the level of alpha activity and an increase in beta. At the same time, the delta activity sharply disappears in the active stage and remains at a single level for the passive stages. However, the stage after recognition shows a somewhat higher level than in the process of waiting for the next visual stimulus.

All the results obtained, as shown, lie in the mainstream of modern science, allowing demonstration of the activation of visual analyzer in the process of periodic recognition of a complex visual object. At the same time, it was possible to reveal a nontrivial effect of increasing the delta/theta-activity at the end of stimulus recognition, than with its expectation.

Conclusion

We propose a new method of short episodes of activity (patterns) modeling for complex nonstationary multichannel data. A mathematical realization of the model is described in the terms of a continu-

ous wavelet transform. The application of the proposed mathematical model is demonstrated by the example of the processing of human EEG signals non-invasive recorded in the scalp occipital region.

We demonstrate the success of recognition of various human states based on analysis of the EEG from visual analyzer area. The results of these studies appear promising for further study of the dynamics and the activity of the cerebral cortex in

cognitive processes of various kinds. The technique is based on the calculation of the wavelet skeleton, it is universal for the study of various processes. Furthermore, this approach is highly customizable to individual features volunteers that allows the theoretical possibility of that using in the biofeedback systems.

This work has been supported by Russian Science Foundation (grant No. 16-12-10100).

References

1. Maksimenko V. A., Lüttjohann Annika, Makarov V. V., Goremyko M. V., Koronovskii A. A., Nedaivozov V., Runnova A. E., van Luijtelaar 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, 012316. doi:10.1103/PhysRevE.96.012316
2. Hramov A. E., Koronovskii A. A., Ponomarenko V. I., and Prokhorov M. D. Detecting Synchronization of Self-sustained Oscillators by External Driving with Varying Frequency. *Phys. Rev. E*, 2006, vol. 73, iss. 2, 026208.
3. Sitnikova E., Hramov A. E., Grubov V., and Koronovsky A. A. Time-frequency Characteristics and Dynamics of Sleep Spindles in WAG/Rij Rats with Absence Epilepsy. *Brain Research*, 2014, vol. 1543, pp. 290–299.
4. 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.
5. Hramov A. E., Kharchenko A. A., Makarov V. V., Khramova M. V., Koronovskii A. A., Pavlov A. N., and Dana S. K. Analysis of the Characteristics of the Synchronous Clusters in the Adaptive Kuramoto Network and Neural Network of the Epileptic Brain. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 9917, 991725.
6. 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.
7. Hramov A. E., Koronovskii A. A., Makarov V. A., Pavlov A. N., and Sitnikova E. *Wavelets in Neuroscience*. Springer Series in Synergetics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015. 318 p.
8. Nunez P. L. and Srinivasan R. *Electric Fields of the Brain: the Neurophysics of EEG*. Oxford Univ. Press, 2006.
9. Ebersole J. S., Husain A. M., and Nordli D. R. *Current Practice of Clinical Electroencephalography*. Wolters Kluwer, 2014. 661 p.
10. Luders H. and Noachtar S. *Atlas and Classification of Electroencephalography*. W. B. Saunders, Philadelphia, 2000.
11. Blake R., Logothetis N. K. Visual Competition. *Nature Reviews Neuroscience*, 2002, no. 3(1), pp. 13–21.
12. Necker L. A. Observations on Some Remarkable Phenomena Seen in Switzerland; and an Optical Phenomenon which Occurs on Viewing of a Crystal or Geometrical Solid. *Philos. Mag.*, 1832, no. 3, pp. 329–343.
13. Schwartz J.-L., Grimault N., Hupe J.-M., Moore B. C. J., Pressnitzer D. Multistability in Perception: Binding Sensory Modalities, an Overview. *Philos. Trans. R Soc. B*, 2012, vol. 367, pp. 896–905.
14. Cao R., Braun J., Mattia M. Stochastic Accumulation by Cortical Columns May Explain the Scalar Property of Multistable Perception. *Phys. Rev. Lett.*, 2014, vol. 113, 098103-1–5.
15. Leopold D. A., Logothetis N. K. Multistable Phenomena: Changing Views in Perception. *Trends Cognit. Sci.*, 1999, no. 3(7), pp. 254–264.
16. Zeki S. The Neurology of Ambiguity. *Conscious. Cogn.*, 2004, vol. 13(1), pp. 173–196.
17. World Medical Association (2000) Declaration of Helsinki: Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects. *The Journal of the American Medical Association*, 2000, vol. 284, no. 23, pp. 3043–3045.
18. Jasper H. H. The Ten-twenty Electrode System of the International Federation. *Electroencephalography and Clinical Neurophysiology*, 1958, no. 10, pp. 371–375.
19. Sterzer P., Kleinschmidt A., Rees G. The Neural bases of Multistable Perception. *Trends in Cognitive Sciences*, 2009, no. 13, pp. 310–318.
20. Maksimenko V. A., Runnova A. E., Zhuravlev M. O., Makarov V. V., Nedayvozov V. O., Grubov V. V., Pchelintseva S. V., Hramov A. E., Pisarchik A. N. Visual Perception Affected by Motivation and Alertness Controlled by a Noninvasive Brain-Computer Interface. *PLOS ONE*, 2017, vol. 12, 12 Article 0188700.
21. Hramov A. E., Maksimenko V. A., Pchelintseva S. V., Runnova A. E., Grubov V. V., Musatov V. Yu., Zhuravlev M. O., Koronovskii A. A., Pisarchik A. N. Classifying the Perceptual Interpretations of a Bistable Image using EEG and Artificial Neural Networks.

Frontiers in Neuroscience, 2017, vol. 11, no. 674, pp. 1–18.

22. Klimesch W. Alpha-band Oscillations, Attention, and Controlled Access to Stored Information. *Trends Cogn Sci.*, 2012, vol. 16(12), pp. 606–617.
23. Sacchet M. D., et al. Attention Drives Synchronization of Alpha and Beta Rhythms between Right Inferior Frontal and Primary Sensory Neocortex. *J Neurosci*, 2015, vol. 35(5), pp. 2074–2082.
24. Pressnitzer D., Hupe J. M. Temporal Dynamics of Auditory and Visual Bistability Reveal Common

Principles of Perceptual Organization. *Curr. Biol.*, 2006, vol. 16, pp. 1351–1357.

25. Ikkai A., Dandekar S., Curtis C. E. Lateralization in Alpha-band Oscillations Predicts the Locus and Spatial Distribution of Attention. *PLOS ONE*, 2016, vol. 11(5), p. e0154796.
26. Gola M., et al. EEG Beta Band Activity is Related to Attention and Attentional Deficits in the Visual Performance of Elderly Subjects. *International Journal of Psychophysiology*, 2013, vol. 89(3), pp. 334–341.

УДК 612.8 + 57.089

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-39-44

Математическая модель выделения паттернов сложных многоканальных сигналов в применении к обработке электроэнцефалографических данных

Руннова А. Е.^а, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-2102-164X, anefila@gmail.com

^аСаратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Политехническая ул., 77, Саратов, 410054, РФ

Введение: в настоящее время исследование реальных систем опирается на обработку больших объемов экспериментальных данных. Распознавание коротких колебательных паттернов, соответствующих различным состояниям сложных нестационарных систем, требует новых методов обработки. **Цель:** разработка математической модели для объективного и независимого от экспертных оценок распознавания паттернов, соответствующих различным состояниям реальных систем. **Результаты:** предложен новый метод моделирования коротких колебательных событий (паттернов) для сложных нестационарных многоканальных данных. Описано применение модели на основе подхода непрерывного вейвлет-преобразования. В автоматическом режиме может осуществляться поиск искомых состояний активности мозга человека для анализа длительных ЭЭГ-регистраций. Применение представленной математической модели демонстрируется на примере обработки человеческих ЭЭГ-сигналов, регистрируемых неинвазивным методом в затылочной зоне скальпа. Показано успешное распознавание различных состояний человека, основанное на анализе электроэнцефалографических данных проекции зрительного анализатора. Описан анализ различных паттернов в экспериментальных данных, соответствующих активному состоянию зрительного распознавания объектов. **Практическое применение:** использование описанной математической модели может быть рекомендовано для обработки нейрофизиологических данных.

Ключевые слова — математическое моделирование, нестационарные сигналы, непрерывное вейвлет-преобразование, электроэнцефалография, математическая обработка ЭЭГ.

Цитирование: Runnova A. E. Mathematical Model of Pattern Selection for Complex Multichannel Data in EEG Processing // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 39–44. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-39-44

Citation: Runnova A. E. Mathematical Model of Pattern Selection for Complex Multichannel Data in EEG Processing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 39–44. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-39-44

МОДЕЛЬ И МЕТОД ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА ВКЛАДА УЧАСТНИКА СИСТЕМЫ СОВМЕСТНОЙ РАЗМЕТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

А. В. Пономарев^а, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ponomarev@iias.spb.su

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

Постановка проблемы: масштабные человеко-машинные системы, посредством сети Интернет вовлекающие в процесс обработки информации сообщества людей, неоднородные по навыкам и уровню мотивации участников, в последнее время находят применение в широком классе приложений. В таких системах актуальной является проблема оценки ожидаемого качества вклада участника (такая оценка может использоваться, например, для отсеивания некомпетентных или небрежных участников и поощрения наиболее аккуратных). **Цель:** разработка метода оценки ожидаемого качества вклада участника системы совместной разметки, использующего только ненадежные и неполные данные, получаемые от других участников системы (без знания истинных результатов). **Результаты:** предложена математическая модель системы совместной разметки изображений (включающая модель участника), а также метод оценки ожидаемого качества вклада участника такой системы. Предложенный метод основывается на сопоставлении результатов разметки различных участников на одинаковых изображениях и является модификацией метода попарных сравнений, в которой вместо отношения предпочтения используется характеристика доминирования, определяемая специальным образом (показывающая, какой из участников дает более полные ответы). Оценки ожидаемого качества вклада участников предложено получать как положительный собственный вектор матрицы со значениями попарных характеристик доминирования. В ходе имитационного моделирования процесса совместной разметки показано, что предлагаемый метод действительно позволяет оценить качество вклада участника без использования эталонных результатов (при условии соответствия поведения участника предлагаемой модели). **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке систем, основанных на использовании скоординированных усилий участников сообщества (и, в первую очередь, систем совместной разметки).

Ключевые слова — краудсорсинг, крауд-вычисления, разметка изображений, обработка изображений, коллективный интеллект.

Цитирование: Пономарев А. В. Модель и метод оценки качества вклада участника системы совместной разметки изображений // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 45–51. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-45-51

Citation: Ponomarev A. V. Model and Method for Contributor's Quality Assessment in Community Image Tagging Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 45–51 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-45-51

Введение

Технология краудсорсинга (или крауд-вычислений) в настоящее время широко используется для решения самых разных задач (см., например, [1–5]). В частности, одним из достаточно распространенных применений этой технологии является обработка изображений — интерпретация содержимого изображения, снабжение его описанием и т. п. Это требуется как при подготовке эталонных наборов данных для машинного обучения [6, 7], так и непосредственно в информационно-поисковых системах, поскольку позволяет дополнить ресурсоемкие и сложные алгоритмы обработки изображений алгоритмами текстовой обработки или алгоритмами обработки (частично) структурированной информации [8–10].

Вместе с тем привлечение человека к задачам обработки информации в рамках крауд-вычислений связано с набором принципиальных ограничений [11]: низкой скоростью обработки

информации, необходимостью мотивации, возможностью ошибок или даже целенаправленного искажения информации.

В статье предлагается математическая модель поведения участника системы совместной разметки объектов, т. е. системы, участники которой на основе анализа объектов снабжают их метками («тегами»), принадлежащими некоторому заранее известному множеству. Предлагается также метод оценки ожидаемого качества вклада участника (под вкладом в данном случае понимаются результаты разметки, полученные от участника). Предлагаемые в данной статье метод и модель демонстрируются на примере Bibtaggers — системы коллективной разметки фотографий массовых спортивных мероприятий на базе немотарного стимулирования, описанной в работе [12]. Система реализована в виде веб-сервиса, куда загружаются ссылки на альбомы с фотографиями мероприятия, опубликованными на каких-либо внешних сервисах размещения фотографий (Яндекс.Фотки, ВКонтакте). Участники меропри-

ятия получают возможность осуществлять поиск своих фотографий по номеру после того, как «разметят» несколько предложенных системой изображений (т. е. укажут, какие на них присутствуют номера участников). Мотивация к использованию такой системы связана в первую очередь с облегчением поиска фотографий. Существуют также попытки применить технологию компьютерного зрения и OCR для решения этой задачи [13, 14], однако в силу того, что нагрудные номера являются гибкими (следовательно, могут быть деформированы) и на фотографии могут быть частично закрыты, полностью автоматические решения зачастую не обеспечивают желаемого качества распознавания. Применение же системы совместной разметки Bibtaggers показало, что, как правило, к разметке удается привлечь достаточно участников, а качество получаемой разметки (измеряемое посредством точности, полноты и F-меры) оказывается выше, чем при машинной разметке (см. сопоставление [12, 15] и [13]).

Несмотря на то, что в целом качество разметки с помощью краудсорсинга оказывается удовлетворительным (и выше, чем в известных полностью автоматических решениях), качество результатов, получаемых от отдельных участников, конечно, значительно варьируется. Это связано с тем, что естественным стимулом участника в ходе разметки является минимизация прикладываемых усилий, что неизбежно влияет на качество результата. Поэтому актуальной является задача оценки ожидаемого качества результата, получаемого от участника. Эта информация в дальнейшем может использоваться как для блокировки участников, осуществляющих низкокачественную разметку, так и для поощрения добросовестных участников (или обращения к ним для разметки сложных изображений, разрешения противоречий). Задача оценки ожидаемого качества вклада участника осложняется тем, что истинные ответы в ходе разметки неизвестны, поэтому оценку необходимо проводить на основе, в общем случае, неполных и недостоверных данных, получаемых от участников.

Краткий обзор методов обеспечения качества результатов в системах крауд-вычислений

В связи с уже упомянутыми выше особенностями крауд-вычислений проблема обеспечения качества результатов является одной из наиболее острых, привлекающей внимание исследователей в этой области.

В статье [16] на основе проведенного обзора литературы выделено шесть ключевых направ-

лений, по которым могут быть сгруппированы методы обеспечения качества:

1) методы согласования (consensus) получили широкое распространение в тех вариантах организации краудсорсинга, где *недоступна априорная информация об исполнителях* и о заданиях. Общий принцип их работы заключается в том, что каждое задание выполняется несколькими участниками системы, затем полученные результаты обобщаются (согласуются) для получения итогового результата [17–20];

2) методы проектирования потока работ можно рассматривать как своего рода развитие методов согласования, в частности, позволяющее рассматривать системы с разнородными заданиями и динамически формируемым потоком работ [21, 22];

3) методы централизованного назначения работ предполагают, что для каждого участника известна ожидаемая эффективность (качество результатов, время выполнения), и строят распределение заданий таким образом, чтобы максимизировать общую эффективность выполнения набора заданий [23];

4) теоретико-игровые методы позволяют оценить ту или иную схему функционирования системы крауд-вычислений исходя из представления о поведении участника как рационального агента, стремящегося к максимизации собственной пользы [24];

5) методы, основанные на учете свойств заданий, предлагают использовать свойства заданий или их компьютерной обработки для повышения итогового качества результатов крауд-вычислений [25];

6) методы, основанные на анализе действий пользователя и воздействии на него, используют мониторинг действий пользователя и разнообразные психофизические индикаторы для выявления недобросовестного поведения [26].

Предлагаемый в данной статье метод относится к методам согласования в том смысле, что он не использует дополнительную информацию, кроме меток, получаемых от различных участников, что обеспечивает универсальность данного метода. Вместе с тем особенностью сервиса Bibtaggers (и многих других систем, основанных на немонетарном стимулировании), препятствующей применению существующих методов согласования, является необходимость значительного дублирования выполняемых заданий. То есть чтобы распространенные алгоритмы согласования (DS [19], GLAD [20] и др.) давали надежные оценки качества, необходимо, чтобы каждое задание было выполнено как минимум пятью участниками (обычно рекомендуется более десяти). Это оказывается возможным при разметке с помощью платформ краудсорсинга, поддерживающих монетарное стимулирование (Amazon Mechanical Turk, Яндекс.

Толока), потому что финансовое вознаграждение привлекает большое количество участников, которые могут посвящать разметке значительное время. В то же время практические эксперименты с разметкой на базе немонетарного стимулирования (и, в частности, с веб-сервисом Bibtaggers) показали [15], что с учетом типичной динамики заинтересованности участников каждое задание может быть выполнено только 2–3 раза.

Модель процесса совместной разметки изображений

Для оценки метода определения ожидаемого качества вклада участника была предложена формальная модель процесса совместной разметки изображений. Параметры модели были оценены в результате анализа данных, полученных при разметке изображений с помощью системы Bibtaggers.

Параметры модели. Пусть набор данных для разметки состоит из N изображений. На изображениях могут присутствовать целевые объекты (в случае системы Bibtaggers — нагрудные номера спортсменов). Задача каждого участника разметки заключается в том, чтобы снабдить изображение метками, соответствующими присутствующим на нем целевым объектам. Пусть b_i — множество целевых объектов на изображении i , а n_i — их количество ($n_i = |b_i|$).

Идентификация целевого объекта может требовать различных усилий, в то время как участники разметки обладают различным стремлением прикладывать усилия. Опишем это формально следующим образом. Пусть участник j характеризуется *аккуратностью* $a_j \in [0, 1]$. Чем выше значение a_j , тем большие усилия склонен прилагать участник и тем больше целевых объектов он способен обнаружить на изображении. Пусть также $e_{i,k}^{req} \in [0, 1]$ — уровень *аккуратности*, необходимый для идентификации объекта k на изображении i . Таким образом, в ходе исследования изображения i участник j получает множество меток

$$l_{i,j} = \{k \mid k \in b_i \wedge a_j \geq e_{i,k}^{req}\}.$$

Параметры b_i , n_i , a_j и $e_{i,k}^{req}$ неизвестны. Единственные данные, оказывающиеся доступными, — это множества меток $l_{i,j}$. На основе анализа множества меток можно пытаться получить оценки неизвестных параметров (это, в частности, делают алгоритмы согласования, основанные на EM-алгоритме), однако, как уже отмечалось, для этого необходимо иметь значительную избыточность при обработке участниками изображений. Целью данной работы является создание метода анализа меток $l_{i,j}$, позволяюще-

го получать оценки h_i , которые были бы сильно связаны (в смысле корреляции, взаимной информации или еще как-то) с аккуратностью a_j . Тогда на основе сопоставления оценок h_i можно будет принимать решения о том, как соотносятся усилия, прикладываемые различными участниками.

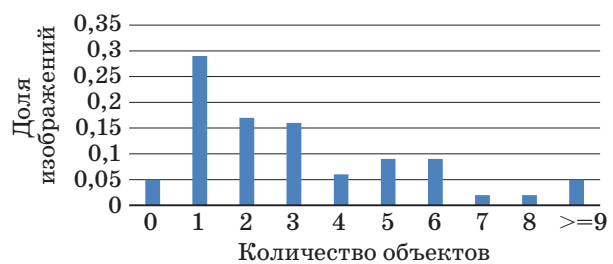
Генерация наборов данных для экспериментов. Поскольку проведение непосредственных экспериментов с системой совместной разметки оказывается затруднено, экспериментальное исследование предлагаемого метода оценки качества вклада участников производилось с помощью имитационной модели процесса разметки, на вход которой подавались сгенерированные наборы данных о размечаемых объектах.

При генерации наборов данных были использованы описанные выше параметры. Значения параметров выбирались на основе анализа истории работы сервиса (в том числе полностью размеченного вручную набора данных, описанного в работе [12]).

Количество изображений с одного мероприятия (N), размечаемых с помощью сервиса, обычно варьируется в диапазоне 1000 ÷ 7000.

Количество целевых объектов на одном изображении n_i в значительной степени зависит от стиля работы фотографа; на основе анализа исторических данных сформировано эмпирическое распределение (рис. 1), которое и было использовано при генерации наборов.

Параметры a_j и $e_{i,k}^{req}$ оказываются связанными достаточно тесным образом: одни и те же результаты можно получить, подвергая их одинаковым преобразованиям с помощью любой монотонной функции. Поэтому было принято решение при генерации наборов для выбора значения $e_{i,k}^{req}$ использовать непрерывное равномерное распределение $U(0, 1)$, а для выбора значения a_j — треугольное распределение с модой a^m , найденной таким образом, чтобы итоговое качество разметки, полученной при данном наборе значений параметров (F-мера множества полученных меток



■ **Рис. 1.** Распределение количества целевых объектов на изображении

■ **Fig. 1.** Distribution of the number of target objects on an image

по отношению к множеству эталонных), было сопоставимо с качеством, получаемым на практике (см. [12, 15]).

Метод оценки ожидаемого качества результатов, получаемых от участников

Предлагаемый метод основывается на сопоставлении результатов различных участников на одинаковых изображениях и является модификацией метода попарных сравнений, в которой вместо отношения предпочтения используется характеристика доминирования, определяемая специальным образом, а именно: эта характеристика призвана показывать, какой из участников предоставляет более полные ответы.

Для пары участников u и v характеристика доминирования является числом $d_{uv} \in (0, \infty)$, которое принимает значение больше 1, если есть основания считать, что участник u дает более полные ответы, и меньше 1, если есть основания считать, что участник v дает более полные ответы, причем $d_{uv} d_{vu} = 1$.

Эксперименты проводились с двумя способами вычисления характеристики доминирования.

Первый способ (d_{uv}^1). Пусть t_{uv} — множество изображений, размеченных и участником u , и участником v . Будем говорить, что разметка изображения $t \in t_{uv}$ участником u доминирует над разметкой этого изображения участником v тогда и только тогда, когда множество $l_{v,t}$ является строгим подмножеством $l_{u,t}$:

$$u \succ^t v \Leftrightarrow l_{u,t} \supset l_{v,t}.$$

Пусть $t_{u>v} = \{t \mid t \in t_{uv}, u \succ^t v\}$ — множество тех объектов t , разметка которых участником u доминирует над их разметкой участником v . Очевидно:

$$t_{u>v} \cap t_{v>u} = \emptyset; \quad t_{u>v} \cup t_{v>u} \subseteq t_{uv}.$$

Тогда

$$d_{uv}^1 = \frac{1 + |t_{u>v}|}{1 + |t_{v>u}|}.$$

Второй способ (d_{uv}^2). Этот способ тоже основывается на введенном выше понятии доминирования разметки, но характеристика доминирования рассчитывается по следующей формуле:

$$d_{uv}^2 = 1 + \frac{|t_{u>v}| - |t_{v>u}|}{|t_{uv}| + 1}.$$

Оценки аккуратности участников предлагается получать как положительный собственный век-

тор матрицы со значениями попарных характеристик доминирования (d_{uv}^1 или d_{uv}^2). Легко убедиться, что матрицы характеристик доминирования, вычисленные любым из рассматриваемых способов, являются квадратными и положительными. Следовательно, согласно теореме Фробениуса — Перрона [27], у них есть собственные векторы со строго положительными координатами.

Экспериментальное исследование метода

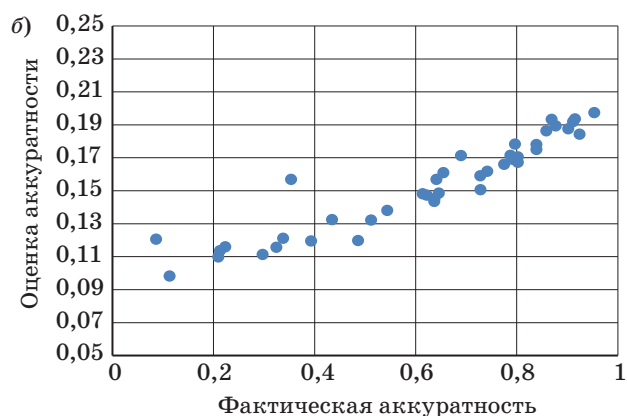
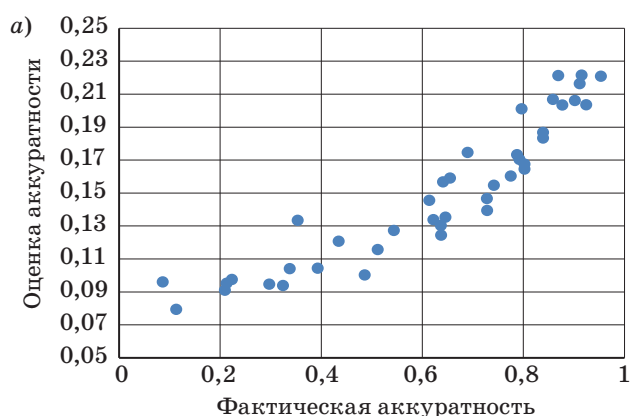
Применим предложенный метод для оценки аккуратности участников на наборе данных, сгенерированном при помощи модели, описанной выше. Значения параметров, использованные при генерации, сведены в таблицу.

Помимо этих параметров, для полного определения процедуры необходимо задать желаемый уровень избыточности — сколько участников должны обработать каждое изображение. В данном эксперименте уровень избыточности был установлен равным двум, т. е. каждое изображение обрабатывалось ровно двумя участниками, причем каждый участник обрабатывал только 50 изображений.

Связь между оценками аккуратности участников, полученными предложенным методом (с различными способами вычисления характеристики доминирования) и фактическими значениями аккуратности (задаваемыми при генерации набора данных) показана на рис. 2, а и б. Видно, что при обоих способах вычисления характеристики доминирования между оценкой аккуратности и фактической аккуратностью наблюдается сильная зависимость. Для численной оценки степени зависимости воспользуемся коэффициентом ранговой корреляции Спирмена, обладающего свойством инвариантности по отношению к монотонным преобразованиям, т. е. показывающим, насколько хорошо зависимость между двумя величинами может быть описана монотонной функцией (а поиск монотонной функции оценки аккуратности и является задачей, решаемой в данной статье). Коэффициенты Спирмена для предлага-

- Значения параметров, использованные при генерации набора данных
- Parameter values used to generate the dataset

Параметр	Значение
N	1000
n_i	В соответствии с распределением (см. рис. 1)
$e_{i,k}^{req}$	$U(0, 1)$
a_j	В соответствии с треугольным распределением (0; 0,82; 1)



■ **Рис. 2.** Связь между фактической аккуратностью и оценкой аккуратности участника, вычисленной с помощью характеристик доминирования d_{uv}^1 (а) и d_{uv}^2 (б)

■ **Fig. 2.** Relationship between the actual accuracy and the econtributor's accuracy estimated with a help of domination characteristics d_{uv}^1 (а) and d_{uv}^2 (б)

емого метода с различными способами вычисления характеристик доминирования приближенно равны 0,961 и 0,958 соответственно, что в совокупности с P -значениями порядка 10^{-10} дает основание считать, что между полученными с помощью предлагаемого метода оценками и реальными характеристиками аккуратности участников есть сильная монотонная зависимость. Вместе с тем в рассматриваемом примере принципиальной разницы между способами расчета характеристики доминирования нет.

Таким образом, предлагаемый метод (с любой из характеристик доминирования) действительно позволяет оценить ожидаемое качество разметки участников, основываясь только на ненадежных и неполных результатах разметки.

Анализ наборов данных с другими значениями параметров (варьирующимся N , a^m) показывает, что наличие такой сильной монотонной зависимости наблюдается при любых значениях параметров. Важным параметром является избыточность при назначении заданий (сколько участников обрабатывают одно изображение). Интуитивно это связано с тем, что чем меньше эта избыточность, тем меньше оказывается данных для сопоставления аккуратности участников, и, наоборот, чем избыточность в назначении изображений выше, тем больше данных для сопоставле-

ния и тем надежней должна оказываться оценка, получаемая таким методом. Действительно, с ростом избыточности коэффициент Спирмена для обоих способов расчета характеристики доминирования увеличивается.

Заключение

В статье предложена модель участника системы совместной разметки и метод оценки ожидаемого качества разметки, получаемой от участников такой системы. Предлагаемый метод основан на получении собственных чисел матрицы характеристики доминирования, построенной определенным образом. Особенность метода заключается в том, что он позволяет получить оценки ожидаемого качества разметки (ранжировать участников по ожидаемому качеству) на основе только ненадежных и неполных результатов разметки, без знания эталонных меток, получение которых часто является трудоемкой задачей. Полученные с помощью предлагаемого метода оценки могут использоваться в алгоритмах обеспечения качества разметки (например, для блокировки недобросовестных участников).

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-37-60107).

Литература

1. Wechsler D. Crowdsourcing as a Method of Transdisciplinary Research — Tapping the Full Potential of Participants // *Futures*. 2014. Vol. 60. P. 14–22.
2. Baev V., Sablok G., Minkov I. Next Generation Sequencing Crowd Sourcing at BIOCAMP: What Promises it Holds for us in Future? // *Jour-*

- nal of Computational Science. 2014. Vol. 5. N 3. P. 325–326.
3. Fraternali P., Castelletti A., Soncini-Sessa R., et al. Putting Humans in the Loop: Social Computing for Water Resources Management // *Environmental Modelling and Software*. 2012. Vol. 37. P. 68–77.
4. Nunes A., Galvão T., Cunha J. Urban Public Transport Service Co-creation: Leveraging Passenger's

- Knowledge to Enhance Travel Experience // *Procedia — Social and Behavioral Sciences*. 2014. Vol. 111. P. 577–585.
5. **Brabham D. C., Ribisl K. M., Kirchner T. R., Bernhardt J. M.** Crowdsourcing Applications for Public Health // *American Journal of Preventive Medicine*. N 46(2). P. 179–187.
 6. **Wu H., Sun H., Fang Y., et al.** Combining Machine Learning and Crowdsourcing for Better Understanding Commodity Reviews // *Proc. of the 29th AAAI Conf. on Artificial Intelligence*. 2015. P. 4220–4221.
 7. **Chang J., Amershi S., Kamar E.** Revolt: Collaborative Crowdsourcing for Labeling Machine Learning Datasets // *Proc. of the Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI 2017)*. 2017. P. 2334–2346.
 8. **Lasecki W., Song Y., Kautz H., Bigham J.** Real-time Crowd Labeling for Deployable Activity Recognition // *Proc. of the 2013 Conf. on Computer Supported Cooperative Work*. 2013. P. 1203–1212.
 9. **Irshad H., Oh E.-Y., Schmolze D., et al.** Crowdsourcing Scoring of Immunohistochemistry Images: Evaluating Performance of the Crowd and an Automated Computational Method // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. Article 43286.
 10. **Leifman G., Swedish T., Roesch K., et al.** Leveraging the Crowd for Annotation of Retinal Images // *Proc. of the 37th Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*. 2015. http://web.media.mit.edu/~gleifman/papers/GSRR_crowd_EMBC15.pdf (дата обращения: 02.05.2018).
 11. **Bernstein A., Klein M., Malone T.** Programming the Global Brain // *Communications of the ACM*. 2012. Vol. 55. Iss. 5. P. 41–43.
 12. **Пономарев А. В.** Разметка изображений массового мероприятия его участниками на основе немонетарного стимулирования // *Информационно-управляющие системы*. 2017. № 3. С. 105–114. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.105
 13. **Ben-Ami I., Basha T., Avidan S.** Racing Bib Numbers Recognition, *British Machine Vision Conference (BMVC)*. 2012. <http://people.csail.mit.edu/talidekel/papers/RBNR.pdf> (дата обращения: 02.05.2018).
 14. **Roy S., et al.** A New Multi-modal Technique for Bib Number/Text Detection in Natural Images, *Advances in Multimedia Information Processing (PCM 2015)*. 2015. LNCS 9314. P. 483–494.
 15. **Пonomarev A.** Community Photo Tagging: Engagement and Quality Study // *Proc. of the 2017 ACM Web Science Conf. (WebSci'17)*. 2017. P. 409–410.
 16. **Пономарев А. В.** Методы обеспечения качества в системах крауд-вычислений: аналитический обзор // *Тр. СПИИРАН*. 2017. Т. 54. № 5. С. 152–184.
 17. **Zhang J., et al.** Consensus Algorithms for biased Labeling in Crowdsourcing // *Informaion Sciences*. 2017. Vol. 382–383. P. 254–273.
 18. **Matsunaga A., Mast A., Fortes J. a. B. B.** Workforce-efficient Consensus in Crowdsourced Transcription of Biocollections Information // *Future Generation Computer Systems*. 2016. Vol. 56. P. 526–536.
 19. **Dawid A. P., Skene A. M.** Maximum Likelihood Estimation of Observer Error-Rates using the EM Algorithm // *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28. N 1. P. 20–28.
 20. **Sheng V. S., Provost F., Ipeirotis P. G.** Get Another Label? Improving Data Quality and Data Mining using Multiple, Noisy Labelers // *Proc. of the 14th ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 08)*. 2008. P. 614–622.
 21. **Lou Y., et al.** Use of Ontology Structure and Bayesian Models to Aid the Crowdsourcing of ICD-11 Sanctioning Rules // *Journal of Biomedical Informatics*. 2017. Vol. 68. P. 20–34.
 22. **Dai P., et al.** POMDP-based Control of Workflows for Crowdsourcing // *Artificial Intelligence*. 2013. Vol. 202. P. 52–85.
 23. **Han K., Zhang C., Luo J.** Taming the Uncertainty: Budget Limited Robust Crowdsensing Through Online Learning // *IEEE/ACM Transactions on Networking*. 2016. Vol. 24. N 3. P. 1462–1475.
 24. **Wen Y., et al.** Quality-Driven Auction-Based Incentive Mechanism for Mobile Crowd Sensing // *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2015. Vol. 64. N 9. P. 4203–4214.
 25. **Shamir L., Diamond D., Wallin J.** Leveraging Pattern Recognition Consistency Estimation for Crowdsourcing Data Analysis // *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*. 2016. Vol. 46. N 3. P. 474–480.
 26. **Burmania A., Parthasarathy S., Busso C.** Increasing the Reliability of Crowdsourcing Evaluations using Online Quality Assessment // *IEEE Transactions on Affective Computing*. 2016. Vol. 7. N 4. P. 374–388.
 27. **Гантмахер Ф. Р.** Теория матриц. — М.: Наука, 1966. — 576 с.

UDC 004.9

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-45-51

Model and Method for Contributor's Quality Assessment in Community Image Tagging SystemsPonomarev A. V.^a, PhD, Tech., Senior Researcher, ponomarev@iiias.spb.su^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Large-scale human-computer systems involving people of various skills and motivation into the information processing process are currently used in a wide spectrum of applications. An acute problem in such systems is assessing the expected quality of each contributor; for example, in order to penalize incompetent or inaccurate ones and to promote diligent ones. **Purpose:** To develop a method of assessing the expected contributor's quality in community tagging systems. This method should only use generally unreliable and incomplete information provided by contributors (with ground truth tags unknown). **Results:** A mathematical model is proposed for community image tagging (including the model of a contributor), along with a method of assessing the expected contributor's quality. The method is based on comparing tag sets provided by different contributors for the same images, being a modification of pairwise comparison method with preference relation replaced by a special domination characteristic. Expected contributors' quality is evaluated as a positive eigenvector of a pairwise domination characteristic matrix. Community tagging simulation has confirmed that the proposed method allows you to adequately estimate the expected quality of community tagging system contributors (provided that the contributors' behavior fits the proposed model). **Practical relevance:** The obtained results can be used in the development of systems based on coordinated efforts of community (primarily, community tagging systems).

Keywords — Crowdsourcing, Crowd Computing, Image Tagging, Image Processing, Collective Intelligence.

Citation: Ponomarev A. V. Model and Method for Contributor's Quality Assessment in Community Image Tagging Systems. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 45–51 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-45-51

References

- Wechsler D. Crowdsourcing as a Method of Transdisciplinary Research — Tapping the Full Potential of Participants. *Futures*, 2014, vol. 60, pp. 14–22.
- Baev V., Sablok G., Minkov I. Next Generation Sequencing Crowd Sourcing at BIOCOMP: What Promises it Holds for us in Future? *Journal of Computational Science*, 2014, vol. 5, no. 3, pp. 325–326.
- Fraternali P., Castelletti A., Soncini-Sessa R., et al. Putting Humans in the Loop: Social Computing for Water Resources Management. *Environmental Modelling and Software*, 2012, vol. 37, pp. 68–77.
- Nunes A., Galvão T., Cunha J. Urban Public Transport Service Co-creation: Leveraging Passenger's Knowledge to Enhance Travel Experience. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 2014, vol. 111, pp. 577–585.
- Brabham D. C., Ribisl K. M., Kirchner T. R., & Bernhardt J. M. Crowdsourcing Applications for Public Health. *American Journal of Preventive Medicine*, 2014, no. 46(2), pp. 179–187.
- Wu H., Sun H., Fang Y., et al. Combining Machine Learning and Crowdsourcing for Better Understanding Commodity Reviews. *Proc. of the 29th AAAI Conf. on Artificial Intelligence*, 2015, pp. 4220–4221.
- Chang J., Amershi S., Kamar E. Revolt: Collaborative Crowdsourcing for Labeling Machine Learning Datasets. *Proc. of the Conf. on Human Factors in Computing Systems (CHI 2017)*, 2017, pp. 2334–2346.
- Lasecki W., Song Y., Kautz H., Bigham J. Real-time Crowd Labeling for Deployable Activity Recognition. *Proc. of the 2013 Conf. on Computer Supported Cooperative Work*, 2013, pp. 1203–1212.
- Irshad H., Oh E.-Y., Schmolze D., et al. Crowdsourcing Scoring of Immunohistochemistry Images: Evaluating Performance of the Crowd and an Automated Computational Method. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, article 43286.
- Leifman G., Swedish T., Roesch K., et al. Leveraging the Crowd for Annotation of Retinal Images. *Proc. of the 37th Annual Intern. Conf. of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, 2015. Available at: http://web.media.mit.edu/~gleifman/papers/GSRR_crowd_EMBC15.pdf (accessed 2 May 2018).
- Bernstein A., Klein M., Malone T. Programming the Global Brain. *Communications of the ACM*, 2012, vol. 55, iss. 5, pp. 41–43.
- Ponomarev A. Tagging Public Event Images based on Non-Monetary Incentives. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 3, pp. 105–114 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.3.105
- Ben-Ami I., Basha T., Avidan S. Racing Bib Numbers Recognition. *British Machine Vision Conf. (BMVC)*, 2012. Available at: <http://people.csail.mit.edu/talidekel/papers/RBNR.pdf> (accessed 2 May 2018).
- Roy S., et al. A New Multi-modal Technique for Bib Number/Text Detection in Natural Images. *Advances in Multimedia Information Processing — PCM 2015*, 2015, LNCS 9314, pp. 483–494.
- Ponomarev A. Community Photo Tagging: Engagement and Quality Study. *Proc. of the 2017 ACM Web Science Conf.*, 2017, pp. 409–410.
- Ponomarev A. Quality Control Methods in Crowd Computing: Literature Review. *Trudy SPIIRAN* [SPIIRAS Proceedings], 2017, vol. 54, no. 5, pp. 152–184 (In Russian).
- Zhang J., et al. Consensus Algorithms for biased Labeling in Crowdsourcing. *Informaion Sciences*, 2017, vol. 382–383, pp. 254–273.
- Matsunaga A., Mast A., Fortes J. a. B. B. Workforce-efficient Consensus in Crowdsourced Transcription of Biocollections Information. *Future Generation Computer Systems*, 2016, vol. 56, pp. 526–536.
- Dawid A. P., Skene A. M. Maximum Likelihood Estimation of Observer Error-Rates using the EM Algorithm. *Applied Statistics*, 1979, vol. 28, no. 1, pp. 20–28.
- Sheng V. S., Provost F., Ipeirotis P. G. Get Another Label? Improving Data Quality and Data Mining using Multiple, Noisy Labelers. *Proc. of the 14th ACM SIGKDD Intern. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD 08)*, 2008, pp. 614–622.
- Lou Y., et al. Use of Ontology Structure and Bayesian Models to Aid the Crowdsourcing of ICD-11 Sanctioning Rules. *Journal of Biomedical Informatics*, 2017, vol. 68, pp. 20–34.
- Dai P., et al. POMDP-based Control of Workflows for Crowdsourcing. *Artificial Intelligence*, 2013, vol. 202, pp. 52–85.
- Han K., Zhang C., Luo J. Taming the Uncertainty: Budget Limited Robust Crowdsensing Through Online Learning. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2016, vol. 24, no. 3, pp. 1462–1475.
- Wen Y., et al. Quality-Driven Auction-Based Incentive Mechanism for Mobile Crowd Sensing. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2015, vol. 64, no. 9, pp. 4203–4214.
- Shamir L., Diamond D., Wallin J. Leveraging Pattern Recognition Consistency Estimation for Crowdsourcing Data Analysis. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 2016, vol. 46, no. 3, pp. 474–480.
- Burmania A., Parthasarathy S., Busso C. Increasing the Reliability of Crowdsourcing Evaluations using Online Quality Assessment. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 374–388.
- Gantmaher F. R. *Teoriya matric* [Matrix Theory]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 576 p. (In Russian).

НЕЙРОННАЯ СЕТЬ С КОНКУРЕНТНЫМ ПОРОГОМ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МАЛЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ МОЛЕКУЛЯРНЫХ СТРУКТУР

Е. О. Путин^а, аспирант, putin.evgeny@gmail.com

А. А. Шалыто^а, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0002-2723-2077

^аМеждународная лаборатория «Компьютерные технологии», Университет ИТМО, Кронверкский пр., 49, Санкт-Петербург, 197101, РФ

Постановка проблемы: особое место в процессе разработки новых лекарственных препаратов занимает компьютерное моделирование потенциальных кандидатов в лекарства. На этом этапе создается и виртуально валидируется молекулярная структура препарата. Молекулярные структуры создаются преимущественно биоинформатиками и медицинскими химиками. Поэтому процесс создания и виртуального тестирования молекул является долгим и дорогим. **Цель:** разработка модели глубокой генеративной конкурентной нейронной сети, а также среды ее подкрепления для генерации целевых малых органических молекулярных структур с заданными свойствами и функции награды по молекулярному разнообразию. **Результаты:** разработана модель глубокой нейронной сети, основанная на концепциях конкурентного обучения и обучения с учителем. В качестве генератора молекулярных структур модель использует рекуррентную нейронную сеть с внешней памятью и специальный нейросетевой блок для отбора генерируемых молекул до их реальной оценки средой. Также разработана новая объектная функция внутренней кластеризации по разнообразию, которая позволяет модели генерировать более разнородную химию. Сравнительные эксперименты показали, что предложенная модель лучше своего ближайшего конкурента с точки зрения генерации уникальных и более сложных валидных молекулярных структур. Продемонстрировано, что сгенерированные моделью молекулы соответствуют априорным распределениям ключевых молекулярных дескрипторов тренировочных молекул. Исследования проводились на выборке из 15 000 лекарственно-подобных молекулярных соединений, собранных вручную из коллекции компании ChemDiv. **Практическая значимость:** предложенная модель может быть использована в качестве умного помощника для разработки новых лекарственных препаратов медицинскими химиками.

Ключевые слова — машинное обучение, глубокое обучение, обучение с подкреплением, порождающие конкурентные нейронные сети, дизайн и разработка лекарств.

Цитирование: Путин Е. О., Шалыто А. А. Нейронная сеть с конкурентным порогом для генерации малых органических молекулярных структур // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 52–60. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-52-60

Citation: Putin E. O., Shalyto A. A. Adversarial Threshold Neural Computer for Small Organic Molecular Structures. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 52–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-52-60

Введение

В современном мире глубокие нейронные сети (Deep Neural Network — DNN) используются повсеместно; с помощью DNN были достигнуты выдающиеся успехи и высокая эффективность в распознавании образов [1, 2], обработки естественного языка [3]. Архитектуры DNN результативно применяются также в различных областях биологических и биомедицинских наук [4–13].

Однако их использование для дизайна и разработки новых лекарственных препаратов, особенно для создания новых молекулярных соединений, находится на начальной стадии. Это связано с такими факторами, как сложность адаптации и разработки новых архитектур DNN, пригодных для работы с молекулярными структурами (в виде графа, строки, трехмерной карты электронной плотности); сравнительно небольшое количество доступных валидационных данных; трудность проверки эффективности DNN.

В последнее время стали развиваться модели, основанные на рекуррентных нейронных сетях, которые более адаптированы для данных в виде последовательности, таких как молекулы, представленные в строковом формате SMILES [14]. Например, в работе [15] авторы показали, что по сравнению с базовыми моделями эффективность генерации молекул была улучшена при использовании ячеек с долгой краткосрочной памятью (Long Short-Term Memory — LSTM) [16]. Тем не менее, поскольку никакой удобный «порождающий» метод отбора новых молекул из модели не мог быть определен, процесс генерации остался ограниченным. Кроме того, модель не включала никакого механизма для оценки того, являются ли сгенерированные молекулы валидной строкой SMILES. Более того, в модель невозможно включить какие-либо критерии для генерации целевых молекулярных структур с желаемыми свойствами.

В другой работе [17] были проанализированы несколько RNN архитектур рекуррентных ней-

ронных сетей и показано, что стандартные стохастические оптимизаторы могут быть улучшены за счет использования генеративных моделей, обученных по неразмеченным данным, для проведения оптимизации, основанной на знаниях. Такой подход может позволить заменить вручную разработанные правила, которые в настоящее время обычно используются в контексте дизайна лекарств *de novo*, на правила, которые вычисляются в ходе обучения нейронной сети.

Развитие генеративных конкурентных сетей (GANs) [18] позволило более подробно изучить это направление. Был предложен подход [19] для генерации последовательности посредством глубокого обучения с подкреплением (Reinforcement Learning — RL). Архитектура под названием SeqGAN была основана на парадигме GAN, расширенной генератором на основе RL. Задача генерации последовательности формулируется как RL-задача, где агенту (генератору) дается k -я длина уже сгенерированной последовательности, и необходимо выбрать следующий $(k + 1)$ -й символ, который будет сгенерирован. Окружающая среда (дискриминатор) возвращает награду для генератора, которая оценивается как вероятность обмана дискриминатора. Тем не менее, поскольку генератор выводит дискретные значения, стандартный алгоритм обратного распространения ошибки невозможно использовать, и авторы предложили обновлять веса генератора с помощью метода *policy gradients* и поиска по методу Монте-Карло на основе ожидаемой конечной награды (вознаграждения за полную последовательность), возвращаемой от дискриминатора. Для оценки функции действие-значение был применен алгоритм REINFORCE [20].

Основываясь на SeqGAN, ученые недавно предложили архитектуру ORGANIC [21] для генерации молекулярных соединений. Эта модель добавляет целевую объектную функцию вознаграждения для определенных последовательностей в функцию потерь SeqGAN. Объектная функция вознаграждения ORGANIC аналогична фильтру. Когда генерируемые молекулы проходят фильтр, генератор получает большую награду за генерацию таких молекул от дискриминатора. Результаты экспериментов показали, что использование различных целевых функций вознаграждения позволяет смещать процесс генерации и генерировать молекулы с заданными пользователем желаемыми свойствами.

Целью данной работы является создание новой архитектуры DNN на основе парадигмы ORGANIC для генерации целевых малых органических молекулярных структур, а также разработка новой объектной функции награды, которая позволит генерировать более разнообразные молекулы.

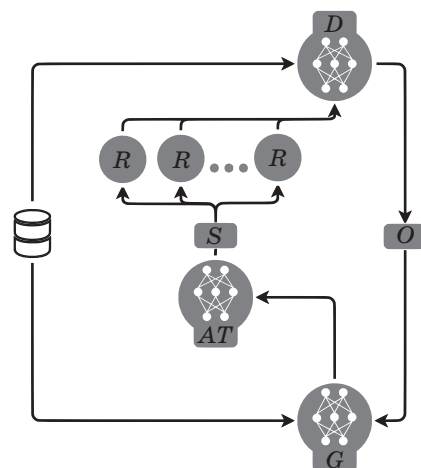
Модель ATNC

Модель ATNC (Adversarial Threshold Neural Computer), основанная на парадигме ORGANIC, расширяет ее использованием DNC (Differentiable Neural Computer) [22] в качестве генератора вместо LSTM и добавлением специального блока (Adversarial Threshold — AT), который отвечает за отбор генерируемых молекул еще до оценки их средой (рис. 1).

Сформулируем задачу генерации молекул в парадигме ORGANIC.

Имеется набор тренировочных молекул $D = \{X_i\}_{i=1}^M$, на которых необходимо обучить генеративную конкурентную нейронную сеть GAN для генерации реалистичных малых органических молекулярных соединений. Концепция GAN подразумевает наличие двух игроков — генератора и дискриминатора. Задача генератора генерировать правдоподобные объекты таким образом, чтобы «обмануть» дискриминатор, т. е. чтобы последний не смог отличить сгенерированные примеры от тренировочных. С другой стороны, задача дискриминатора — эффективно отличать сгенерированные примеры от настоящих.

Так, θ -параметризованный генератор G_θ модели ATNC генерирует строки $Y_{1:T} = (y_1, \dots, y_T)$ в формате SMILES посимвольно, где T — максимальная длина строки в наборе данных. При этом генератор G_θ является RL-агентом, который взаимодействует со средой. На каждой итерации генерации молекулы генератор G_θ по своему состоянию (текущая сгенерированная последова-



■ **Рис. 1.** Схематическое изображение модели ATNC: G — генератор; D — дискриминатор; O — некоторая объектная функция вознаграждения; S — множество выбранных выборок (молекул) с помощью блока AT; R — считываемая головка в генераторе DNC

■ **Fig. 1.** The schematic view of the ATNC model: G — generator; D — discriminator; O — some objective reward function; S — the set of chosen samples (molecules) by AT block; R — stands for the read head in DNC generator

тельность) осуществляет действие — выбор следующего символа из алфавита SMILES, который необходимо добавить к уже сгенерированной последовательности. Когда молекулярная последовательность достигает терминального символа, она оценивается средой. В качестве среды используется ϕ -параметризованный дискриминатор D_ϕ и специальная целевая объектная функция награды $O(Y_{1:T})$.

Таким образом, цель генератора G_θ ATNC заключается в том, чтобы одновременно обмануть дискриминатор D_ϕ и максимизировать целевую функцию вознаграждения $O(Y_{1:T})$. Это делается с использованием метода policy gradient [23]:

$$J(\theta) = \sum_{y_1 \in Y} G_\theta(y_1 | s_0) \times Q(s_0, y_1),$$

где Q — функция действие-награда; s_0 — первичное состояние агента; y_1 — первое действие генератора.

Отличительной особенностью ATNC от ORGANIC является использование DNC в качестве генератора, так как DNC позволяет генерировать гораздо более длинные и сложные последовательности $Y_{1:T}$, чем при использовании LSTM. Это достигается за счет того, что DNC содержит в себе внешнюю память, с которой умеет эффективно работать за счет механизмов внимания. После предобучения методом максимального правдоподобия генератор G_θ создает отрицательные образцы для дискриминатора D_ϕ , который также предобучается методом максимального правдоподобия.

Таким образом, цель дискриминатора D_ϕ состоит в том, чтобы свести к минимуму кросс-энтропию между настоящими (тренировочными) и сгенерированными генератором D_ϕ молекулами. Для предобучения дискриминатора D_ϕ используется специальный параметр ζ , который контролирует, сколько эпох дискриминатор D_ϕ предварительно обучается только в валидных (корректных с точки зрения химической валентности) молекулах Y' . Начиная с RL-обучения, веса предобученного дискриминатора D_ϕ копируются в АТ-блок:

$$\nabla J(\phi) = \begin{cases} \min_{\phi} E_{Y \sim P_{\text{data}}(Y)} [\log D_{\phi}(Y)] + \\ + E_{Y \sim P_G(Y)} [\log(1 - D_{\phi}(Y))] , \text{ если эпоха} < \zeta \\ \min_{\phi} E_{Y' \sim P_{\text{data}}(Y')} [\log D_{\phi}(Y')] + \\ + E_{Y' \sim P_G(Y')} [\log(1 - D_{\phi}(Y'))] , \text{ если эпоха} > \zeta \end{cases}.$$

Блок АТ является копией дискриминатора в среде, которая отстает от исходного дискримина-

тора на заданное количество тренировочных эпох. АТ реализует идею парадигмы RL под названием актер-критик (actor-critic), т. е. он добавляет в модель способность симулировать окружающую среду и фильтровать сгенерированные молекулы до их реальной оценки в среде, что позволяет модели лучше понять природу тренировочных данных.

В каждую эпоху генератор G_θ генерирует K (размер партии генератора) молекул. Затем АТ-блок отбирает молекулы, которые наиболее точно соответствуют образцам обучения. Если количество выбранных молекул меньше J (размер партии дискриминатора), то генератор G_θ снова генерирует новые K молекул. Этот процесс повторяется до тех пор, пока количество выбранных молекул не будет равно J . После отбора молекул N раз применяется поиск по методу Монте-Карло для вычисления функции действие-награда $Q(s, a)$ для не полностью сгенерированных последовательностей. Это делается для того, чтобы избежать проблемы долгосрочного вознаграждения:

$$Q(s = Y_{1:t-1}, a = y_t) = \begin{cases} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N R(Y_{1:T}^n), Y_{1:T}^n \in MC^{G_\theta}(Y_{1:T}^n; N), \text{ если } t < T \\ R(Y_{1:T}^n), \text{ если } t = T \end{cases}.$$

Следуя парадигме ORGANIC, сумма вознаграждений R в модели ATNC вычисляется как сумма выходов дискриминатора и объективной функции вознаграждения, где вклад каждого компонента в сумму регулируется параметром λ :

$$R(Y_{1:T}) = \lambda \times (D_\phi(Y_{1:T})) + (1 - \lambda) \times O(Y_{1:T}).$$

Наконец, параметры θ генератора ATNC G_θ можно получить, используя метод policy gradient:

$$\nabla_{\theta} J(\theta) \approx \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T E_{y_t \sim G_\theta(y_t | Y_{1:t-1})} \times \left[\nabla_{\theta} \log G_\theta(y_t | Y_{1:t-1}) \times Q(Y_{1:t-1}, y_t) \right].$$

Обновление весов АТ-блока управляется параметром τ . Этот параметр позволяет регулировать, на сколько эпох модель среды (АТ) отстает от первоначального дискриминатора D_ϕ . Помимо обучения генератора G_θ , АТ также влияет на обучение дискриминатора. С самого начала RL-обучения тренировочные образцы дискриминатора становятся выбранными образцами Y'' (от общего числа молекул, генерируемых генератором) АТ:

$$\min_{\phi} E_{Y'' \sim P_{\text{data}}(Y'')} [\log D_{\phi}(Y'')] + E_{Y'' \sim P_G(Y'')} [\log(1 - D_{\phi}(Y''))].$$

Таким образом, АТ-блок пытается выбрать образцы, которые очень похожи на тренировочные данные, что позволяет фильтровать молекулы даже на стадии генерации. Это упрощает последующий выбор молекул.

IDC: объектная функция награды, основанная на внутренней кластеризации по разнообразию

В парадигме ORGANIC лучший способ автоматической генерации разнообразных молекул заключается в разработке пользовательской объектной функции награды. В данной работе предложена функция IDC — внутренняя кластеризация сгенерированных молекул по разнообразию. Алгоритм IDC заключается в следующем:

- сгенерированный набор молекул P кластеризуется по молекулярным отпечаткам F_{ϕ} с использованием меры схожести молекул $S_{\text{мера}}$ и пороговым значением схожести $S_{\text{пор}}$;

- из каждого получившегося кластера выбираются топ K наиболее разнообразных молекул;

- далее конструируется бинарный вектор награды rewards с единицами только в позициях выбранных топ K наиболее разнообразных молекул для каждого кластера.

Основная идея функции заключается в том, чтобы на каждой итерации обучения генератора вознаграждать его за то, что он генерирует разнообразные молекулярные структуры. Интуитивно понятно, что если разнородность молекул высокая, то генератор сможет покрывать большее химическое пространство и будет способен генерировать «новые» молекулярные структуры.

Результаты экспериментальных исследований моделей ATNC и ORGANIC

В качестве набора тренировочных образцов использовалось собранное вручную подмножество (набор данных CD) из 15 000 лекарственно-подобных молекул, доступных в коллекции ChemDiv [24]. Химические статистические характеристики набора данных CD можно суммировать следующим образом: 0,87 разнообразия, 644 уникальных гетероцикла, 793 кластера, 3035 одиночных чисел и 18,9 — средний размер кластера. В наборе данных 11 690 молекул удовлетворяют RO5. Кроме того, только 21 соединение не прошло успешно через фильтры для медицинской химии. Внутреннее разнообразие соединений, включенных в эталонный набор данных, рассчитывали на основе отпечатков пальцев расширенной связи с использованием расстояния Танimoto.

Поскольку ATNC расширяет и развивает парадигму ORGANIC, то все проводимые эксперименты сравнивались с базовой моделью ORGANIC. Чтобы провести объективное сравнение моделей ATNC и ORGANIC, все эксперименты выполнялись с почти такими же гиперпараметрами и настройками. Все эксперименты были проведены на NVIDIA Titan X Pascal с 256 RAM.

Модели ATNC и ORGANIC были протестированы на наборе данных CD. В экспериментах использовались четыре различные целевые объектные функции вознаграждения.

1. Внутреннее сходство (IS). Объектная функция награды IS была рассчитана следующим образом. IS была дана матрица сходства для набора сгенерированных молекул, далее она рассматривала каждую сгенерированную молекулу и вычисляла среднее сходство между этой молекулой и другими молекулами. Эти усредненные значения подобия затем использовались для формирования вещественного вектора вознаграждения набора.

2. Предлагаемая объектная функция награды IDC.

3. Фильтр сходства с лекарствами Muegge (MU) [25]. Когда молекула удовлетворяла объектной функции награды MU, соответствующий бит в векторе вознаграждения обновлялся до единицы. Если критерий MU не был удовлетворен, бит в векторе вознаграждения устанавливался в ноль.

4. Наличие или отсутствие sp³-богатых фрагментов (SP³). В этой работе мы использовали 150 различных SP³. Когда молекула имела в своей структуре по меньшей мере один sp³-богатый фрагмент, соответствующий бит в векторе вознаграждения SP³ устанавливался в единицу. Если этот критерий не был выполнен, бит в векторе вознаграждения устанавливался на ноль.

Наша основная задача заключалась в оценке влияния четырех различных целевых функций вознаграждения на обучение моделей, а также на свойства генерируемых молекул.

Сравнение проводилось в три этапа. Во-первых, мы исследовали процент валидных и уникальных строк SMILES, сгенерированных ATNC- и ORGANIC-моделями. Проценты валидных строк SMILES вычислялись по отношению к общему числу генерируемых молекул. Между тем проценты уникальных строк SMILES вычислялись относительно количества допустимых строк SMILES. Каждая из двух моделей была обучена с четырьмя объектными функциями награды.

Результаты этого эксперимента показаны в таблице. Следует отметить, что ATNC генерирует разное общее количество строк SMILES. Это связано с тем, что блок АТ действует как фильтр, выбирая подмножество генерируемых молекул. Затем это подмножество обрабатывается и оценивается

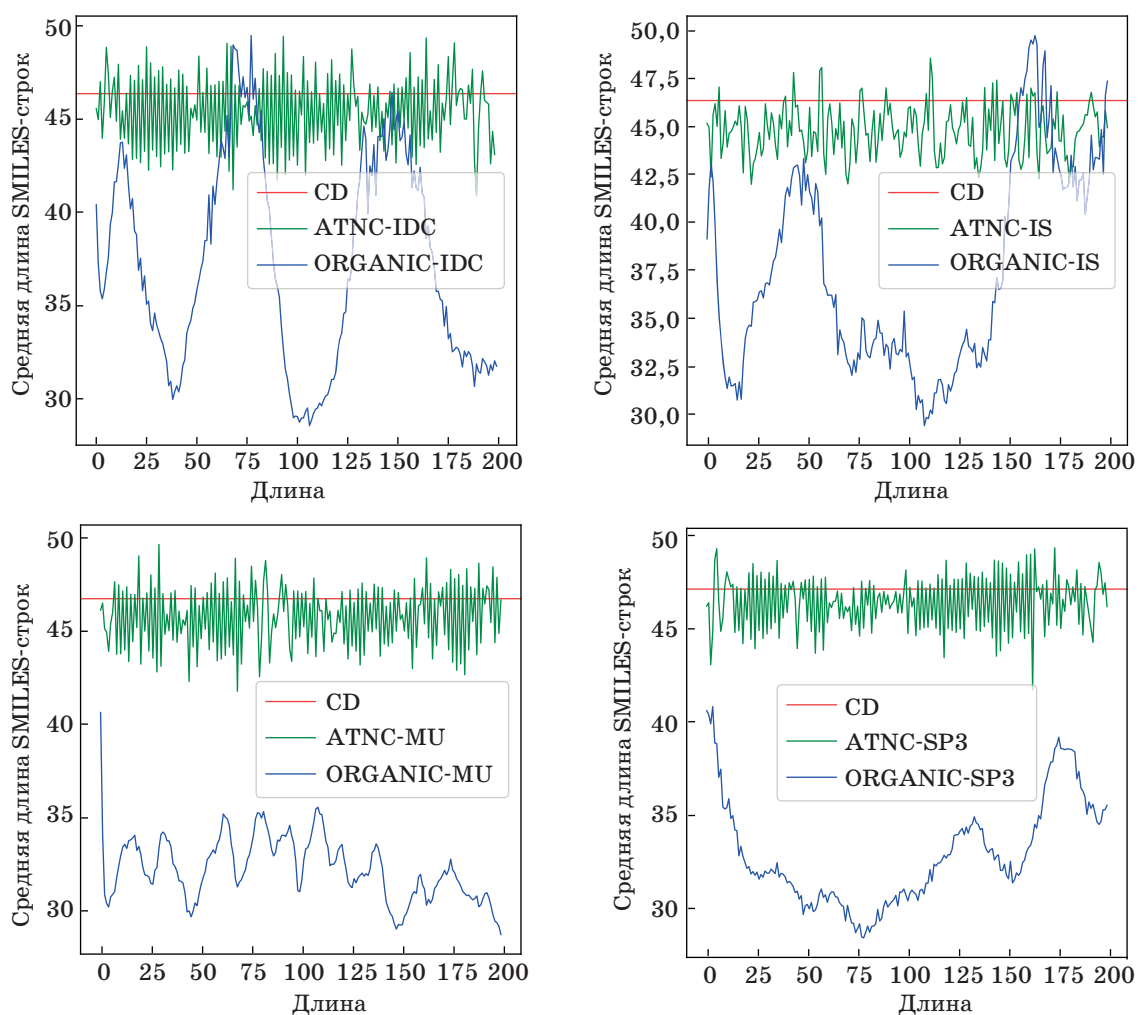
средой. Как правило, ATNC генерирует больший процент уникальных молекул, чем ORGANIC, за исключением случаев, когда модель ORGANIC использовалась в сочетании с объектными функциями вознаграждения IDC и IS. Также стоит отметить, что ATNC выявил аналогичный процент валидных строк SMILES для всех четырех целевых функций вознаграждения, в то время как

у ORGANIC был значительно меньший процент действительных строк SMILES при использовании с объектными функциями вознаграждения IDC и IS.

Во-вторых, мы проанализировали среднюю длину валидных строк SMILES, сгенерированных двумя моделями на каждой эпохе. Результаты этого анализа представлены на рис. 2. Для четы-

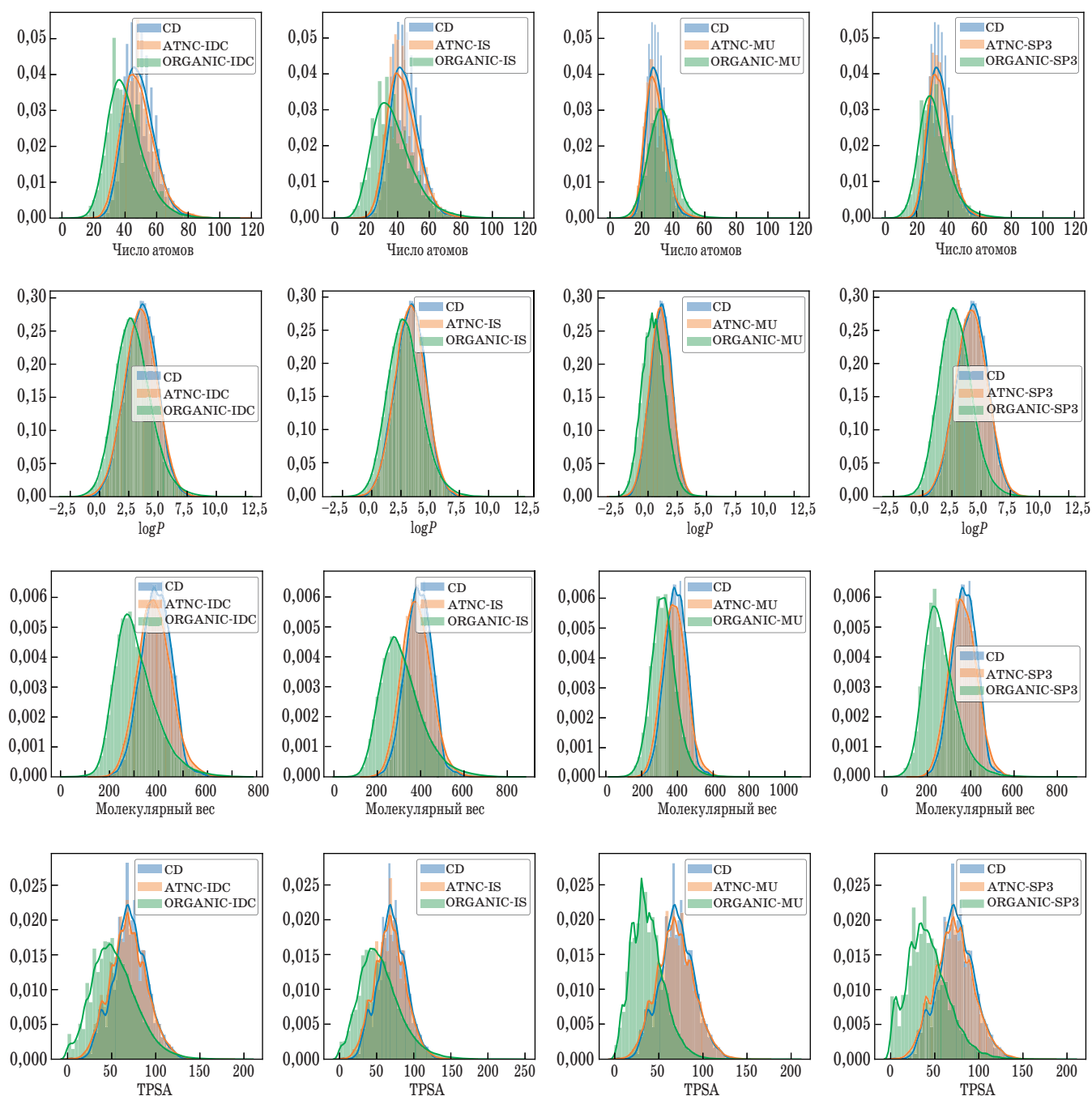
- Процент валидных и уникальных строк SMILES, генерируемых ATNC и ORGANIC, с использованием набора данных CD
- Percentages of valid and unique SMILES strings generated by the ATNC and the ORGANIC models using the CD dataset

Количество молекул	ATNC				ORGANIC			
	IDC	IS	MU	SP3	IDC	IS	MU	SP3
Валидных, %	72	71	74	74	8	7	83	83
Уникальных, %	77	86	76	73	86	91	30	22
Всего	157 986	101 652	176 342	156 605	1 792 000	1 792 000	1 792 000	1 792 000



■ Рис. 2. Зависимость средней длины сгенерированных SMILES-строк от эпохи обучения моделей: — — средняя длина строк SMILES в CD-наборе

■ Fig. 2. Dependence of average lengths of the generated SMILES strings on training epochs: — — means in the training dataset



■ **Рис. 3.** Распределения ключевых молекулярных дескрипторов для сгенерированных молекул
 ■ **Fig. 3.** Distributions of the molecular descriptors calculated for the generated molecules

рех объектных функций вознаграждения модель ATNC демонстрирует лучшую стабильность. Она смогла генерировать строки SMILES, длина которых была близка к тем, что у тренировочных молекул. Поведение модели ORGANIC было иным, строки SMILES, сгенерированные после нескольких эпох RL, были намного меньше тренировочных.

В-третьих, мы изучили распределение длин строк SMILES и распределение нескольких ключевых молекулярных дескрипторов (число атомов, молекулярный вес, $\log P$ [26] и TPSA [27]) для сгенерированных молекул. Результаты показаны на рис. 3. Можно видеть, что молекулы, генерируемые ATNC, соответствуют распределениям молекул, используемых для обучения по

всем четырем объектным функциям вознаграждения. С другой стороны, молекулы, генерируемые ORGANIC, не смогли сохранить априорные распределения референсных молекул.

Результаты наглядно демонстрируют возможности модели ATNC по сравнению с ORGANIC к генерации большего процента уникальных, сложных и потенциально новых молекулярных структур, соответствующих по распределениям длин строк SMILES и ключевым молекулярным дескрипторам тренировочным молекулам. Эти особенности имеют особое значение в современной концепции дизайна и разработки лекарственных препаратов.

Заключение

Разработана новая архитектура нейронной сети ATNC, основанная на концепциях конкурентного обучения и обучения с подкреплением для генерации малых органических молекулярных

структур. Также разработана новая объектная функция награды IDC, которая вознаграждает генератор ATNC за генерацию разнообразных молекулярных структур. Сравнительные эксперименты были проведены на наборе данных CD, состоящем из 15 000 соединений.

В результате исследования можно сделать следующие выводы:

— благодаря использованию DNC в качестве генератора и AT-блока предложенная модель ATNC генерирует больший процент уникальных и валидных сложных с точки зрения длины молекулярных структур, чем базовая модель ORGANIC;

— молекулы, сгенерированные ATNC, соответствуют априорным распределениям ключевых физико-химических молекулярных дескрипторов тренировочных молекул, чего нельзя сказать об ORGANIC;

— предложенная функция награды IDC работает лучше с точки зрения процента валидных молекулярных структур, чем IS, и позволяет генерировать более разнообразные молекулы.

Литература

1. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning// Nature. 2015. Vol. 521. P. 436–444. doi:10.1038/nature14539. <https://www.nature.com/articles/nature14539> (дата обращения: 15.07.2018).
2. Liu Q., et al. A Review of Image Recognition with Deep Convolutional Neural Network// 13th Intern. Conf. of Intelligent Computing, Liverpool, 2017. P. 69–80. doi:10.1007/978-3-319-63309-1
3. Deng L., Liu Y. Deep Learning in Natural Language Processing. — Singapore: Springer Singapore, 2018. — 329 p. doi:10.1007/978-981-10-5209-5
4. Schneider G., Fechner U. Computer-based De Novo Design of Drug-like Molecules// Nature Reviews Drug Discovery. 2005. Vol. 4. P. 649–663. doi:10.1038/nrd1799. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16056391> (дата обращения: 15.07.2018).
5. Min S., Lee B., Yoon S. Deep Learning in Bioinformatics// Briefings in Bioinformatics. 2016. Vol. 15. Iss. 1. P. 851–869. doi:10.1093/bib/bbw068 <https://academic.oup.com/bib/article/18/5/851/2562808> (дата обращения: 15.07.2018).
6. Mamoshina P., Vieira A., Putin E., Zhavoronkov A. Applications of Deep Learning in Biomedicine// Molecular Pharmaceutics. 2016. Vol. 13. P. 1445–1454. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.5b00982. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27007977> (дата обращения: 15.07.2018).
7. Klefogiannis D., Kalnis P., Bajic V. B. DEEP: A General Computational Framework for Predicting Enhancers// Nucleic Acids Research. 2014. Vol. 43. P. e6. doi:10.1093/nar/gku1058. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25378307> (дата обращения: 15.07.2018).
8. Kim S. G., Theera-Ampornpant N., Fang C.-H., Harwani M., Grama A., Chaterji S. Opening up the Black-box: An Interpretable Deep Neural Network-based Classifier for Cell-type Specific Enhancer Predictions// BMC Systems Biology. 2016. Vol. 10. N 54. P. 244–258. doi:10.1186/s12918-016-0302-3. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4977478> (дата обращения: 15.07.2018).
9. Aliper A., Plis S., Artemov A., Ulloa A., Mamoshina P., Zhavoronkov A. Deep Learning Applications for Predicting Pharmacological Properties of Drugs and Drug Repurposing using Transcriptomic Data// Molecular Pharmaceutics. 2016. Vol. 13. P. 2524–2530. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.6b00248. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27200455> (дата обращения: 15.07.2018).
10. Xu Y., Pei J., Lai L. Deep Learning based Regression and Multiclass Models for Acute Oral Toxicity Prediction with Automatic Chemical Feature Extraction// Journal of Chemical Information and Modeling. 2017. Vol. 57. N 11. P. 2672–2685. doi:10.1021/acs.jcim.7b00244. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29019671> (дата обращения: 15.07.2018).
11. Lenselink E. B., Dijke N., Bongers B., Papadatos G., Vlijmen H. W., Kowalczyk W., Ijzerman A. P., Westen G. J. Beyond the Hype: Deep Neural Networks Outperform Established Methods using a ChEMBL Bioactivity Benchmark Set// Journal of Cheminformatics. 2017. Vol. 9. N 5. P. 1–14. doi:10.1186/s13321-017-0232-0. <https://link.springer.com/article/10.1186/s13321-017-0232-0> (дата обращения: 15.07.2018).
12. Putin E., et al. Deep Biomarkers of Human Aging: Application of Deep Neural Networks to Biomarker Development// Aging (Albany NY). 2016. Vol. 8.

- N5.P.1021–1033. doi:10.18632/aging.100968. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27191382> (дата обращения: 15.07.2018).
13. **Kadurin A.**, et al. druGAN: An Advanced Generative Adversarial Autoencoder Model for De Novo Generation of New Molecules with Desired Molecular Properties in Silico// *Molecular Pharmaceutics*. 2017. Vol. 14. N 9. P. 3098–3104. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.7b00346. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28703000> (дата обращения: 15.07.2018).
 14. **Weininger D.** SMILES, A Chemical Language and Information System. 1. Introduction to Methodology and Encoding Rules// *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*. 1988. Vol. 28. N 1. P. 31–36. doi:10.1021/ci00057a005. <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ci00057a005> (дата обращения: 15.07.2018).
 15. **Bjerrum E. J., Threlfall R.** Molecular Generation with Recurrent Neural Networks (RNNs). arXiv preprint arXiv:1705.04612. 2017. <https://arxiv.org/abs/1705.04612> (дата обращения: 15.07.2018).
 16. **Hochreiter S., Schmidhuber J.** Long Short-term Memory // *Neural Computation*. 1997. Vol. 9. N 8. P. 1735–1780. doi:10.1162/neco.1997.9.8.1735
 17. **Cherti M., Kégl B., Kazakçı A.** De Novo Drug Design with Deep Generative Models: An Empirical Study// Intern. Conf. on Learning Representations, Toulon, 2017. <https://pdfs.semanticscholar.org/9759/6bc50245f5e0f2d20bde6a8a13f2ac437619.pdf> (дата обращения: 15.07.2018).
 18. **Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y.** Generative Adversarial Nets// *Advances in Neural Information Processing Systems*, Montreal, 2014. P. 2672–2680.
 19. **Yu L., Zhang W., Wang J., Yu Y.** SeqGAN: Sequence Generative Adversarial Nets with Policy Gradient// AAAI, San Francisco, 2017. P. 2852–2858.
 20. **Williams R. J.** Simple Statistical Gradient-following Algorithms for Connectionist Reinforcement Learning// *Machine Learning*. 1992. Vol. 8. P. 229–256. doi:10.1007/BF00992696
 21. **Sanchez-Lengeling B., Outeiral C., Guimaraes G. L., Aspuru-Guzik A.** Optimizing Distributions over Molecular Space. An Objective-Reinforced Generative Adversarial Network for Inverse-design Chemistry (ORGANIC). ChemRxiv preprint: 5309668 2017. https://chemrxiv.org/articles/ORGANIC_1_pdf/5309668 (дата обращения: 15.07.2018).
 22. **Graves A.**, et al. Hybrid Computing using a Neural Network with Dynamic External Memory// *Nature*. 2016. Vol. 538. N 7626. P. 471–476. doi:10.1038/nature20101
 23. **Sutton R. S., Barto A. G.** Reinforcement Learning: An Introduction. — Cambridge, MIT Press, 1998. — 322 p. doi:10.1109/TNN.1998.712192
 24. Сайт компании ChemDiv. <http://www.chemdiv.com/> (дата обращения: 15.07.2018).
 25. **Muegge I.** Selection Criteria for Drug-like Compounds// *Medicinal Research Reviews*. 2003. Vol. 23. P. 302–321. doi:10.1002/med.10041. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12647312> (дата обращения: 15.07.2018).
 26. **Wildman S. A., Crippen G. M.** Prediction of Physicochemical Parameters by Atomic Contributions// *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*. 1999. Vol. 39. N 5. P. 868–873. doi:10.1021/ci9903071 <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ci9903071> (дата обращения: 15.07.2018).
 27. **Palm K.**, et al. Polar Molecular Surface Properties Predict the Intestinal Absorption of Drugs in Humans // *Pharmaceutical Research*. 1997. Vol. 14. N 5. P. 568–571. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1012188625088> (дата обращения: 15.07.2018).

UDC 004.855.5:004.032.26

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-52-60

Adversarial Threshold Neural Computer for Small Organic Molecular StructuresPutin E. O.^a, Post-Graduate Student, putin.evgeny@gmail.comShalyto A. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-2723-2077^aComputer Technologies Lab, ITMO University, 49, Kronverkskii Pr., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: A special place in the development of new drugs is computer modeling of potential drug candidates. At this stage, the molecular structure of a drug is created and virtually validated. Molecular structures are created mostly by bioinformatics specialists and medical chemists. Therefore, the process of creating and virtual testing of molecules is long and expensive. **Purpose:** Developing a model of a deep generative adversarial neural network and its reinforcement environment for generating targeted small organic molecular structures with predetermined properties, as well as reward functions for molecular diversity. **Results:** The developed deep neural network model called ATNC is based on the concepts of adversarial learning and reinforcement learning. The model uses a recurrent neural network with external memory as a generator of molecular structures, and a special neural network block for selecting the generated molecules before their real estimation by the environment. A new objective reward function of internal clustering by diversity is proposed, which allows the model to generate more diverse chemistry. Comparative experiments have shown that the proposed ATNC model is better than its closest competitor in terms of generating unique and more complex valid molecular structures. It has also been demonstrated that the molecules generated by ATNC match to the a priori distributions of the key molecular descriptors of the training molecules. Experiments were conducted on a large dataset of 15 000 drug-like molecular compounds collected manually from the ChemDiv collection. **Practical relevance:** The proposed model can be used as an intelligent assistant in developing new drugs by medical chemists.

Keywords — Machine Learning, Deep Learning, Reinforcement Learning, Generative Adversarial Networks, Drug Design and Development.

Citation: Putin E. O., Shalyto A. A. Adversarial Threshold Neural Computer for Small Organic Molecular Structures. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 52–60 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-52-60

References

- LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep Learning. *Nature*, 2015, vol. 521, pp. 436–444. doi:10.1038/nature14539. Available at: <https://www.nature.com/articles/nature14539> (accessed 15 July 2018).
- Liu Q., et al. A Review of Image Recognition with Deep Convolutional Neural Network. *13th Intern. Conf. of Intelligent Computing*, Liverpool, 2017, pp. 69–80. doi:10.1007/978-3-319-63309-1
- Deng L., Liu Y. *Deep Learning in Natural Language Processing*. Singapore, Springer Singapore, 2018. 329 p. doi:10.1007/978-981-10-5209-5
- Schneider G., Fechner U. Computer-based De Novo Design of Drug-like Molecules. *Nature Reviews Drug Discovery*, 2005, vol. 4, pp. 649–663. doi:10.1038/nrd1799. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16056391> (accessed 15 July 2018).
- Min S., Lee B., Yoon S. Deep Learning in Bioinformatics. *Briefings in Bioinformatics*, 2016, vol. 15, iss. 1, pp. 851–869. doi:10.1093/bib/bbw068. Available at: <https://academic.oup.com/bib/article/18/5/851/2562808> (accessed 15 July 2018).
- Mamoshina P., Vieira A., Putin E., Zhavoronkov A. Applications of Deep Learning in Biomedicine. *Molecular Pharmaceutics*, 2016, vol. 13, pp. 1445–1454. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.5b00982. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27007977> (accessed 15 July 2018).
- Kleftogiannis D., Kalnis P., Bajic V. B. DEEP: A General Computational Framework for Predicting Enhancers. *Nucleic Acids Research*, 2014, vol. 43, pp. e6. doi:10.1093/nar/gku1058. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25378307> (accessed 15 July 2018).
- Kim S. G., Theera-Ampornpunt N., Fang C.-H., Harwani M., Grama A., Chaterji S. Opening up the Blackbox: An Interpretable Deep Neural Network-based Classifier for Cell-type Specific Enhancer Predictions. *BMC Systems Biology*, 2016, vol. 10, no. 54, pp. 244–258. doi:10.1186/s12918-016-0302-3. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4977478> (accessed 15 July 2018).
- Aliper A., Plis S., Artemov A., Ulloa A., Mamoshina P., Zhavoronkov A. Deep Learning Applications for Predicting Pharmacological Properties of Drugs and Drug Repurposing using Transcriptomic Data. *Molecular Pharmaceutics*, 2016, vol. 13, pp. 2524–2530. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.6b00248. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27200455> (accessed 15 July 2018).
- Xu Y., Pei J., Lai L. Deep Learning based Regression and Multiclass Models for Acute Oral Toxicity Prediction with Automatic Chemical Feature Extraction. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 2017, vol. 57, no. 11, pp. 2672–2685. doi:10.1021/acs.jcim.7b00244. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/29019671> (accessed 15 July 2018).
- Lenselink E. B., Dijke N., Bongers B., Papadatos G., Vlijmen H. W., Kowalczyk W., Ijzerman A. P., Westen G. J. Beyond the Hype: Deep Neural Networks Outperform Established Methods using a ChEMBL Bioactivity Benchmark Set. *Journal of Cheminformatics*, 2017, vol. 9, no. 45, pp. 1–14. doi:10.1186/s13321-017-0232-0. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1186/s13321-017-0232-0> (accessed 15 July 2018).
- Putin E., et al. Deep Biomarkers of Human Aging: Application of Deep Neural Networks to Biomarker Development. *Aging (Albany NY)*, 2016, vol. 8, no. 5, pp. 1021–1033. doi:10.18632/aging.100968. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/27191382> (accessed 15 July 2018).
- Kadurin A., et al. druGAN: An Advanced Generative Adversarial Autoencoder Model for De Novo Generation of New Molecules with Desired Molecular Properties in Silico. *Molecular Pharmaceutics*, 2017, vol. 14, no. 9, pp. 3098–3104. doi:10.1021/acs.molpharmaceut.7b00346. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/28703000> (accessed 15 July 2018).
- Weininger D. SMILES, A Chemical Language and Information System. 1. Introduction to Methodology and Encoding Rules. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 1988, vol. 28, no. 1, pp. 31–36. doi:10.1021/ci00057a005. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ci00057a005> (accessed 15 July 2018).
- Bjerrum E. J., Threlfall R. *Molecular Generation with Recurrent Neural Networks (RNNs)*. arXiv preprint arXiv:1705.04612, 2017. Available at: <https://arxiv.org/abs/1705.04612> (accessed 15 July 2018).
- Hochreiter S., Schmidhuber J. Long Short-term Memory. *Neural Computation*, 1997, vol. 9, no. 8, pp. 1735–1780. doi:10.1162/neco.1997.9.8.1735
- Cherti M., Kégl B., Kazakçı A. De Novo Drug Design with Deep Generative Models: An Empirical Study. *Intern. Conf. on Learning Representations*, Toulon, 2017. Available at: <https://pdfs.semanticscholar.org/9759/6bc50245f5e0f2d20bde6a8a13f2ac437619.pdf> (accessed 15 July 2018).
- Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y. Generative Adversarial Nets. *Advances in Neural Information Processing Systems*, Montreal, 2014, pp. 2672–2680.
- Yu L., Zhang W., Wang J., Yu Y. SeqGAN: Sequence Generative Adversarial Nets with Policy Gradient. *AAAI*, San Francisco, 2017, pp. 2852–2858.
- Williams R. J. Simple Statistical Gradient-following Algorithms for Connectionist Reinforcement Learning. *Machine Learning*, 1992, vol. 8, pp. 229–256. doi:10.1007/BF00992696
- Sanchez-Lengeling B., Outeiral C., Guimaraes G. L., Aspuru-Guzik A. *Optimizing Distributions over Molecular Space. An Objective-Reinforced Generative Adversarial Network for Inverse-design Chemistry (ORGANIC)*. ChemRxiv preprint: 5309668 2017. Available at: https://chemrxiv.org/articles/ORGANIC_1_pdf/5309668. (accessed 15 July 2018).
- Graves A., et al. Hybrid Computing using a Neural Network with Dynamic External Memory. *Nature*, 2016, vol. 538, no. 7626, pp. 471–476. doi:10.1038/nature20101
- Sutton R. S., Barto A. G. *Reinforcement Learning: An Introduction*. Cambridge, MIT Press, 1998. 322 p. doi:10.1109/TNN.1998.712192
- ChemDiv's Company Site. <http://www.chemdiv.com/> (accessed 15 July 2018).
- Muegge I. Selection Criteria for Drug-like Compounds. *Medicinal Research Reviews*, 2003, vol. 23, pp. 302–321. doi:10.1002/med.10041. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12647312> (accessed 15 July 2018).
- Wildman S. A., Crippen G. M. Prediction of Physicochemical Parameters by Atomic Contributions. *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, 1999, vol. 39, no. 5, pp. 868–873. doi:10.1021/ci990307l. Available at: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/ci990307l> (accessed 15 July 2018).
- Palm K., et al. Polar Molecular Surface Properties Predict the Intestinal Absorption of Drugs in Humans. *Pharmaceutical Research*, 1997, vol. 14, no. 5, pp. 568–571. Available at: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1012188625088> (accessed 15 July 2018).

МЕТОД АДАПТИВНОГО УПРАВЛЕНИЯ ЗАЩИТОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ДИНАМИКИ ДЕЙСТВИЙ НАРУШИТЕЛЯ

Г. И. Коршунов^{а, б}, доктор техн. наук, профессор, kgi@pantes.ru

В. А. Липатников^в, доктор техн. наук, профессор, lipatnikovanl@mail.ru

А. А. Шевченко^в, младший научный сотрудник, alex_pavel1991@mail.ru

Б. Ю. Малышев^в, старший оператор научной роты, bogdan160596@bk.ru

^а«ПантесГруп», Ириновский пр., д. 2, лит. А, Санкт-Петербург, 195248, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

^вВоенная академия связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Тихорецкий пр., 3,
Санкт-Петербург, 194064, РФ

Постановка проблемы: известные методы адаптивного управления защитой информационно-вычислительных сетей с применением специальных мер защиты в современных условиях недостаточно эффективны, так как учитывают только одну сторону информационного противоборства. **Цель:** разработка метода адаптивного управления защитой информационно-вычислительных сетей на основе анализа динамики действий нарушителя. **Результаты:** предложен метод адаптивного управления защитой информационно-вычислительной сети на основе использования результатов анализа динамики действий нарушителя, определении ситуационных параметров в противоборствующей обстановке при стохастической неопределенности. Метод включает мониторинг обстановки, оперативный контроль последовательности действий нарушителя, моделирование стратегии воздействия нарушителя, процесс определения ситуационных параметров с достоверным прогнозом стратегии вторжений. В процессе анализа администратор сети получает информацию о приоритетных целях нарушителя, используемых им средствах и уязвимостях сети. Это дает возможность оперативно принять меры по повышению защищенности сети и избежать ее компрометации. **Практическая значимость:** использование данного подхода позволяет поддерживать работоспособность автоматизированных систем менеджмента организации интегрированной структуры с учетом масштабирования при планировании и внесении в нее изменений в условиях информационного противоборства на требуемом уровне при динамике изменения множества угроз.

Ключевые слова — автоматизированная система, менеджмент организации, интегрированная структура, информационно-вычислительная сеть, компьютерные атаки, защита информации, оценка рисков, контейнерная виртуализация, проактивное управление, масштабирование, показатель защищенности.

Цитирование: Коршунов Г. И., Липатников В. А., Шевченко А. А., Малышев Б. Ю. Метод адаптивного управления защитой информационно-вычислительных сетей на основе анализа динамики действий нарушителя// Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 61–72. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-61-72

Citation: Korshunov G. I., Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A., Malyshev B. Y. Adaptive Management of Information Network Protection with Analysis of Intruder's Actions. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 61–72 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-61-72

Введение

В связи с быстрым развитием компьютерных технологий, в том числе сети Интернет, объединяющей разнородные сети, и переходом к информационному обществу проблема обеспечения информационной безопасности (ИБ) и построения автоматизированных систем менеджмента организации интегрированной структуры стала одной из наиболее актуальных [1]. К средствам защиты в настоящее время предъявляются более жесткие требования [2, 3].

Известны методы обеспечения необходимого уровня защищенности различных систем, например, способ управления ИБ информационно-вычислительной сети (ИВС) путем реализации ложной сети на основе выделенного сервера с кон-

тейнерной виртуализацией [4, 5]. Однако в этом случае при управлении ИВС не используются данные анализа динамики действий нарушителя. Также известен способ контроля уязвимостей при масштабировании автоматизированных систем менеджмента организации интегрированной структуры, который заключается в том, что управление ИБ основано на выявлении уязвимостей [6]. Данный способ является реактивным и не учитывает результатов анализа динамики действий нарушителя. С учетом быстрого развития способностей злоумышленников использование этого метода не обеспечит повышение защищенности разрабатываемых систем.

При исследовании известных способов защиты ИВС [7–10] недостаточное внимание уделено анализу динамики действий нарушителя, кото-

рые включают сценарии внешних и внутренних вторжений. Возникает противоречие между эффективными новыми средствами информационного вторжения и существующими способами защиты ИВС. Поэтому задача повышения защиты ИВС от вторжений со стороны нарушителей является актуальной.

Целью данной работы является повышение ИБ ИВС на основе метода, включающего анализ и прогноз действий нарушителя.

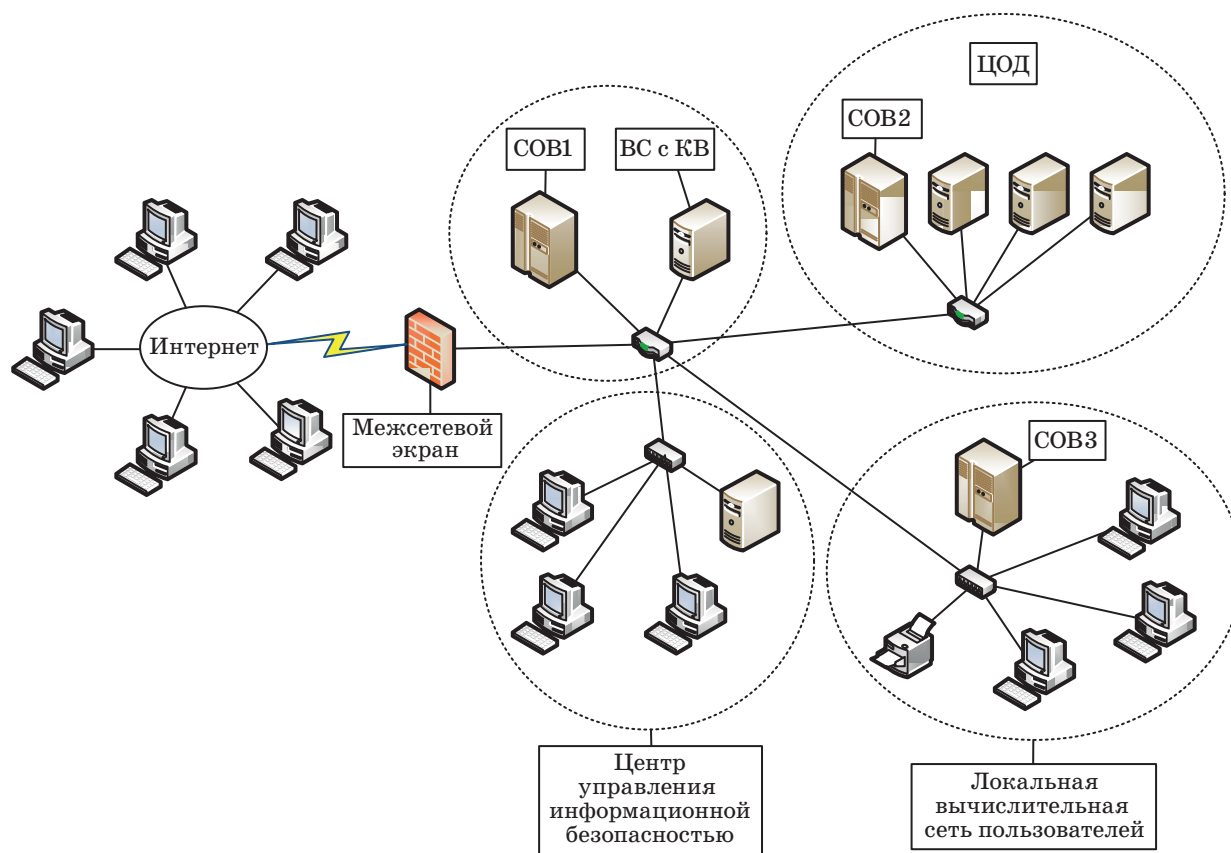
Разработка алгоритма адаптивного управления защитой ИВС на основе анализа динамики действий нарушителя и его экспериментальное тестирование

Представляется эффективной ИВС, имеющая топологию «Звезда» (рис. 1) в составе: межсетевого экрана, системы обнаружения вторжений *СОВ*, выделенного сервера с контейнерной виртуализацией *ВС с КВ*, центра обработки данных, коммутаторов и ЭВМ пользователей. Для решения задач защиты и мониторинга ИВС необходимо не только обнаруживать и блокировать действия нарушителей, но также анализировать атаки и отвлекать

нарушителей. Это достигается путем заманивая нарушителей на ложные информационные системы и сбора информации о тактике нарушителя, его идентификации и нейтрализации. Для сочетания достоверного анализа и прогнозирования динамики действий предложено адаптировать защиту ИВС и обеспечить повышение оперативности отслеживания фаз развития кризисных ситуаций. На основании результатов анализа деятельности нарушителя определяются слабые стороны системы защиты информации в ИВС.

Решение задачи заключается в анализе динамики действий нарушителя, обработке, определении уязвимостей системы защиты информации при использовании выделенного сервера с контейнерной виртуализацией, прогнозировании возможных вторжений, представлении данных для выбора оптимального решения по повышению вероятности защищенности ИВС с учетом подхода, описанного в работе [4]. Учитывается динамический характер модели нарушителя, поэтому процессы поиска и устранения уязвимостей в защите также динамически изменяются во времени.

Цифровой поток (ЦП), входящий и исходящий из сети Интернет, вначале проходит пред-



■ Рис. 1. Структура информационно-вычислительной сети
 ■ Fig. 1. Structure of the information network

варительную фильтрацию межсетевым экраном, после чего поступает в СОВ и анализируется на предмет наличия атак. В случае когда внутренний нарушитель пытается получить несанкционированный доступ к информационным ресурсам ИВС, происходит анализ запросов, и если критический параметр больше допустимого уровня, то ЦП перенаправляется на компоненты ложной информационной системы. Легитимные запросы, удовлетворяющие требованиям политик безопасности СОВ, перенаправляются на истинные информационные системы. Если СОВ не удалось обнаружить атаку на сетевом уровне, но при этом действия нарушителя были выявлены после их реализации на определенных хостах системы, осуществляется перенаправление последующего ЦП нарушителя на компоненты выделенного сервера с контейнерной виртуализацией.

Структура процесса мониторинга обстановки (рис. 2) показывает, что ЦП поступает в СОВ, далее происходит сканирование по заданным параметрам. СОВ выделяет из всего ЦП только тот, который попадает под определенные критерии. Затем происходит выделение признаков и их дальнейший анализ. Анализ осуществляется за счет уже имеющихся баз данных описания известных видов угроз. В случае соответствия ЦП критериям угроз производится анализ моделей угроз и принимается решение по способам защиты ИВС. Когда не удается однозначно определить, какого рода ЦП, то он отсеивается (блокируется) и перенаправляется на развернутую виртуальную сеть, и далее запросы такого рода анализируются, в результате принимаются меры по разрешению или запрету доступа. Далее производится обновление баз данных с добавлением новых видов угроз с учетом обнаруженных инцидентов.

Алгоритм функционирования ИВС включает в себя два параллельных процесса (рис 3).

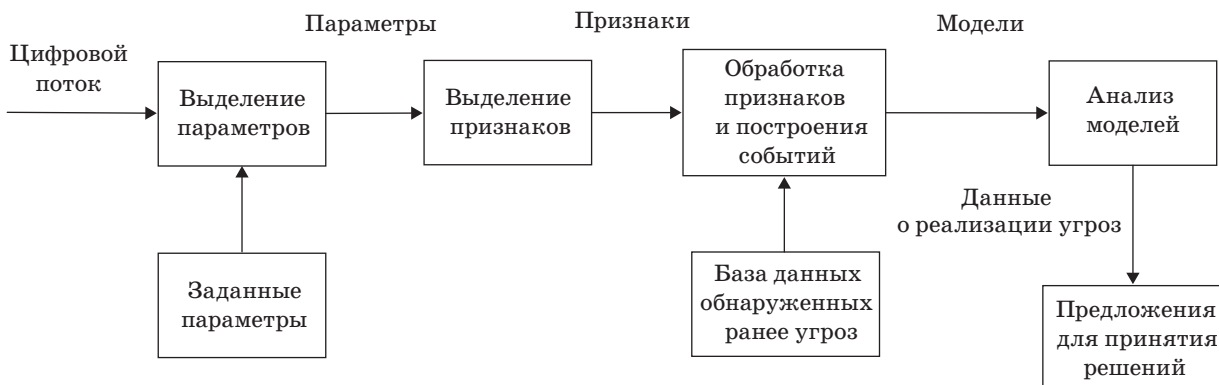
Первый процесс представляет собой тестирование ИВС и выявление уязвимостей. Данное действие представлено в статье [6] и реализовано в работе [9]. Второй процесс представляет собой анализ ЦП с выявлением аномалий и последующим анализом динамики действий нарушителя. Задача детального анализа корреляции действий нарушителя необходима для выявления их параметров, что позволит определить эффективность применения мер защиты на различных этапах. По результатам строится прогнозная модель угроз и выбираются средства защиты [11].

Обобщенный алгоритм анализа действий нарушителя для данного вида атак можно описать рис. 4.

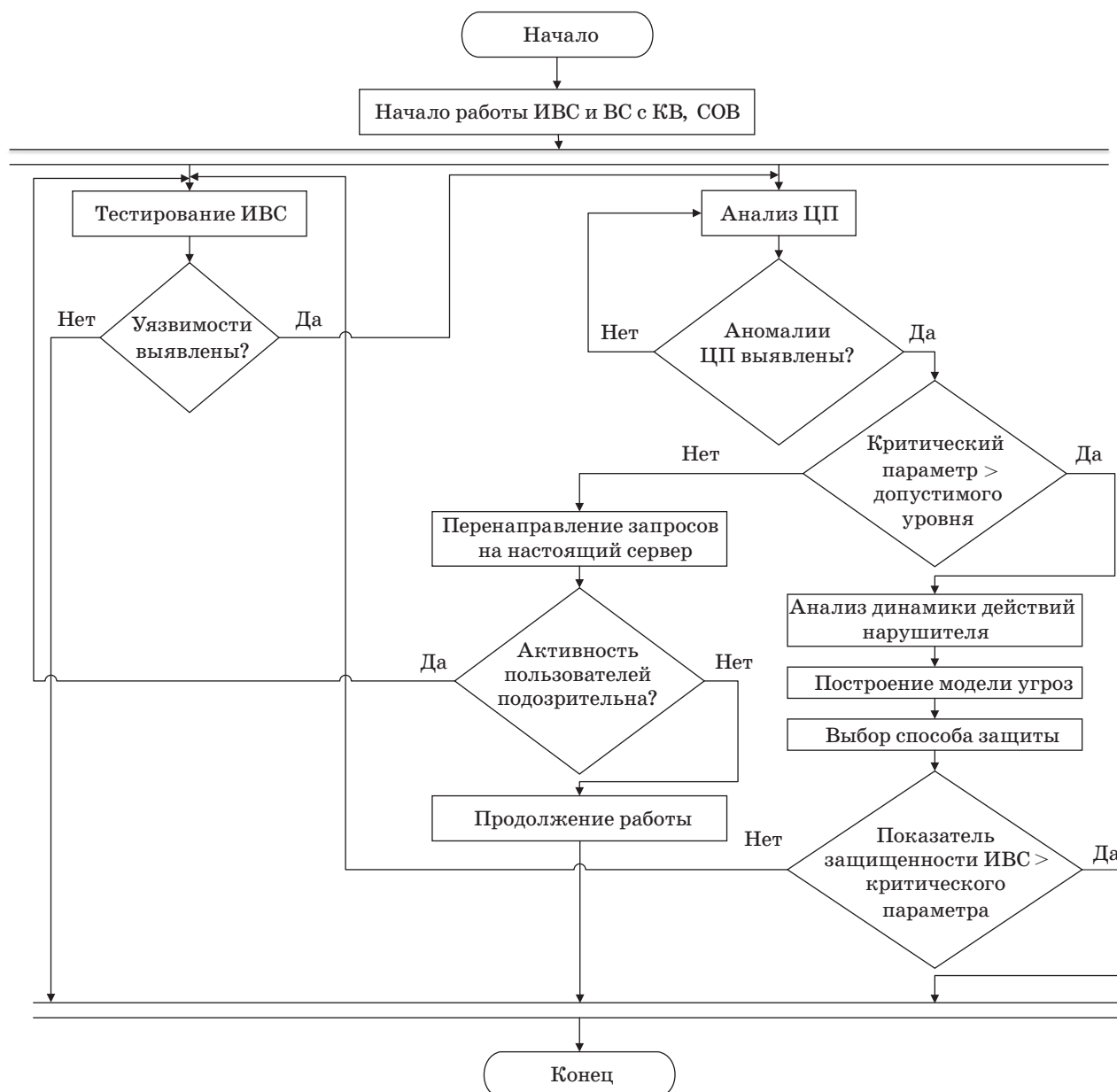
В соответствии с тем, обнаружены ли атаки на граничном хосте или нет, их можно разделить на два типа [12–20]: обнаруживаемые и не обнаруживаемые атаки.

Атаки первой группы блокируются граничным хостом, не достигая рабочих серверов. При обнаружении такого рода атак СОВ должна изменять свою конфигурацию, чтобы последующие действия нарушителя перенаправлялись на ложные информационные системы. К атакам второго вида относят атаки, параметры которых неизвестны, атаки внутренних нарушителей через терминалы пользователей. В таком случае действия нарушителя возможно выявить при анализе общего журнала регистрации событий (сообщений от системы контроля целостности файлов; изменений настроек устройств в ИВС). В ходе выявления в журнале регистрации этих событий действия нарушителя блокируются с оповещением администратора. На рис. 5 изображен граф событий действий нарушителя.

В качестве одной из возможных моделей предлагается представлять действия нарушителя как систему с переменной структурой, поведение которой на случайных интервалах времени харак-



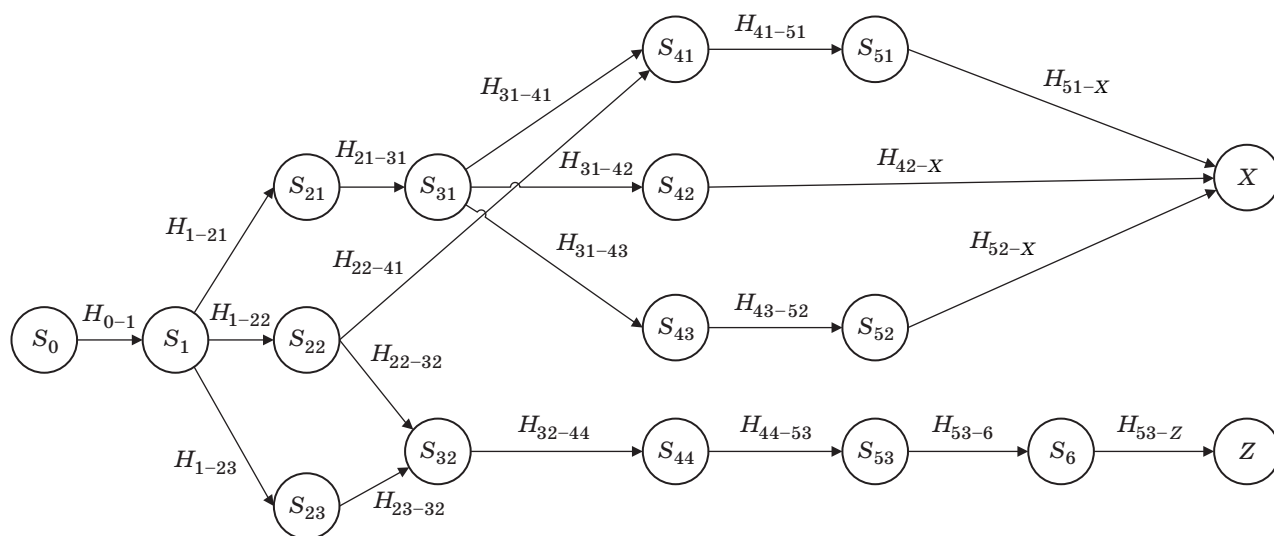
■ **Рис. 2.** Структура процесса мониторинга обстановки
 ■ **Fig. 2.** Structure of the process of monitoring the situation



■ *Рис. 3.* Обобщенный алгоритм функционирования ИВС
 ■ *Fig. 3.* Generalized algorithm for the operation of information network



■ *Рис. 4.* Общий алгоритм анализа действий нарушителя
 ■ *Fig. 4.* General algorithm for analyzing the actions of the intruder



■ Рис. 5. Граф событий действий нарушителя
 ■ Fig. 5. The graph of events of the actions of the intruder

теризуется различными структурами и описывается вероятностными законами [21, 22]. При этом переход одной структуры в другую происходит в случайный момент времени в зависимости от текущих фазовых координат системы, которые обозначены H_i .

Описания каждого события из графа на рис. 5 представлены в табл. 1.

Для разделения возможных сценариев развития событий мы будем использовать схему «дерева вероятностей». Каждая ветвь представляет собой отдельный сценарий развития [23]. На рис. 5 представлены семь путей для реализации угрозы хищения информации и отказа в обслуживании:

$$\begin{aligned}
 S_{x1} &= \{S_1, S_{21}, S_{31}, S_{41}, S_{51}, X\}; \\
 S_{x2} &= \{S_1, S_{21}, S_{31}, S_{42}, X\}; \\
 S_{x3} &= \{S_1, S_{21}, S_{31}, S_{43}, X\}; \\
 S_{x4} &= \{S_1, S_{21}, S_{31}, S_{43}, S_{52}, X\}; \\
 S_{x5} &= \{S_1, S_{22}, S_{41}, S_{51}, X\}; \\
 S_{z1} &= \{S_1, S_{22}, S_{32}, S_{44}, S_{53}, S_6, Z\}; \\
 S_{z2} &= \{S_1, S_{23}, S_{32}, S_{44}, S_{53}, S_6, Z\}.
 \end{aligned}$$

Определим коэффициенты реализуемости событий (элементов графа) для установления динамики действий нарушителя, воспользовавшись методикой, представленной в работе [24].

В данной методике исходная защищенность определяется по ранжированию в зависимости от суммы предъявляемых критериев:

0 — для высокой степени исходной защищенности;

■ Таблица 1. Описание событий действий нарушителя
 ■ Table 1. Description of events of the actions of the intruder

Событие	Описание
S_0	Защищенное состояние ИВС (без действий нарушителя)
S_1	Начало действий нарушителя
S_{21}	Измерение характеристик ИВС путем внедрения сниффера
S_{22}	Тестирование состояния ИВС путем анализа запросов
S_{23}	Анализ «эхо-запросов»
S_{31}	Анализ исходящего цифрового потока
S_{32}	Выявление хостов
S_{41}	Выявление паролей
S_{42}	Дешифрование информации
S_{43}	Несанкционированное использование авторизованного IP-адреса в сети
S_{44}	Сканирование портов
S_{51}	Подмена пользователя в сети
S_{52}	Изменение целостности, доступности и конфиденциальности информации
S_{53}	Анализ характеристик приложений
S_6	Осуществление DDoS-атак
X	Реализация угрозы хищения информации
Z	Реализация отказа в обслуживании

5 — для средней степени исходной защищенности;

10 — для низкой степени исходной защищенности.

А для определения коэффициента реализации угрозы используют следующие шкалы ранжирования:

0 — для маловероятной реализации угрозы;

2 — для низкой вероятности реализации угрозы;

5 — для средней вероятности реализации угрозы;

10 — для высокой вероятности реализации угрозы.

Такой тип ранжирования не подходит для более точного получения результата, поэтому при оценке исходной защищенности и определении коэффициента реализации угрозы воспользуемся десятибалльной шкалой с единичными делениями:

$$G = \frac{Y_1 + Y_2}{20}, \quad (1)$$

где Y_1 — коэффициент исходной защищенности; Y_2 — коэффициент реализации угрозы.

Время перехода из одного события в другое зависит от коэффициента реализуемости события:

$$T_i = T_{\max j} - G_i \times T_{\text{исх } ij}, \quad (2)$$

где $T_{\max j}$ — максимальное время реализации j -го события ($T_{\max j} = 24$ ч); G_i — коэффициент реализуемости S_i -го события; $0 \leq G_i \leq 1$; $T_{\text{исх } ij}$ — исходное время перехода из i -го события в j -е событие ($T_{\text{исх } ij}$ от 0 до 24 ч).

Применяя подход, описанный в работе [25], составляем производящую функцию для графа на рис. 5 на примере пути S_{x1} :

$$H_{\text{угр}} = H_{0-1} \times H_{1-21} \times H_{21-31} \times H_{31-41} \times H_{41-51} \times H_{51-x}, \quad (3)$$

где $H_y = P_y \cdot x^{T_y}$, а P_y — вероятность перехода из одного состояния в другое; T_y — время, необходимое для перехода из одного состояния в другое; x — весовой коэффициент (от 0 до 1).

Вероятность реализации угрозы, согласно графу, для пути S_{x1} определяется в виде

$$P_{\text{угр}} = H_{\text{угр}}(x=1) = P_{0-1} \times P_{1-21} \times P_{21-31} \times P_{31-41} \times P_{41-51} \times P_{51-x}. \quad (4)$$

Вероятность защищенности определяется по формуле

$$P_{\text{защ}} = 1 - P_{\text{угр}}. \quad (5)$$

По методике, представленной в работе [24], и формулам (1)–(5) рассчитываются время и вероятность перехода из одного события в другое, представленные в табл. 2.

Из графика зависимости защищенности от вероятности начала действий нарушителя (рис. 6) видно, что даже при малой вероятности начала действий нарушителя $P_{0-1} = 0,4$ вероятность защищенности $P_{\text{защ}}$ будет ниже требований уровня 0,95. Тем самым реализация угрозы по пути S_{x2} будет наиболее вероятной и привлекательной с точки зрения нарушителя, поэтому администратору безопасности необходимо устранить «бреши» в защите, которые приведут к реализации угрозы хищения информации по пути S_{x2} . Данный метод позволяет расставить приоритеты при организации защиты информации.

Зависимость вероятности реализации угрозы и вероятности защищенности ИВС от времени для реализации метода адаптивного управления защитой ИВС на основе анализа динамики действий нарушителя показана на рис. 7, где S_{x2} — последовательность действий нарушителя для реализации угрозы X ; P_3 — уровень ИБ ИВС; t_1, t_2, t_3, t_4 — время; S_{3i} — график зависимости защищенности ИВС от вероятности реализации угрозы; S_{x2i} — зависимость действий нарушителя от принятых мер защиты.

В промежуток времени t_1 происходит внедрение sniffера. В момент времени t_2 происходит обнаружение СОВ данного воздействия, при этом уровень защищенности падает. В дальнейшем происходит построение модели угроз. Затем принимаются меры по нейтрализации угрозы, которая была обнаружена с принятием актуальных мер защиты объектов ИВС, которые будут атакованы нарушителем в ближайшее время согласно графу действий нарушителя.

После принятия в момент t_4 мер защиты реализация следующего воздействия нарушителя S_{31} уже невозможна в силу снижения вероятности реализации угрозы до нуля, защищенность вернется на уровень 95 %.

Процесс проактивного обнаружения вторжений основывается на превентивном анализе запросов и удовлетворении их критериям, при этом сравнение производится не только по идеальным моделям и критериям ранее обнаруженных угроз, но также и при помощи построения путей реализации угрозы, позволяющих определить динамику действий нарушителя.

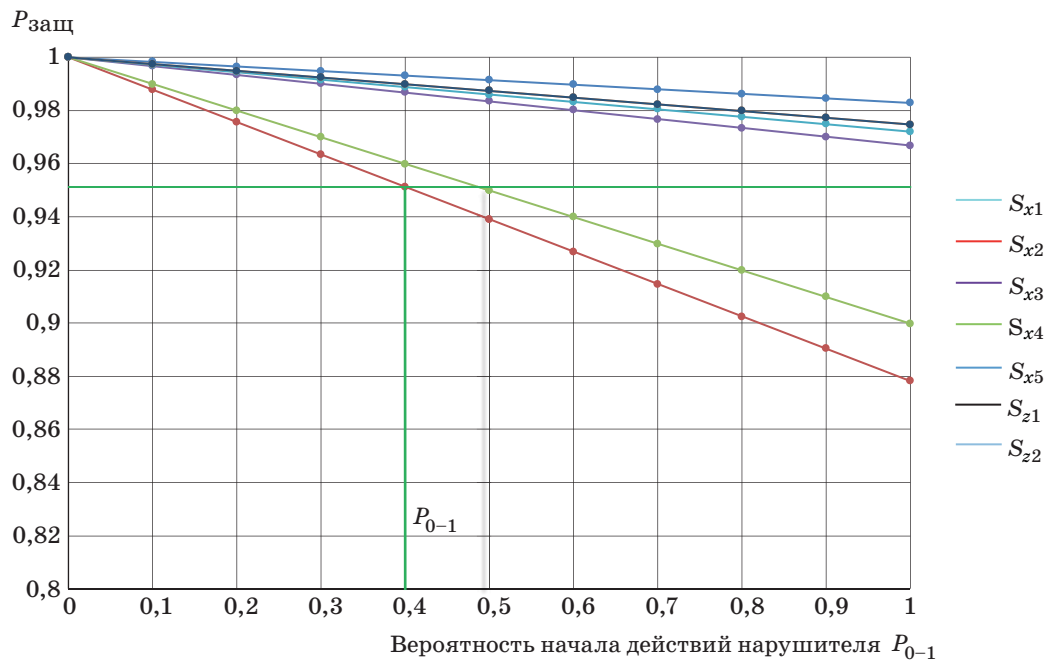
На основе методике, изложенной в работе [4], в табл. 3 приведены результаты расчета времени реализации угрозы хищения информации X по пути P_{x1} , полученные методами адаптивного и традиционного управления защитой ИВС.

При использовании адаптивного метода защиты ИВС нарушитель потратит на 7 % больше

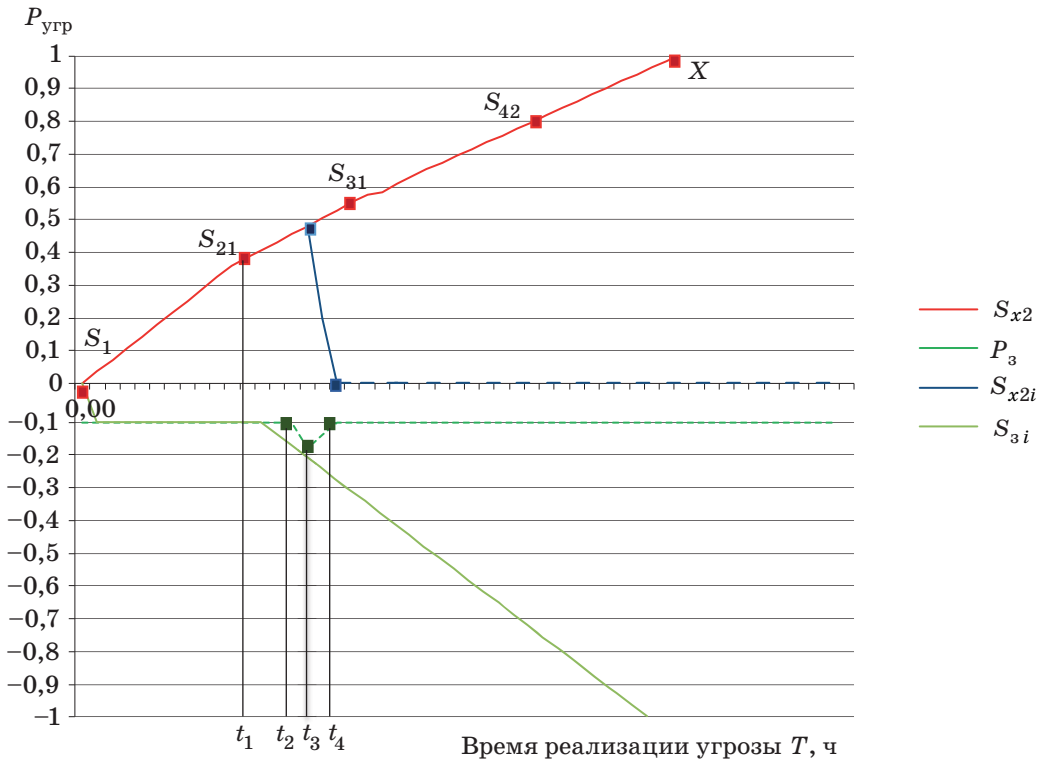
■ **Таблица 2.** Время и вероятность перехода из одного события в другое

■ **Table 2.** Time and probability of transition from one event to another

Путь S_{x1}	События	S_1	S_{21}	S_{31}	S_{41}	S_{51}	X	
	Время перехода одного события в другое $T, ч$	14,4	12,48	12,77	13,79	11,6	18,2	
	Вероятность перехода из одного состояния в другое	0,4	0,48	0,47	0,43	0,52	0,24	
Путь S_{x2}	События	S_1	S_{21}	S_{31}	S_{42}	X		
	Время перехода одного события в другое $T, ч$	14,4	12,48	12,77	16,34	15,8		
	Вероятность перехода из одного состояния в другое	0,4	0,48	0,47	0,32	0,34		
Путь S_{x3}	События	S_1	S_{21}	S_{31}	S_{43}	X		
	Время перехода одного события в другое $T, ч$	14,4	12,48	12,77	17,62	15,19		
	Вероятность перехода из одного состояния в другое	0,4	0,48	0,47	0,27	0,37		
Путь S_{x4}	События	S_1	S_{21}	S_{31}	S_{43}	S_{52}	X	
	Время перехода одного события в другое $T, ч$	14,4	12,48	12,77	17,62	15,19	16,41	
	Вероятность перехода из одного состояния в другое	0,4	0,48	0,47	0,27	0,37	0,32	
Путь S_{x5}	События	S_1	S_{22}	S_{41}	S_{51}	X		
	Время перехода одного события в другое $T, ч$	14,4	12,48	14,02	11,39	18,31		
	Вероятность перехода из одного состояния в другое	0,4	0,48	0,42	0,52	0,24		
Путь S_{z1}	События	S_1	S_{21}	S_{32}	S_{44}	P_{53}	P_6	Z
	Время перехода одного события в другое $T, ч$	14,4	11,04	16,82	8,86	16,03	11,18	16,73
	Вероятность перехода из одного состояния в другое	0,4	0,54	0,3	0,63	0,33	0,53	0,3
Путь S_{z2}	События	S_1	S_{23}	S_{32}	S_{44}	S_{53}	S_6	Z
	Время перехода одного события в другое $T, ч$	14,4	14,64	14,48	10,97	14,13	12,69	15,75
	Вероятность перехода из одного состояния в другое	0,4	0,39	0,4	0,54	0,41	0,47	0,44



■ **Рис. 6.** Зависимость показателя защищенности $P_{защ}$ от вероятности начала действий нарушителя P_{0-1}
 ■ **Fig. 6.** Dependencies of probability of realization of threats $P_{защ}$ from probability of transition from one state to another P_{0-1}



■ **Рис. 7.** Зависимости вероятности реализации угрозы и вероятности защищенности ИВС от времени при реализации метода адаптивного управления защитой с анализом динамики действий нарушителя
 ■ **Fig. 7.** Dependence of the probability of the threat realization and the probability of the ITT's protection against time for implementing the method of adaptive management of the IVS defense based on the analysis of the dynamics of the violator's actions

■ **Таблица 3.** Сравнение предлагаемого и традиционного методов защиты ИВС

■ **Table 3.** Comparison of proposed and traditional methods of protection of information network

Событие	Коэффициент реализуемости события при методе управления защитой ИВС		Время перехода из одного события в другое, ч, при методе управления защитой ИВС	
	адаптивным	традиционным	адаптивным	традиционным
S_1	0,8	0,8	14,4	14,4
S_{21}	0,8	0,9	12,48	11,04
S_{31}	0,9	0,9	12,77	14,06
S_{41}	0,8	0,8	13,79	12,75
S_{51}	0,9	0,9	11,6	12,52
X	0,5	0,9	18,2	12,73
Время реализации угрозы			82,64	77,5

времени на реализацию угрозы хищения информации, чем при использовании традиционного метода управления защитой ИВС, что и является положительным эффектом предлагаемого метода защиты ИВС.

Заключение

Разработан метод адаптивного управления защитой ИВС автоматизированной системы менеджмента организации интегрированной структуры, отличающийся от известных тем, что предложено применять результаты превентив-

ного анализа динамики действий нарушителя. Данный метод включает мониторинг обстановки, оперативный контроль, распознавание последовательности действий нарушителя, моделирование стратегии воздействия нарушителя, процесс определения ситуационных параметров во взаимной противоборствующей обстановке с достоверным прогнозом стратегии вторжений.

Представлен алгоритм контроля ситуационных параметров при стохастической неопределенности. Предложена архитектура прототипа ИВС, а также сценарии экспериментов, проводимых с прототипом. Рассмотрены текущее состояние и процедура анализа динамики действий нарушителя. Этот подход возможно реализовать на программной эмуляции компонентов информационной системы введения нарушителя в заблуждение:

- 1) сегмента сети — где производится эмулирование работы выделенного сервера с контейнерной виртуализацией (дубликат сети с рабочими серверами);
- 2) дубликата хоста рабочих серверов (хост-приманка);
- 3) дубликата сервисов и приложений — программ, которые копируют работу сервисов и приложений.

Управление превентивной защитой ИВС на основе результатов анализа динамики действий нарушителя ведет администратор безопасности. Выделенный сервер с контейнерной виртуализацией и СОВ могут поддерживаться стандартными операционными системами, включаться как дополнительные средства в действующие системы безопасности, повышая вероятность защищенности ИВС.

Приведены экспериментальные результаты аналитического моделирования, которые показали, что предложенный подход обеспечивает требуемый уровень достоверности принимаемых решений, что позволяет повысить вероятностно-временные характеристики работы ИВС.

Литература

1. Андрианов В. И., Красов А. В., Липатников В. А. Инновационное управление рисками информационной безопасности. — СПб.: СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, 2012. — 396 с.
2. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001-2006 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования. <http://docs.cntd.ru/document/1200058325> (дата обращения: 6.08.2018).
3. ГОСТ Р ИСО/МЭК 13335-1-2006 Информационная технология (ИТ). Методы и средства обеспечения

- безопасности. Часть 1. Концепция и модели менеджмента безопасности информационных и телекоммуникационных технологий (с Поправкой). <http://docs.cntd.ru/document/1200048398> (дата обращения: 6.08.2018).
4. Липатников В. А., Шевченко А. А., Яцкин А. Д., Семенова Е. Г. Управление информационной безопасностью организации интегрированной структуры на основе выделенного сервера с контейнерной виртуализацией // Информационно-управляющие системы. 2017. № 4. С. 67–76. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.67
5. Лукацкий А. Обнаружение атак. — СПб.: БХВ-Петербург, 2008. — 304 с.

6. **Липатников В. А., Шевченко А. А.** Способ контроля уязвимостей при масштабировании автоматизированной системы менеджмента предприятия интегрированной структуры // Информационные системы и технологии. 2016. № 2(94). С. 128–140.
7. **Ivo Batina.** Model Predictive Control for Stochastic Systems by Randomized Algorithms. — Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 2004. — 157 p.
8. **Byres E., Lowe J.** The Myths and Facts Behind Cyber Security Risk for Industrial Control Systems // ISA Process Control Conf., 2003. P. 1–6. https://www.controlglobal.com/assets/Media/MediaManager/The_Myths_and_Facts_behind_Cyber_Security_Risks.pdf (дата обращения: 6.08.2018).
9. Пат. 2635256 РФ, МПК⁵¹ G06F 12/14. Способ защиты информационно-вычислительной сети от несанкционированных воздействий / В. В. Карганов, С. В. Костарев, В. А. Липатников, А. И. Лобашев, А. А. Шевченко; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное казенное образовательное учреждение высшего образования «Военная академия связи имени Маршала Советского Союза С. М. Буденного» Министерства обороны Российской Федерации. — № 2016117662; заявл. 04.05.2016; опубл. 09.11.2017, Бюл. № 31. — 2 с.
10. **Кузнецов И. А., Липатников В. А., Шевченко А. А.** Способ многофакторного управления безопасностью информационно-телекоммуникационной сети системы менеджмента качества предприятий интегрированных структур// Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 6. С. 23–28.
11. **Baddar S. A.-H., Merlo A., Migliardi M.** Anomaly Detection in Computer Networks: A State-of-the-Art Review//Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications. 2014. Vol. 5. N 4. P. 29–64.
12. **Brindasri S., Saravanan K.** Evaluation of Network Intrusion Detection using Markov Chain//International Journal on Cybernetics & Informatics (IJCI). 2014. Vol. 3. N 2. P. 11–20.
13. **Babaie T., Chawla S., Ardon S.** Network Traffic Decomposition for Anomaly Detection. 2014. <http://arxiv.org/pdf/1403.0157.pdf> (дата обращения: 06.08.2018).
14. **Mazurek M., Dymora P.** Network Anomaly Detection based on the Statistical Selfsimilarity Factor for HTTP Protocol//Przeegląd Elektrotechniczny. 2014. Vol. 90. N 1. P. 127–130.
15. **Japertas S., Cincikas G.** Company's Information and Telecommunication Networks Security Risk Assessment Algorithm. <http://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/download/1648/1425> (дата обращения: 06.08.2018).
16. **Suricata.** Open Source IDS/IPS/NSM Engine. <http://suricata-ids.org/> (дата обращения: 6.08.2018).
17. **Ranjan R., Sahoo G.** A New Clustering Approach for Anomaly Intrusion Detection//International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process (IJDKP). 2014. Vol. 4. N 2. P. 29–38.
18. **Sheth H., Shah B., Yagnik S.** A Survey on RBF Neural Network for Intrusion Detection System//International Journal of Engineering Research and Applications. 2014. Vol. 4. P. 17–22.
19. **Pawar S. N.** Intrusion Detection in Computer Network using Genetic Algorithm Approach: A Survey//International Journal of Advances in Engineering & Technology. 2013. Vol. 6. Iss. 2. P. 730–736.
20. **Dave M. H., Sharma S. D.** Improved Algorithm for Intrusion Detection using Genetic Algorithm and SNORT//International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering. 2014. P. 273–276.
21. **Браницкий А. А., Котенко И. В.** Анализ и классификация методов обнаружения сетевых атак // Тр. СПИИРАН. 2016. Вып. 2(45). С. 207–243.
22. **Ryan J., Lin M.-J.** Intrusion Detection with Neural Networks // Advances in Neural Information Processing Systems: Proc. of Conf. 1998. P. 943–949.
23. **Tan K.** The Application of Neural Networks to UNIX Computer Security // Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Neural Networks. 1995. Vol. 1. P. 476–481.
24. **ФСТЭК.** Методика определения актуальных угроз безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах. <https://fstec.ru/component/attachments/download/290> (дата обращения: 6.08.2018).
25. **Липатников В. А., Шевченко А. А.** Модель процесса управления информационной безопасностью распределенной информационной системы на основе выявления и оценки уязвимостей // Информационные системы и технологии. 2018. № 1 (105). С. 114–123.

UDC 004.7, 004.056, 004.056.5

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-61-72

Adaptive Management of Information Network Protection with Analysis of Intruder's ActionsKorshunov G. I.^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Professor, kgi@pantes.ruLipatnikov V. A.^c, Dr. Sc., Tech., Professor, lipatnikovanl@mail.ruShevchenko A. A.^c, Junior Researcher, alex_pavel1991@mail.ruMalyshev B. Y.^c, Science Company Senior Operator, bogdan160596@bk.ru^aPantes, Ltd, Irinovskij Ave., 2, Let. A, 195248, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^cS. M. Budyonny Military Academy of Telecommunication, 3, Tikhoretskii Ave., 194064, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The known methods of adaptive management of information network protection with special security measures are not effective enough in modern conditions, as they only take into account collected and processed data on security events and do not analyze the dynamics of the actions. **Purpose:** Developing a method of adaptive control of information network protection based on the analysis of violator's actions. **Results:** A method has been proposed for adaptive management of information network protection. Unlike other known methods, it is based on analyzing the dynamics of the violator's actions and determining the situational confrontation parameters under stochastic uncertainty. The method includes situation monitoring, operational control of the sequence of violator's actions, modeling the attacker's strategy, determining the situational parameters with a reliable prediction of the intrusion strategy. During the analysis, the network administrator receives information about the priority purposes of an intruder, the tools used and the vulnerabilities of the network. This provides an opportunity to promptly take measures to increase the security of the network and avoid its compromise. **Practical relevance:** This approach allows you to maintain the operation of automated management systems for an organization with integrated structure, taking into account the scaling in planning and making changes to the structure on the background of information confrontation at the required level when multiple threats are changing their dynamics.

Keywords — Automated System, Management for an Organization, Integrated Structure, Information and Computer Network, Computer Attacks, Data Protection, Risk Assessment, Container Virtualization, Proactive Management, Scaling, Security Index.

Citation: Korshunov G. I., Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A., Malyshev B. Y. Adaptive Management of Information Network Protection with Analysis of Intruder's Actions. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 61–72 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-61-72

References

- Andrianov V. I., Krasov A. V., Lipatnikov V. A. *Innovatsionnoe upravlenie riskami informatsionnoj bezopasnosti* [Innovative Management of Information Security Risks]. Saint-Petersburg, SPbGUT im. prof. M. A. Bonch-Bruевичa Publ., 2012. 396 p. (In Russian).
- State Standard R ISO/MEHK 27001-2006. Information Technology. Methods of Protection. Information Security Management Systems. Requirements. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200058325> (accessed 6 August 2018).
- State Standard R ISO/MEHK 13335-1-2006. Information Technology. Methods and Means of Ensuring Security. Part 1. The Concept and Models of Security Management of Information and Telecommunication Technologies. Available at: <http://docs.cntd.ru/document/1200048398> (accessed 6 August 2018).
- Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A., Yatskin A. D., Semenova E. G. Information Security Management of Integrated Structure Organization based on a Dedicated Server with Container Virtualization. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 4, pp. 67–76 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.4.67
- Lukatsky A. *Obnaruzhenie atak* [Detection of Attacks]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2008. 304 p. (In Russian).
- Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A. A Way to Control Vulnerabilities when Scaling an Automated Enterprise Management System of an Integrated Structure. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technologies], 2016, no. 2 (94), pp. 128–140 (In Russian).
- Ivo Batina. *Model Predictive Control for Stochastic Systems by Randomized Algorithms*. Eindhoven, Technische Universiteit Eindhoven, 2004. 157 p.
- Byres E., Lowe J. The Myths and Facts Behind Cyber Security Risk for Industrial Control Systems. *ISA Process Control Conference*, 2003, pp. 1–6. Available at: https://www.controlglobal.com/assets/Media/MediaManager/The_Myths_and_Facts_behind_Cyber_Security_Risks.pdf (accessed 6 August 2018).
- Karganov V. V., et al. *Sposob zashchity informatsionno-vychislitel'noj seti ot nesanktsionirovannykh vozdeystvii* [A Way to Protect the Information Network from Unauthorized Influences]. Patent RF, no. 2016117662, 2017.
- Kuznetsov I. A., Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A. The Way of Multifactor Management of the Security of the Information and Telecommunications Network of the Quality Management System of Enterprises of Integrated Structures. *Voprosy radioelektroniki* [Questions of Radio Electronics], 2016, no. 6, pp. 23–28 (In Russian).
- Baddar S. A.-H., Merlo A., Migliardi M. Anomaly Detection in Computer Networks: A State-of-the-Art Review. *Journal of Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, 2014, vol. 5, no. 4, pp. 29–64.
- Brindasri S., Saravanan K. Evaluation of Network Intrusion Detection using Markov Chain. *International Journal on Cybernetics & Informatics (IJCI)*, 2014, vol. 3, no. 2, pp. 11–20.
- Babaie T., Chawla S., Ardon S. *Network Traffic Decomposition for Anomaly Detection*. 2014. Available at: <http://arxiv.org/pdf/1403.0157.pdf> (accessed 6 August 2018).
- Mazurek M., Dymora P. Network Anomaly Detection based on the Statistical Selfsimilarity Factor for HTTP Protocol. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014, vol. 90, no. 1, pp. 127–130.
- Japertas S., Cincikas G. *Company's Information and Telecommunication Networks Security Risk Assessment Algorithm*. Available at: <http://www.eejournal.ktu.lt/index.php/elt/article/download/1648/1425> (accessed 6 August 2018).
- Suricata. *Open Source IDS/IPS/NSM Engine*. Available at: <http://suricata-ids.org/> (accessed 6 August 2018).
- Ranjan R., Sahoo G. A New Clustering Approach for Anomaly Intrusion Detection. *International Journal of Data Mining & Knowledge Management Process (IJDKP)*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 29–38.
- Sheth H., Shah B., Yagnik S. A Survey on RBF Neural Network for Intrusion Detection System. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, vol. 4, pp. 17–22.

19. Pawar S. N. Intrusion Detection in Computer Network using Genetic Algorithm Approach: A Survey. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 2013, vol. 6, iss. 2, pp. 730–736.
20. Dave M. H., Sharma S. D. Improved Algorithm for Intrusion Detection using Genetic Algorithm and SNORT. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 2014, pp. 273–276.
21. Branitsky A. A., Kotenko I. V. Analysis and Classification of Methods for Detecting Network Attacks. *Trudy SPIIRAN [SPIIRAS Proceedings]*, 2016, vol. 2 (45), pp. 207–243 (In Russian).
22. Ryan J., Lin M.-J. Intrusion Detection with Neural Networks. *Proc. of conf. "Advances in Neural Information Processing Systems"*, 1998, pp. 943–949.
23. Tan K. The Application of Neural Networks to UNIX Computer Security. *Proc. of the IEEE Intern. Conf. on Neural Networks*, 1995, vol. 1, pp. 476–481.
24. FSTEHK. *Metodika opredeleniya aktual'nykh ugroz bezopasnosti personal'nykh dannykh pri ikh obrabotke v informatsionnykh sistemakh* [Methodology for Determining Actual Threats to the Security of Personal Data when Processing them in Information Systems]. Available at: <https://fstec.ru/component/attachments/download/290> (accessed 6 August 2018).
25. Lipatnikov V. A., Shevchenko A. A. Model of Information Security Management Process of Distributed Information System based on Vulnerability Detection and Evaluation. *Informatsionnye sistemy i tekhnologii* [Information Systems and Technologies], 2018, no. 1 (105), pp. 114–123 (In Russian).

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. Предоставляйте подписночные подписи и названия таблиц на русском и английском языках.

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 (*.vsd, *.vsdx); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.docx); Adobe Illustrator (*.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 формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

Наличие подписночных 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

Сайт: www.i-us.ru

RANDOM CODING BOUND FOR CHANNELS WITH MEMORY — DECODING FUNCTION WITH PARTIAL OVERLAPPING

Part 2. Examples and Discussion

A. N. Trofimov^a, PhD, Tech., Associate Professor, andrei.trofimov@vu.spb.ru

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Suboptimal random coding exponent $E_r^*(R; \psi)$ for a wide class of finite-state channel models using a mismatched decoding function ψ was obtained and presented in the first part of this work. We used ψ function represented as a product of a posteriori probabilities of non-overlapped input subblocks of length $2B+1$ relative to the overlapped output subblocks of length $2W+1$. It has been shown that the computation of function $E_r^*(R; \psi)$ is reduced to the calculation of the largest eigenvalue of a square non-negative matrix of an order depending on the B and W values. **Purpose:** To illustrate the approach developed in the first part of this study with its application to various channel modelled as a probabilistic finite-state machine. **Results:** We consider channels with state transitions not depending on the input symbol (channels with freely evolving states), and channels with deterministic state transitions, in particular, intersymbol interference channels. We present and discuss numerical results of calculating this random coding exponent in a full range of code rates for some of channel models for which similar results were not obtained before. Practical computations were carried out for relatively small values of B and W . Nevertheless, even for small values of these parameters a good correspondence with some known results for optimal decoding was shown.

Keywords — Random Coding Bound Exponent, Finite-State Channel Model, Mismatched Decoding, Perron — Frobenius Theorem, Intersymbol Interference Channel.

Citation: Trofimov A. N. Random Coding Bound for Channels with Memory — Decoding Function with Partial Overlapping. Part 2. Examples and Discussion. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 73–85. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-73-85

Introduction

This paper is the second part of the work, the first part of which is published earlier [1]. In the previous part, a random coding bound is presented for a wide class of channels with memory, including those for which this bound could not be managed to obtain. The basic idea is to apply a *suboptimal* decoding rule that is different from the maximum likelihood (ML) decoding. In this part, we give numerical examples of the application of this boundary and their discussion.

For the connectedness of the exposition, we give the definitions and the main result of the previous part of the paper. Let $p_{y|x}(y|x)$ be transition probability of the discrete-time channel; for the continuous-output channel it is instead a probability density function (p. d. f.); $\mathbf{x} \in X^N$, where X be a discrete input channel alphabet and $q_x = |X| < \infty$; $\mathbf{y} \in Y^N$, where Y is the channel output alphabet, $|Y| = q$ and N is the length of a block code.

To indicate a segment of an arbitrary vector \mathbf{z} we use the notation $\mathbf{z}_a^b = (z^{(\max(1,a))}, z^{(\max(1,a)+1)}, \dots, z^{(\min(b,L))})$, where L is length of the vector \mathbf{z} .

For subvectors, or segments of vectors, \mathbf{x} and \mathbf{y} the notation \mathbf{x} and \mathbf{y} is used. The difference between them is noted due to the use of ordinary and *sans serif* font.

The decoding rule is given as

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} \psi(\mathbf{y}; \mathbf{x}),$$

where $\psi(\mathbf{y}; \mathbf{x})$ is a real-valued positive decoding function, and the maximization is performed over all code words.

For simplicity we assume that code ensemble is generated by using of independent uniformly distributed (i. u. d.) code symbols. This assumption leads to *loss of optimality* but simplifies further consideration. Using the classic approach [2] one can derive the suboptimal exponent of the random coding bound in *asymptotic form*

$$E_r^*(R; \psi) = \max_{1 \geq \rho \geq 0} \left(\max_{\lambda > 0} E_0^*(\psi, \rho, \lambda) - \rho R \right),$$

where

$$E_0^*(\psi, \rho, \lambda) = (1 + \rho) \log q_x - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \log \sum_{\mathbf{y}} \sum_{\mathbf{x}} p_{y|x}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) \psi(\mathbf{y}; \mathbf{x})^{-\lambda \rho} \left(\sum_{\mathbf{x}'} \psi(\mathbf{y}; \mathbf{x}')^\lambda \right)^\rho.$$

Hereafter $\log(\cdot)$ denotes the binary logarithm, the asterisk in the superscript hereafter means that the code symbols are chosen as i. u. d. random variables.

Similarly one can get the random coding exponent for ML decoding for fixed code length N

$$E_r^*(N, R) = \max_{1 \geq \rho \geq 0} (E_0^*(N, \rho) - \rho R), \quad (1)$$

where

$$E_0^*(N, \rho) = (1 + \rho) \log q_x - \frac{1}{N} \log \sum_{\mathbf{y}} \left(\sum_{\mathbf{x}} p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x})^{1+\rho} \right)^{\frac{1}{1+\rho}} \quad (2)$$

with the bound for maximum information rate

$$R_{\max}^*(N) = \left. \frac{\partial E_0^*(N, \rho)}{\partial \rho} \right|_{\rho=0},$$

where $R_{\max}^*(N) \leq C$, where C is channel capacity. Evidently, the inequality $E_r^*(R; \psi) \leq E_r^*(R)$ is valid. The asymptotic random coding exponent for ML decoding and the code ensemble with i. u. d. symbols is $E_r^*(R) = \lim_{N \rightarrow \infty} E_r^*(N, R)$.

By analogy with the channel capacity C and maximal information rate $R_{\max}^*(N)$ let us define the lower bound on maximum achievable code rate for mismatched decoding $C^*(\psi)$ as

$$C^*(\psi) = \left. \frac{\partial \max_{\lambda > 0} E_0^*(\psi, \rho, \lambda)}{\partial \rho} \right|_{\rho=0} \leq C \quad (3)$$

and value

$$R_0^*(\psi) = \max_{\lambda > 0} E_0^*(\psi, 1, \lambda),$$

giving a bound on the cut-off rate R_0 ; evidently, the inequalities $R_0^*(\psi) \leq R_0^* \leq R_0$ are valid.

In this study we assume that the channel model is given as a *probabilistic finite-state machine* [2], i. e. conditional probabilities characterizing this model are given as follows

$$p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}\mathbf{s}}(\mathbf{y}|\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \prod_{n=1}^N p_{y|x s}(y^{(n)}|x^{(n)}, s^{(n-1)});$$

$$p_{\mathbf{s}|\mathbf{x}}(\mathbf{s}|\mathbf{x}) = p_s(s^{(0)}) \prod_{n=1}^N p_{s|x s}(s^{(n)}|x^{(n)}, s^{(n-1)}),$$

where $\mathbf{s} = (s^{(0)}, s^{(1)}, \dots, s^{(n)}, \dots)$ is the sequence of the channel states, $s^{(n)} \in S$, S is a set of the channel states, and $|S| < \infty$; $p_{y|x s}(y^{(n)}|x^{(n)}, s^{(n-1)})$ and $p_{s|x s}(s^{(n)}|x^{(n)}, s^{(n-1)})$ are conditional probabilities of the channel output and channel state transition, respectively, $p_s(\cdot)$ is an unconditional (stationary) distribution on the set of the channel states. Also, we assume that the input channel symbol $x^{(n)}$ and

the current channel state $s^{(n-1)}$ are independent. It has been shown in [1] that the probabilities $p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ can be represented in form of matrix product as

$$p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \mathbf{p}_s \left(\prod_{n=1}^N \mathbf{P}(y^{(n)}|x^{(n)}) \right) \mathbf{1}^T, \quad (4)$$

where

$$\mathbf{P}(y|x) = [p_{y|x s}(y|x, s) p_{s|x s}(s'|x, s)] \quad (5)$$

is a matrix of size $|S| \times |S|$; $\mathbf{p}_s = [p_s(1), \dots, p_s(|S|)]$ is the vector of the unconditional state probabilities at $n = 0$, and $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)$ is vector of 1's of dimensions $1 \times |S|$.

Next, we specify type of decoding function. The appropriate choice of decoding function, which allows obtaining a result in the final form, was one of the main problems of this study. In this paper, we proposed a decoding function $\psi(\mathbf{y}; \mathbf{x})$ with partial overlap, which depends on two integer parameters W and B , $W \geq B \geq 0$. For i. u. d. segments $\mathbf{x}_{k(n)-B}^{k(n)+B}$ the decoding function $\psi(\mathbf{y}; \mathbf{x})$ can be written as

$$\psi(\mathbf{y}; \mathbf{x}) = \prod_{n=0}^{N(B)-1} p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}_{k(n)-W}^{k(n)+W} | \mathbf{x}_{k(n)-B}^{k(n)+B}), \quad (6)$$

where $p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\cdot|\cdot)$ is the conditional probability for segments of *different*, in general, lengths $2W + 1$ and $2B + 1$ respectively, and $k(n) = n(2B + 1) + 1$.

Denote square matrices of order $|S|$ as

$$\mathbf{P}_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \prod_{l=1}^{2B+1} \mathbf{P}(y^{(l)}|x^{(l)}),$$

$$\mathbf{y} \in Y^{2B+1}, \mathbf{x} \in X^{2B+1}, \quad (7)$$

where $\mathbf{P}(y|x)$ is matrix defined in (5). Let $D_1(\mathbf{y}; \lambda)$ be a scalar quantity, and $\mathbf{D}_2(\mathbf{y}; \lambda, \rho)$ and $\mathbf{D}(\mathbf{y}; \lambda, \rho)$ be square matrices of order $|S|$ defined as follows

$$D_1(\mathbf{y}; \lambda) = \sum_{\mathbf{x} \in X^{2B+1}} p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x})^\lambda,$$

$$\mathbf{D}_2(\mathbf{y}; \lambda, \rho) = \sum_{\mathbf{x} \in X^{2B+1}} \mathbf{P}_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}_{W-B+1}^{W+B+1} | \mathbf{x}) p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x})^{-\lambda \rho},$$

$$\mathbf{D}(\mathbf{y}; \lambda, \rho) = D_1(\mathbf{y}; \lambda)^\rho \mathbf{D}_2(\mathbf{y}; \lambda, \rho), \mathbf{y} \in Y^{2W+1}.$$

Let us also define the square matrices $\mathbf{K}_{ij}(\lambda, \rho)$ of order $|S|$ as

$$\mathbf{K}_{ij}(\lambda, \rho) = \begin{cases} \mathbf{D}(\mathbf{y}; \lambda, \rho), & W \geq 2B + 1; \\ \sum_{\mathbf{y}_{2(W-B)+1}^{2B+1}} \mathbf{D}(\mathbf{y}; \lambda, \rho), & W < 2B + 1. \end{cases} \quad (8)$$

The correspondence of the indices i, j and the vector \mathbf{y} in the expression (8) is given as $i \leftrightarrow \mathbf{y}_1^{2(W-B)}$

and $j \leftrightarrow \mathbf{y}_{2B+2}^{2W+1}$. Finally, we define a square block matrix of order $|S|q^{2(W-B)}$

$$\mathbf{K}(\lambda, \rho) = [\mathbf{K}_{ij}(\lambda, \rho)] = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{11}(\lambda, \rho) & \dots & \mathbf{K}_{1q^{2(W-B)}}(\lambda, \rho) \\ \dots & \dots & \dots \\ \mathbf{K}_{q^{2(W-B)}1}(\lambda, \rho) & \dots & \mathbf{K}_{q^{2(W-B)}q^{2(W-B)}}(\lambda, \rho) \end{bmatrix}. \quad (9)$$

The main result obtained in the first part of this paper [1] is formulated as the following assertion.

Theorem. Let channel be specified by conditional probabilities (4), where the matrices (5) are irreducible, and let the decoding function ψ be given by equation (6) with integer parameters W and B , where $W \geq B \geq 0$. Then the random coding exponent $E_r^*(R; \psi)$ for the code ensemble with i. u. d. code symbols is

$$E_r^*(R; \psi) = \max_{0 \leq \rho \leq 1} (E_0^*(\psi, \rho) - \rho R), \quad (10)$$

where

$$E_0^*(\psi, \rho) = \max_{\lambda > 0} E_0^*(\psi, \rho, \lambda) = (1 + \rho) \log q_x - (2B + 1)^{-1} \log \left(\min_{\lambda > 0} r(\mathbf{K}(\lambda, \rho)) \right),$$

and $r(\mathbf{K}(\lambda, \rho))$ is the maximum eigenvalue (spectral radius) of matrix $\mathbf{K}(\lambda, \rho)$, given in equation (9).

The computational complexity of obtaining the values of the function $E_r^*(R; \psi)$ depends on the dimensions of $p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ equal to $q^{2W+1} \times q_x^{2B+1}$ [see (7)], and on the order of the square matrix $\mathbf{K}(\lambda, \rho)$ equal to $|S|q^{2(W-B)}$.

Determination of analytical dependence of asymptotic random coding exponent $E_r^*(R; \psi)$ on the values of W and B is equivalent to the description of the dependency of spectral radius of the matrix $\mathbf{K}(\lambda, \rho)$ on these parameters. This dependency cannot be expressed in exact and closed analytical form. From general considerations, it follows that the greater the values of W and B are, then better approximation of the ML exponent can be achieved in principle. Moreover, for various values of code rate R different combinations of the values W and B may be preferable. Unfortunately, the increase of the parameters W and B causes the great growth of computational complexity. The common approach consists of testing some combinations and selecting one that gives acceptable results for a given coding rate at a reasonable computational complexity. In next section, we present some results of calculating the random coding exponent for several channel models with memory and comparison with some known results.

Numerical Examples and Discussion

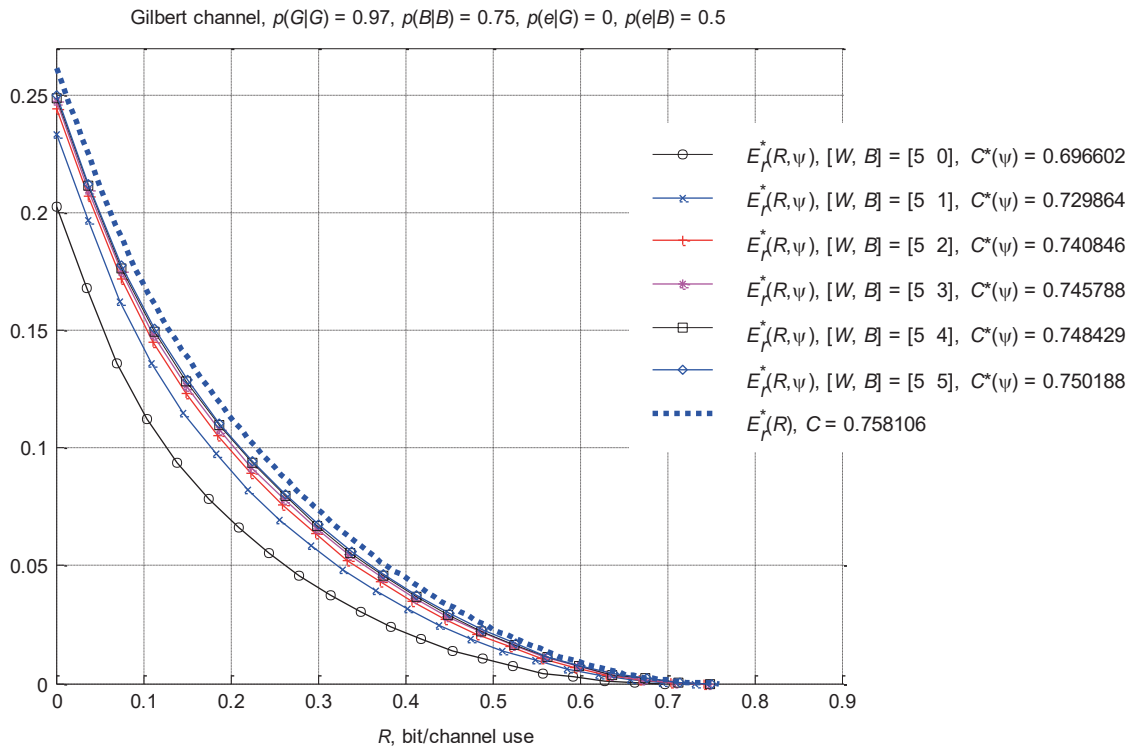
To illustrate application of the suggested approach let us consider some examples. The first example is classical Gilbert model and its generalization — Gilbert — Elliott model. The second example presents a simple model for a fading channel with nonbinary Frequency Shift Keying (FSK). These models give examples of symmetric channels with binary and nonbinary inputs and freely evolving states. The third example is for the channel model that is defined as a deterministic finite-state machine, and the last example is for channel with linear intersymbol interference and q -level quantized output (deterministic finite-state machine model as well).

Example 1. Gilbert channel and Gilbert — Elliott channel. Consider the well-known Gilbert channel model with two states 1 (“good”) and 2 (“bad”). In this case $q_x = q = 2$ and $|S| = 2$. Let the channel state transition probabilities be given as $p_{s|s}(1|1) = 0.75$ and $p_{s|s}(2|2) = 0.97$, and let the symbol crossover probabilities be equal to 0 and 1/2 for states 1 and 2 respectively (here we follow example in [3]). For this model, the complexity of calculation of the exponent of the random coding bound is not too large and the function $E_r^*(R; \psi)$ can be computed for comparatively large values of the parameters W and B . Results of the computations are shown in Fig. 4 for $W = 5$ and $B = 0, 1, \dots, 5$. The values of $C^*(\psi)$, shown in Fig. 1 and further, are computed as

$$C^*(\psi) \approx \frac{\max_{\lambda > 0} E_0^*(\psi, \delta, \lambda)}{\delta}, \quad \delta \ll 1, \quad (11)$$

giving an approximation for formula (3). The error exponent $E_r^*(R)$ for ML decoding computed for this example using the Egarmin algorithm [4] is also shown in Fig. 4. The channel capacity can be found using the original Gilbert approach [3] and for this example the capacity is $C = 0.758$ bit/channel use. It can be seen from the Fig. 1 that the curves $E_r^*(R; \psi)$ are approaching the curve $E_r^*(R)$ from below with the increase of the parameter B . For $B = 5$ the function $E_r^*(R; \psi)$ and value of $C^*(\psi)$ give good approximations for the ML random coding exponent $E_r^*(R)$ and the channel capacity C respectively.

It is interesting to compare the function $E_r^*(R; \psi)$ with the random coding exponent $E_r^*(N, R)$ for the ML decoding for some (small) values of the code length N . The function $E_r^*(N, R)$ can be computed by formulas (1) and (2). In equation (2) the channel conditional probability $p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ is computed according to the equation (4). Evidently, to compute a single value of $p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ we have to perform approximately $2N|S|^2$ operations (multiplications and additions). To compute the value $E_0^*(N, \rho)$ we need



■ Fig. 1. Functions $E_r^*(R; \psi)$ and $E_r^*(R)$, Gilbert channel

to calculate the values of $p_{y|x}(y|x)$ for all $y \in Y^N$ and for all $x \in X^N$. Thus the total number of operations in general case is about $2N|S|^2q^Nq_x^N$. For this example $|S| = 2$ and $q = q_x = 2$. Therefore, the total number of operations is about $N2^{2N+3}$ and it can be too large even for small N . For example, for $N = 16$ it is equal to $2^{39} \approx 5.5 \cdot 10^{11}$. But this channel can be considered as a channel with binary additive modulo 2 noise. Therefore, the channel output vector is $y = x \oplus e$, where e is a binary error vector, and $p_{y|x}(y|x) = p_e(y \oplus x)$, where $p_e(\cdot)$ is a distribution on the set of error vectors. Then for the sum over x in the right hand side of (2) we can write

$$\sum_x p_{y|x}(y|x)^{\frac{1}{1+\rho}} = \sum_x p_e(y \oplus x)^{\frac{1}{1+\rho}} = \sum_x p_e(x)^{\frac{1}{1+\rho}}$$

and hence

$$E_0^*(N, \rho) = \rho - \frac{1+\rho}{N} \log \left(\sum_x p_e(x)^{\frac{1}{1+\rho}} \right). \quad (12)$$

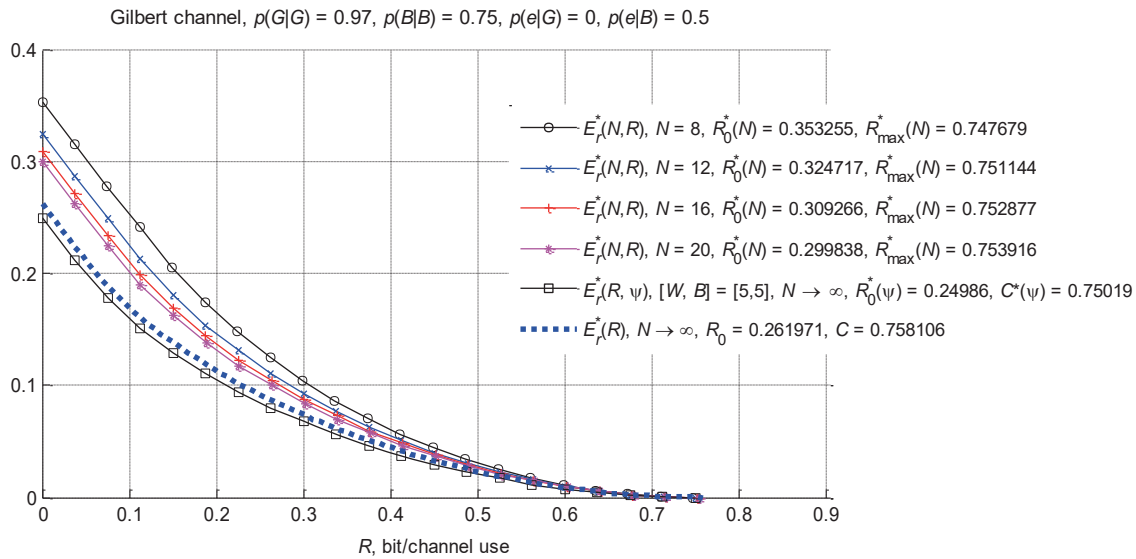
Evidently, $p_e(x) = p_{y|x}(0|x)$, where the probabilities $p_{y|x}(\cdot)$ are given by equation (4). In this case, to compute all values $p_e(x)$ it is required to perform about $2N|S|^2q_x^N = N2^{2N+3}$ operations. For example, for $N = 16$ the number of operations is equal to an acceptable value $2^{39} \approx 8.4 \cdot 10^6$. Fig. 2 presents re-

sults of comparison of the function $E_r^*(R; \psi)$ with the random coding exponent $E_r^*(N, R)$ for ML decoding for some fixed values of the code length N .

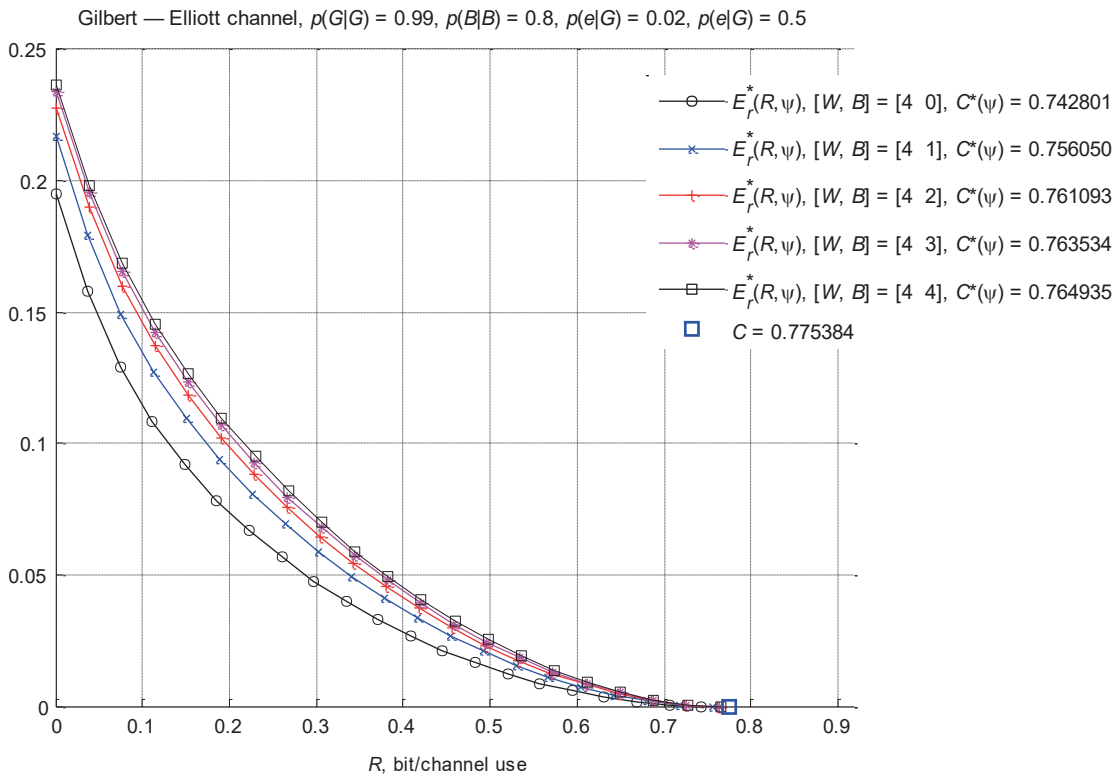
The asymptotic random coding exponent $E_r^*(R)$ for ML decoding computed by the Egarmin algorithm [4] is also shown in Fig. 2. It can be seen from the Fig. 2 that functions $E_r^*(N, R)$ approach the asymptotic function $E_r^*(R)$ from above with increasing of N , and the function $E_r^*(R; \psi)$ gives quite good approximation of the asymptotic function $E_r^*(R)$ from below.

Let us consider the next example — Gilbert — Elliot model [5]. Here again $q = q_x = 2$ and $|S| = 2$. Let the channel state transition probabilities be given as $p_{s|s}(1|1) = 0.99$ and $p_{s|s}(2|2) = 0.8$, and let the symbol crossover probabilities be equal to 0.02 and 1/2 for states 1 (“good”) and 2 (“bad”) respectively. For this model the ML random coding exponent $E_r^*(R)$ is unknown, but the channel capacity can be computed as it is shown in [6, 7]. The plots of function $E_r^*(R; \psi)$ are presented in Fig. 3.

It can be seen that the curves are being shifted upwards with the increase of the parameter B . For this case, we do not have a curve for the ML random coding exponent for comparison, but we can compute the capacity C for this channel using statistical version [7] of the algorithm presented in [6]. For this example the true capacity $C \approx 0.775$ bit/channel use. For $W = 4$, $B = 4$ the value of $C^*(\psi) = 0.765$ bit/channel use, that is very close to the true capacity.



■ Fig. 2. Functions $E_r^*(N, R)$, $E_r^*(R; \psi)$ and $E_r^*(R)$, Gilbert channel



■ Fig. 3. Functions $E_r^*(R; \psi)$, Gilbert — Elliott channel

The plots of the functions $E_r^*(N, R)$ for ML decoding for some fixed N values calculated using equations (12), (4) and (1) are shown in Fig. 4 for comparison with the suboptimal asymptotic exponent $E_r^*(R; \psi)$. It can be seen that the curves $E_r^*(N, R)$ are shifting downward, and the achievable code rate

$R_{\max}^*(N)$ increases with increasing N . As $N \rightarrow \infty$, we have $R_{\max}^*(N) \rightarrow C$ (note that in this example $C^* = C$), and the suboptimal random coding exponent $E_r^*(R; \psi)$ can serve as a lower bound for the random coding exponent for the Gilbert — Elliott channel.

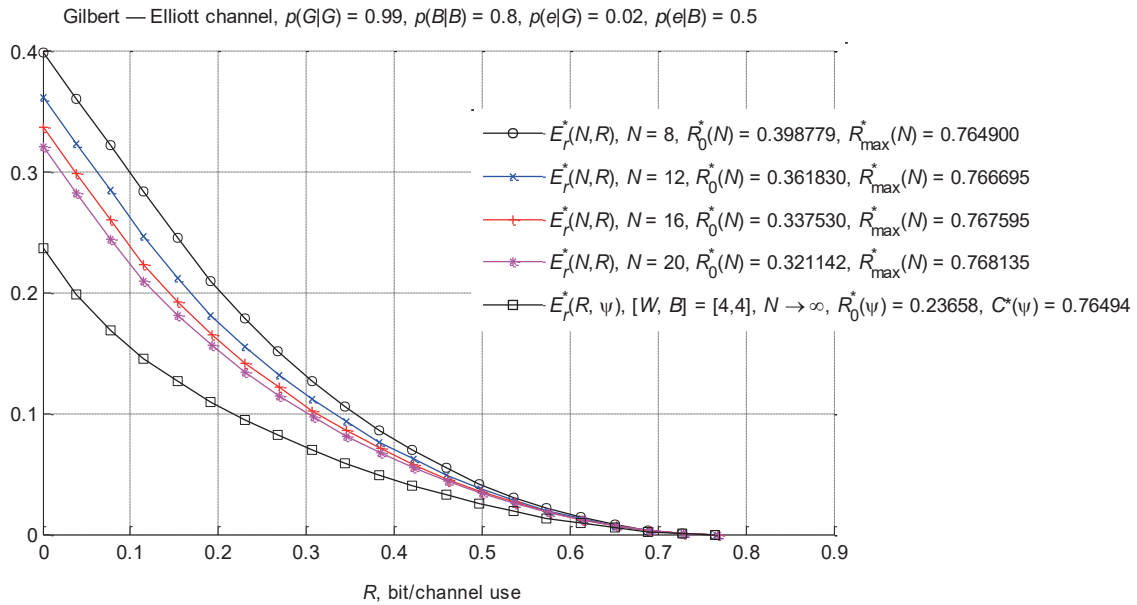


Fig. 4. Functions $E_r^*(N, R)$ and $E_r^*(R; \psi)$, Gilbert — Elliot channel

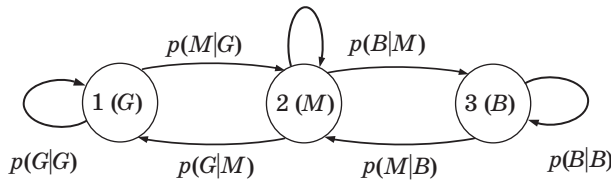


Fig. 5. State transitions diagram

Example 2. Simple model for fading channel with nonbinary FSK. Let us define the channel states as an additive white Gaussian noise channels with different noise power. Consider transmission of q_x -ary orthogonal FSK signals over this channel and optimal noncoherent reception. For this model $q_x = q$, and the symbol crossover probabilities are given as

$$p(y^{(n)} | x^{(n)}, s^{(n-1)}) = \begin{cases} 1 - \varepsilon(s^{(n-1)}), & y^{(n)} = x^{(n)}; \\ \frac{\varepsilon(s^{(n-1)})}{q-1}, & y^{(n)} \neq x^{(n)}, \end{cases}$$

where $\varepsilon(s)$ is symbol error probability for noncoherent reception of q -ary FSK signal for channel state s . This probability can be found as (see, e. g., [8])

$$\varepsilon(s) = \sum_{l=1}^{q-1} \binom{q-1}{l} \frac{(-1)^{l+1}}{l+1} \exp\left(-\frac{l}{l+1} \gamma(s)\right),$$

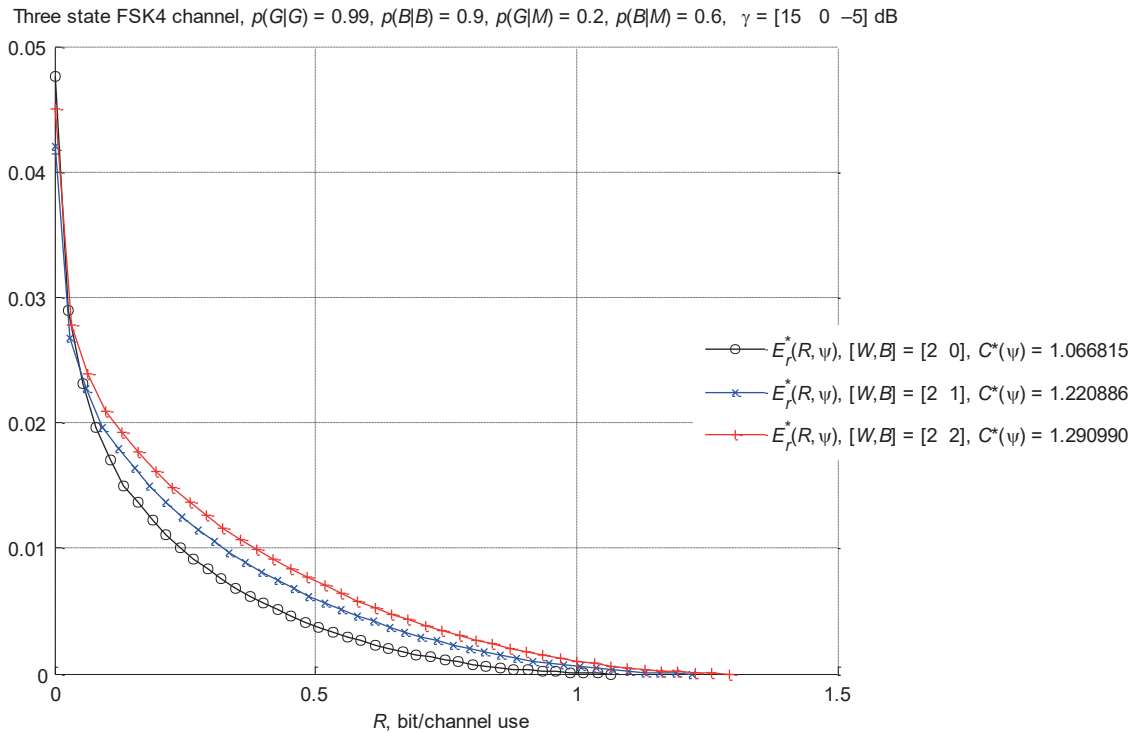
where $\gamma(s)$ is signal-to-noise ratio (SNR) in channel state s . Let for instance, $q_x = q = 4$ and $S = \{1, 2, 3\}$, i. e. the channel can be in one of three states: 1 (“good”, or G), 2 (“medium”, or M) and 3 (“bad”, or B). Assume that the channel state transitions

are given by the diagram shown in Fig. 5 with the following channel state transition probabilities: $p_{s|s}(1|1) = p(G|G) = 0.99$, $p_{s|s}(1|2) = p(G|M) = 0.2$, $p_{s|s}(3|2) = p(B|M) = 0.6$, $p_{s|s}(3|3) = p(B|B) = 0.9$. Let the state SNR be as follows $\gamma(1) = 15$ dB, $\gamma(2) = 0$ dB and $\gamma(3) = -5$ dB. The plots of the function $E_r^*(R; \psi)$ are shown in Fig. 6.

Example 3. Channel with deterministic state transitions. Let $X = Y = \{0, 1\}$, $S = \{1, 2\}$, and the probabilities $p_{s|xs}(s^{(n)}|x^{(n)}, s^{(n-1)})$ and $p_{y|xs}(y^{(n)}|x^{(n)}, s^{(n-1)})$ are given in Table 1, where ε is symbol crossover probability, $0 < \varepsilon < 1/2$.

Table 1. Probabilities $p_{s|xs}(s^{(n)}|x^{(n)}, s^{(n-1)})$ and $p_{y|xs}(y^{(n)}|x^{(n)}, s^{(n-1)})$

$s^{(n)}$	$p_{s xs}(s^{(n)} x^{(n)}, s^{(n-1)})$				$y^{(n)}$	$p_{y xs}(y^{(n)} x^{(n)}, s^{(n-1)})$			
	$(x^{(n)}, s^{(n-1)})$					$(x^{(n)}, s^{(n-1)})$			
	(0,1)	(0,2)	(1,1)	(1,2)		(0,1)	(0,2)	(1,1)	(1,2)
1	1	1	0	0	0	1/2	1 - ε	ε	1/2
2	0	0	1	1	1	1/2	ε	1 - ε	1/2



■ Fig. 6. Functions $E_r^*(R; \psi)$, three state FSK4 channel

For this model in state 1, the symbol $x = 0$ flips with probability $1/2$, and the symbol $x = 1$ flips with small probability ε . In state 2, on the contrary, the symbol $x = 0$ flips with small probability ε , and the symbol $x = 1$ — with probability $1/2$. In addition, the channel state becomes 1 after symbol 0 comes in, and is equal to 2 after the coming in the symbol 1. The functions $E_r^*(R; \psi)$ for this model are plotted in Fig. 7 for $\varepsilon = 0.01$. In Fig. 7 we present examples for some good combinations of the parameters W and B for $W = 0, 1, \dots, 6$, and the best pairs for this example are $[W, B] = [W, W - 1]$, $W > 1$.

To compare the plots of functions $E_r^*(R; \psi)$ with result for ML decoding let us consider the function $R_0^* - R$. This function coincides with the random coding exponent $E_r^*(R)$ in the interval $0 \leq R \leq R_{cr}$, where R_{cr} is the *critical rate* [2], and the plot of the linear function $R_0^* - R$ can be considered in example as a *known part* of the curve for whole random coding exponent $E_r^*(R)$. It can be shown (see Appendix) that R_0^* for ML decoding for this example can be found as $R_0^* = 2 \log q_x - \log r(\mathbf{H})$, where $r(\mathbf{H})$ is maximum eigenvalue of the matrix \mathbf{H} , and

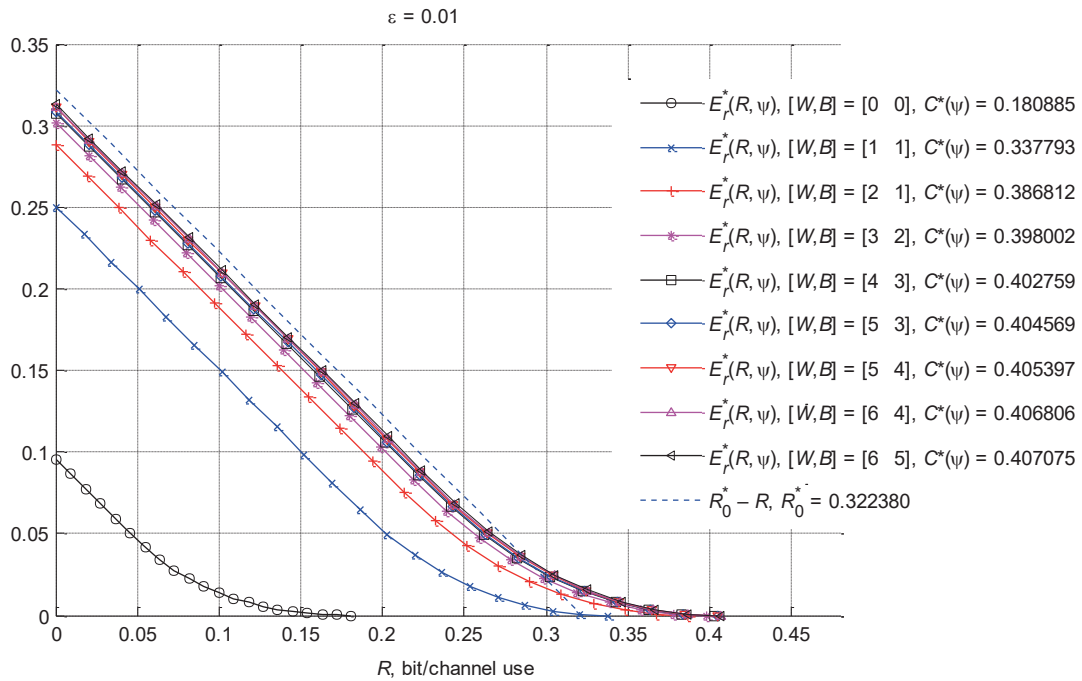
$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} 1 & a(\varepsilon) & a(\varepsilon) & 1 \\ a(\varepsilon) & 1 & b(\varepsilon) & a(\varepsilon) \\ a(\varepsilon) & b(\varepsilon) & 1 & a(\varepsilon) \\ 1 & a(\varepsilon) & a(\varepsilon) & 1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

where $a(\varepsilon) = \sqrt{(1-\varepsilon)/2} + \sqrt{\varepsilon/2}$ and $b(\varepsilon) = 2\sqrt{\varepsilon(1-\varepsilon)}$. It follows from the Fig. 7, that the random coding exponent $E_r^*(R; \psi)$ for $W = 6$, $B = 5$ is very close to the straight line $R_0^* - R$, so the function $E_r^*(R; \psi)$ can be considered as a quite good approximation for the ML random coding exponent $E_r^*(R)$.

Example 4. Intersymbol interference channel with q -level quantized output. A simple interference channel model is defined by the vector of coefficients $\mathbf{g} = [g_0, g_1, \dots, g_L]$. The channel input $\mathbf{x} = (x^{(1)}, \dots, x^{(N)})$ is a binary sequence and unquantized channel output is

$$y_0^{(n)} = \sum_{l=0}^L g_l (-1)^{x^{(n-l)}} + \xi^{(n)}, \quad (14)$$

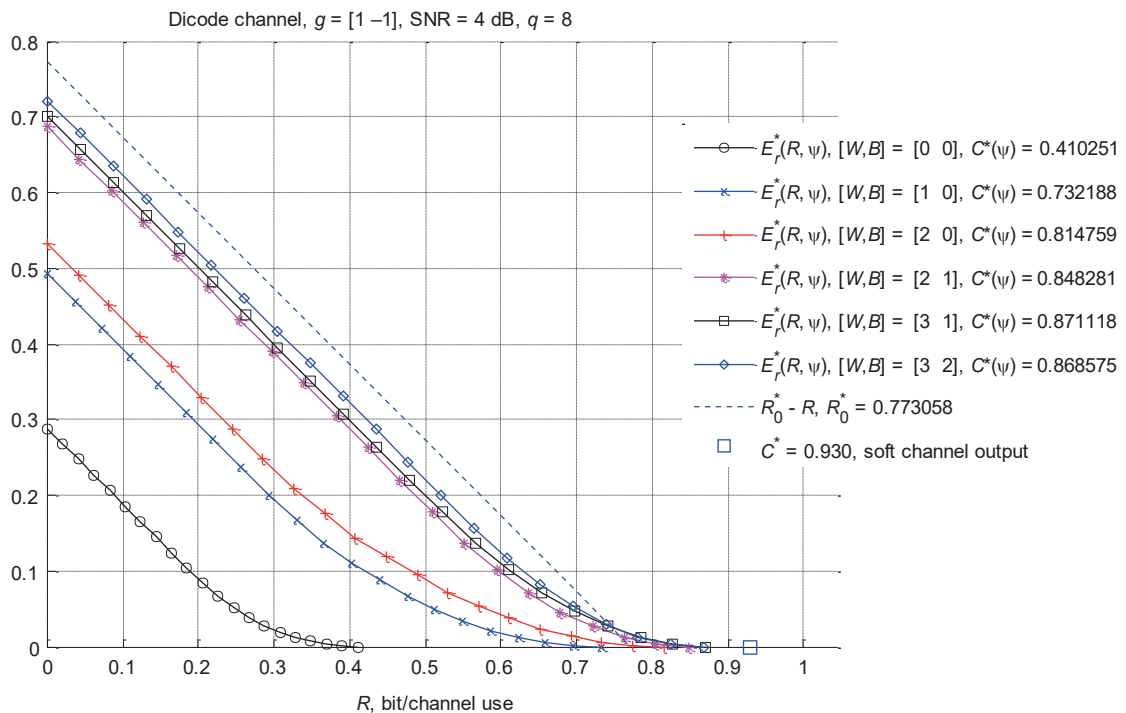
where $x^{(i)} = 0, 1$, and $\xi^{(i)}$ are independent Gaussian random variables with zero mean and variance σ^2 . The following modulation mapping is assumed in equation (14): $0 \rightarrow +1$, $1 \rightarrow -1$. The SNR is defined as $\gamma = \|\mathbf{g}\|^2 / (2\sigma^2)$. The number of channel states is equal to 2^L . The continuous channel output $y_0^{(n)}$ is subjected by a q -level quantization. In this example we assume that the quantization algorithm is one-dimensional quantization maximizing the Bhattacharya distance between conditional distributions of the quantized values [9]. We consider the simplest case of the model known as the *dicode channel* with parameters $L = 1$, $\mathbf{g} = [+1, -1]$ and $|S| = 2$. For this case $y_0^{(n)} = (-1)^{x^{(n)}} - (-1)^{x^{(n-1)}} + \xi^{(n)}$.



■ Fig. 7. Functions $E_r^*(R; \psi)$, channel with deterministic state transitions, $\varepsilon = 0.01$

The dicode channel with two-level quantization of the continuous channel output is equivalent to the channel with deterministic state transitions in Example 3. Plots of the functions $E_r^*(R; \psi)$ computed according to the equation (10) for $\gamma = 4$ dB, $q = 8$ and

some combinations of the parameters B and W , are shown in Fig. 8. The values of $C^*(\psi)$, computed by the formula (11), and values of R_0^* for the ML decoding computed using known techniques [10–12] (see also Appendix), are also presented in Fig. 8.



■ Fig. 8. Function $E_r^*(R; \psi)$, dicode channel, $\gamma = 4$ dB

As with the previous example we present the plot for the function $R_0^* - R$ in Fig. 8, where R_0^* is computed as it is shown in Appendix. Also in the Fig. 8 we indicate the value of maximum information rate C^* for the dicode channel with soft output computed in [13]. We see that maximum of functions $E_r^*(R; \psi)$ for $[W, B] = [3, 2]$ and $[W, B] = [3, 1]$ are close to the straight line $R_0^* - R$ and to the value of C^* .

Random coding exponent $E_r^*(N, R)$ for the ML decoding computed by formulas (1) and (2) for several small values of the code length N is depicted in Fig. 9. The function $E_r^*(R; \psi)$ and asymptotic ($N \rightarrow \infty$) linear function $R_0^* - R$ for the ML decoding are also presented in Fig. 9 for comparison. Clearly, as $N \rightarrow \infty$, the function $E_r^*(N, R)$ for $0 \leq R \leq R_{cr}$ tends to the line $R_0^* - R$. As it follows from the Fig. 9 the suboptimal random coding exponent $E_r^*(R; \psi)$ is very close to the random coding exponent $E_r^*(N, R)$ for the presented examples of the code length N and is not far from the asymptotic linear function $R_0^* - R$. The functions $E_r^*(N, R)$ for larger values of N are not presented due to high complexity of their computation.

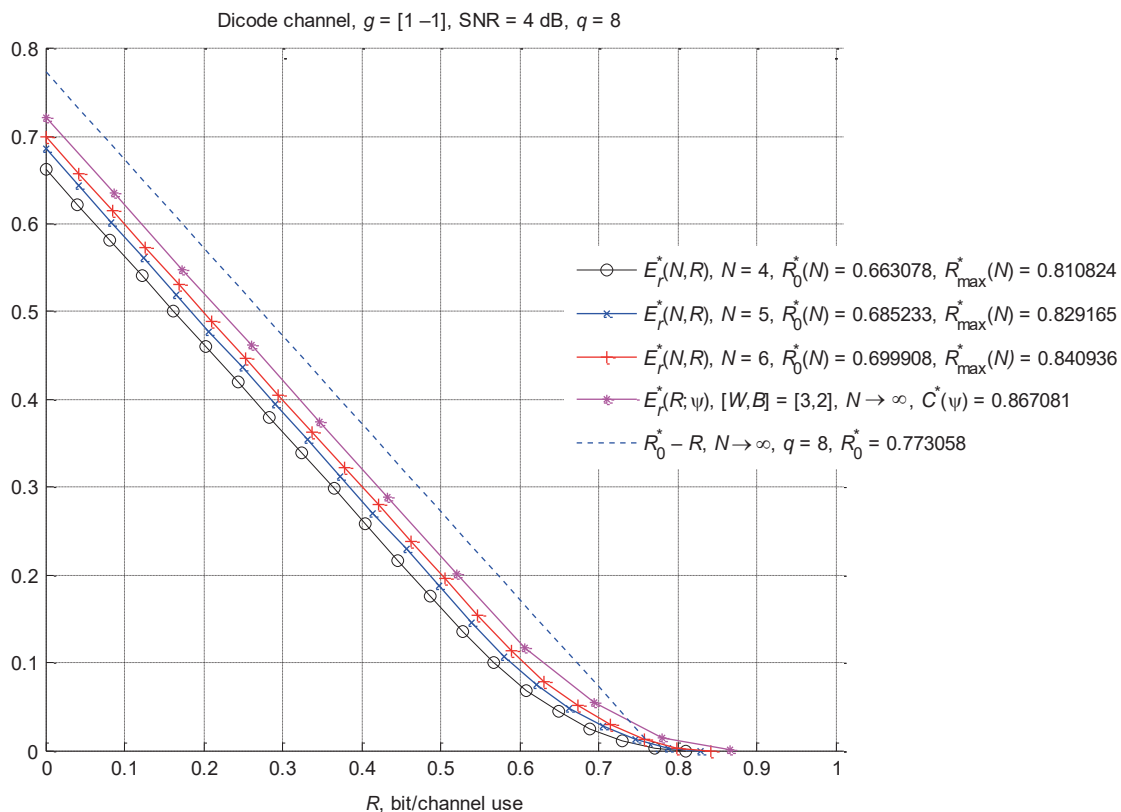
Plots of R_0^* and $R_0^*(\psi)$ as a function of the SNR are presented in Fig. 10. The values of R_0^* are calculated by a known method [14–16]. For this case (dicode channel) the values of R_0^* can be found in closed form as

$$R_0^* = -\log\left(\frac{3}{8} + \frac{1}{8}\left(e^{-2\gamma} + \sqrt{1 + 16e^{-\gamma} - 2e^{-2\gamma} + e^{-4\gamma}}\right)\right).$$

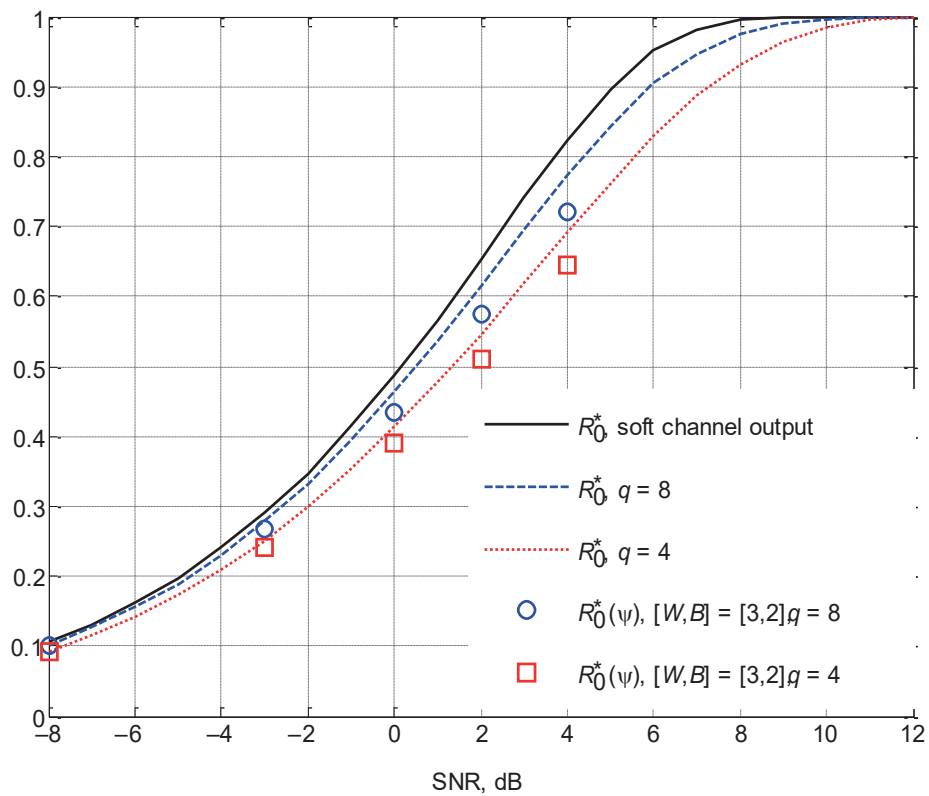
The values of $C^*(\psi)$ and values of *maximum information rate* for the channel with nonquantized output found in [13] by a simulation-based algorithm are shown in Fig. 11. Note that in [9] a different definition of SNR is used, namely $\gamma = \|\mathbf{g}\|/\sigma^2$; therefore the plot showing the data of [9] is moved to the left by 3 dB. We see in Fig. 10 and Fig. 11 that the difference is about 10 %, and it seems that the increasing number of quantization levels q leads to a decrease in this difference.

Conclusion

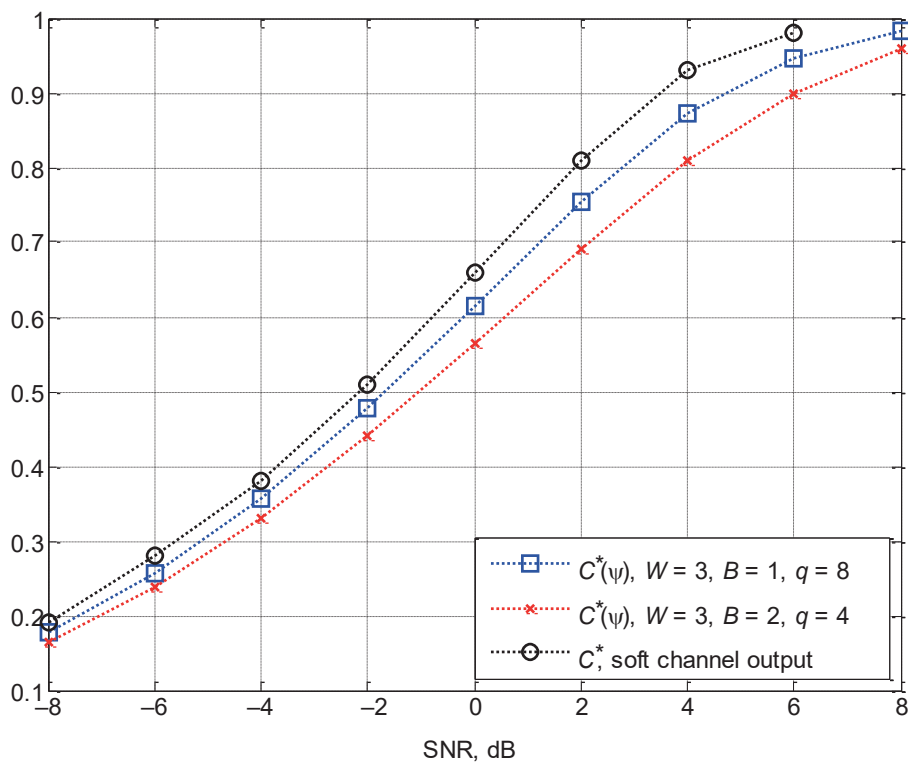
In this work, consisted of two parts, we present the derivation of the exponent of the random coding bound $E_r^*(R; \psi)$ for suboptimal, or mismatched, decoding. We proposed a decoding function in the form of a product of the *a posteriori* probabilities of the non-overlapped input subblocks of length $2B + 1$ relative to the overlapped output subblocks of length $2W + 1$ [see (6)]. The computation of the values of the function $E_r^*(R; \psi)$ is reduced to the calculation of the largest eigenvalue of a square non-negative matrix $\mathbf{K}(\lambda, \rho)$ of order $|S|q^{2(W-B)}$, where $|S|$



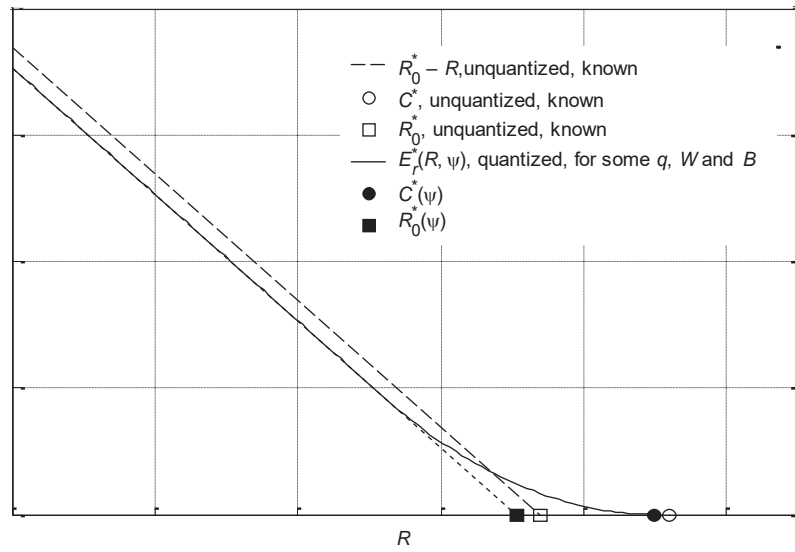
■ Fig. 9. Functions $E_r^*(N, R)$ and $E_r^*(R; \psi)$, dicode channel $\gamma = 4$ dB



■ Fig. 10. Plots of R_0^* и $R_0^*(\psi)$ for dicode channel



■ Fig. 11. Plots C^* and $C^*(\psi)$ for dicode channel



■ Fig. 12. General view of the functions $\tilde{E}_r^*(R)$ and $E_r^*(R; \psi)$

is the number of channel states and q is the cardinality of the channel output alphabet.

The computational complexity of obtaining the values of the function $E_r^*(R; \psi)$ depends on the dimension of the values $p_{y|x}(\mathbf{y}|\mathbf{x})$, equal to $q^{2W+1} \times q_x^{2B+1}$ [see (7)], and on the order of the matrix $\mathbf{K}(\lambda, \rho)$, equal to $|S|q^{2(W-B)}$. Therefore, in the examples presented in this part of the work, the practical computations were carried out for relatively small values of B , W and q . Nevertheless even for small values of these parameters, good results were obtained. The values of $R_0^*(\psi)$ and $C^*(\psi)$ found for the suggested suboptimal decoding functions are close to the corresponding values found before for the case of ML decoding for the intersymbol interference channels with soft output. A qualitative picture of the relationship between function $\tilde{E}_r^*(R)$, presented in the introduction in the first part [1] of this work, and function $E_r^*(R; \psi)$ is shown in Fig. 12. The values of R_0^* and C^* for a discrete-time channel with intersymbol interference can be obtained by known techniques [14–16] and [9]. As we see from the Fig. 12 the curve for the function $E_r^*(R; \psi)$ (solid line) goes higher than known bound $\tilde{E}_r^*(R)$ for high code rates.

We see the same in example in Fig. 8, where for quantized channel output with $q=8$ and $W=3$, $B=1$, we have $R_0^*(\psi)=0.710$ bit/channel use, $C^*(\psi)=0.871$ bit/channel use; for continuous channel output $R_0^*(\psi)=0.824$ bit/channel use and $C^*(\psi)=0.920$ bit/channel use as follows from Fig. 10 and Fig. 11 for SNR = 4 dB. The curve $E_r^*(R; \psi)$ is shifted upwards and to the right with increasing values of the parameters q , W and B . This conclusion follows from the fact that the decoding function ψ becomes the ML decoding function with increasing parameters W and B . Thus, the function $E_r^*(R; \psi)$ can be a *good approximation* for the true

but unknown function $E_r^*(R)$. The problem of the extension of the proposed approach to other channel models and the problem of finding an efficient algorithm for numerical computation for large values of B , W and q remain open for research.

Appendix

In this appendix we present a derivation of the expression for R_0^* for the channel with deterministic state transitions. This derivation is a minor modification of the known results [12, 14–16]. The general expression for R_0^* follows from the equation or $\rho = 1$ and $N \rightarrow \infty$ is

$$R_0^* = 2 \log q_x - \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{y}} \left(\sum_{\mathbf{x}} \sqrt{p_{y|x}(\mathbf{y}|\mathbf{x})} \right)^2. \quad (\text{A1})$$

Let us consider the sum over \mathbf{y} in (A1)

$$\begin{aligned} & \sum_{\mathbf{y}} \left(\sum_{\mathbf{x}} \sqrt{p_{y|x}(\mathbf{y}|\mathbf{x})} \right)^2 = \\ & = \sum_{\mathbf{x}} \sum_{\mathbf{x}'} \left(\sum_{\mathbf{y}} \sqrt{p_{y|x}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) p_{y|x'}(\mathbf{y}|\mathbf{x}')} \right). \quad (\text{A2}) \end{aligned}$$

For finite-state channel model we have the channel conditional probability

$$p_{y|x}(y|\mathbf{x}) = \sum_{\mathbf{s}} p_{y|x\mathbf{s}}(y|\mathbf{x}, \mathbf{s}) p_{\mathbf{s}|\mathbf{x}}(\mathbf{s}|\mathbf{x}),$$

where

$$p_{y|x\mathbf{s}}(y|\mathbf{x}, \mathbf{s}) = \prod_{n=1}^N p_{y|xs}(y^{(n)} | x^{(n)}, s^{(n-1)})$$

■ Table A1. Values of $h(s_a, s'_a; s_b, s'_b)$

(s_a, s'_a)	(s_b, s'_b)			
	(1,1)	(1,2)	(2,1)	(2,1)
(1,1)	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 0,1)p_{y x_s}(y 0,1)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 0,1)p_{y x_s}(y 1,1)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 1,1)p_{y x_s}(y 0,1)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 1,1)p_{y x_s}(y 1,1)}$
(1,2)	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 0,1)p_{y x_s}(y 0,2)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 0,1)p_{y x_s}(y 1,2)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 1,1)p_{y x_s}(y 0,2)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 1,1)p_{y x_s}(y 1,2)}$
(2,1)	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 0,2)p_{y x_s}(y 0,1)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 0,2)p_{y x_s}(y 1,1)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 1,2)p_{y x_s}(y 0,1)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 1,2)p_{y x_s}(y 1,1)}$
(2,2)	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 0,2)p_{y x_s}(y 0,2)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 0,2)p_{y x_s}(y 1,2)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 1,2)p_{y x_s}(y 0,2)}$	$\sum_y \sqrt{p_{y x_s}(y 1,2)p_{y x_s}(y 1,2)}$

and

$$p_{s|\mathbf{x}}(\mathbf{s}|\mathbf{x}) = p_s(s^{(0)}) \prod_{n=1}^N p_{s|x_s}(s^{(n)} | x^{(n)}, s^{(n-1)}).$$

Hence,

$$p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \sum_{s^{(0)}} p_s(s^{(0)}) \prod_{n=1}^N \sum_{s^{(n)}} p_{y|x_s}(y^{(n)} | x^{(n)}, s^{(n-1)}) p_{s|x_s}(s^{(n)} | x^{(n)}, s^{(n-1)}). \quad (\text{A3})$$

For channel with deterministic state transitions the pair $(x^{(n)}, s^{(n-1)})$ uniquely defines the next channel state $s^{(n)}$, therefore the sum over $s^{(n)}$ in (A3) contains only one term. Then it can be written

$$p_{\mathbf{y}|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) = \sum_{s^{(0)}} p_s(s^{(0)}) p_{y|x_s}(y^{(1)} | x^{(1)}, s^{(0)}) p_{y|x_s}(y^{(2)} | x^{(2)}, s^{(2)}) \dots p_{y|x_s}(y^{(N)} | x^{(N)}, s^{(N-1)}),$$

where $s^{(n)} = f(x^{(n)}, s^{(n-1)})$, $n = 1, 2, \dots, N$, and $f(\cdot, \cdot)$ is a function defining deterministic transition $s^{(n-1)} \xrightarrow{x^{(n)}} s^{(n)}$. Hence, for the expression (A2) we have

$$\sum_{\mathbf{x}} \sum_{\mathbf{x}'} \left(\sum_y \sqrt{p_{y|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) p_{y|\mathbf{x}'}(\mathbf{y}|\mathbf{x}')} \right) \leq \leq \max_{s^{(0)}, s'^{(0)}} \sum_{\mathbf{x}} \sum_{\mathbf{x}'} \prod_{n=1}^N \sum_y \sqrt{p_{y|x_s}(y | x^{(n)}, s^{(n-1)}) \times p_{y|x_{s'}}(y | x'^{(n)}, s'^{(n-1)})}. \quad (\text{A4})$$

Let us introduce for two pairs of states (s_a, s'_a) and (s_b, s'_b) the values

$$h(s_a, s'_a; s_b, s'_b) = \begin{cases} \sum_y \sqrt{p_{y|x_s}(y | x, s_a) p_{y|x_{s'}}(y | x', s_b)}, \\ \text{if } s_b = f(x, s_a) \text{ and } s'_b = f(x', s'_a); \\ 0, \text{ otherwise,} \end{cases} \quad (\text{A5})$$

and build matrix \mathbf{H} of size $|S|^2 \times |S|^2$ with the entries $h(s_a, s'_a; s_b, s'_b)$, where the pairs (s_a, s'_a) и (s_b, s'_b) represent first and second indices of the matrix entry respectively. Then the inequality (A4) can be written as

$$\sum_{\mathbf{x}} \sum_{\mathbf{x}'} \left(\sum_y \sqrt{p_{y|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x}) p_{y|\mathbf{x}'}(\mathbf{y}|\mathbf{x}')} \right) \leq \leq \max(\mathbf{H}^N \mathbf{1}^T) \leq \mathbf{1} \mathbf{H}^N \mathbf{1}^T,$$

where $\mathbf{1} = (1, \dots, 1)$ is vector of the dimension $|S|^2$. Further, we have

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{y}} \left(\sum_{\mathbf{x}} \sqrt{p_{y|\mathbf{x}}(\mathbf{y}|\mathbf{x})} \right)^2 = \lim_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \mathbf{1} \mathbf{H}^N \mathbf{1}^T,$$

and using the corollary from the Perron – Frobenius theorem [2, 15] we get finally from (A1) $R_0^* = 2 \log q_x - \log r(\mathbf{H})$, where $r(\mathbf{H})$ is maximum eigenvalue of the matrix \mathbf{H} .

For the channel model given in the Examples 3 and 4 the values of $h(s_a, s'_a; s_b, s'_b)$ defined in (A5) are listed in Table A1.

Expression (13) is obtained using the data given in Table A1.

References

1. Trofimov A. N. Random Coding Bound for Channels with Memory — Decoding Function with Partial Overlapping. Part 1. Derivation of Main Expression. *Informatsionno-upravlyayushhie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 3, pp. 79–88. doi:10.15217/issn1684-8853.2018.3.79
2. Gallager R. *Information Theory and Reliable Communication*. New York, John Wiley & Sons, 1968. 588 p.
3. Gilbert E. N. Capacity of a Burst-Noise Channel. *Bell System Technical Journal*, 1960, vol. 39, no. 5, pp. 1253–1265.
4. Egarmin V. K. Lower and Upper Bounds on Decoding Error Probability for Discrete Channels. *Problemy peredachi informatsii* [Problems of Information Transmission], 1969, vol. 5, no. 1, pp. 23–39 (In Russian).
5. Elliott E. O. Estimates of Error Rates for Codes on Burst-Noise Channels. *Bell System Technical Journal*, 1963, vol. 42, no. 5, pp. 1977–1997.
6. Mushkin M., Bar-David I. Capacity and Coding for the Gilbert — Elliott Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1989, vol. 35, no. 6, pp. 1277–1290.
7. Rezaeian M. Computation of Capacity for Gilbert — Elliott Channels, using a Statistical Method. *6th Australian Communications Theory Workshop 2005*, Feb. 2–4, 2005, Brisbane, Australia, pp. 56–61.
8. Proakis J. G. *Digital Communications*. McGraw-Hill, New York, 1995. 928 p.
9. Lin S., Costello D. *Error Control Coding — Fundamentals and Applications*. Prentice Hall, N. J., 2004. 624 p.
10. Raghavan S., Kaplan G. Optimum Soft Decision Demodulation for ISI Channels. *IEEE Transactions on Communications*, 1993, vol. 41, no. 1, pp. 83–89.
11. Shamai (Shitz) S., Raghavan S. On the Generalized Symmetric Cutoff Rate for Finite-State Channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1995, vol. 41, no. 9, pp. 1333–1346.
12. Trofimov A., Chan Keong Sann. Complexity-Performance Trade-off for Intersymbol Interference Channels — Random Coding Analysis. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, vol. 46, no. 4, pp. 1077–1091.
13. Arnold D. M., Loeliger H.-A., Vontobel P. O., Kavcic A., Wei Zeng. Simulation-Based Computation of Information Rates for Channels With Memory. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2006, vol. 52, no. 8, pp. 3498–3508.
14. Biglieri E. The Computational Cutoff Rate of Channel Having Memory. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1981, vol. 27, pp. 352–357.
15. Gantmacher F. R. *Teoriia matrits* [Theory of Matrices]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 552 p. (In Russian).

УДК 621.391

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-73-85

Граница случайного кодирования для каналов с памятью — декодирующая функция с частичным перекрытием. Часть 2. Примеры и обсуждениеТрофимов А. Н.^а, канд. техн. наук, доцент, andrei.trofimov@vu.spb.ru^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: субоптимальная экспонента случайного кодирования $E_r^*(R; \psi)$ для широкого класса моделей канала с конечным числом состояний, использующая несогласованную декодирующую функцию ψ , получена и описана в первой части этой работы. Мы использовали функцию ψ , представленную в виде произведения апостериорных вероятностей неперекрывающихся входных подблоков длины $2B + 1$ относительно перекрывающихся выходных подблоков длины $2W + 1$. Показано, что вычисление значений функции $E_r^*(R; \psi)$ сводится к вычислению наибольшего собственного значения квадратной неотрицательной матрицы, порядок которой зависит от параметров канала и от величин W и B . **Цель:** проиллюстрировать развитый в первой части исследования подход к вычислению экспоненты случайного кодирования в приложении его к различным каналам, модели которых представляют собой вероятностный конечный автомат. **Результаты:** рассмотрены каналы, в которых переходы в множестве состояний не зависят от входного символа, и каналы с детерминированными переходами, в частности каналы с межсимвольной интерференцией. Получены численные результаты вычисления экспоненты случайного кодирования в полном интервале скоростей кода для ряда моделей каналов, для которых подобные результаты не были ранее получены. Практические вычисления выполнены для относительно малых значений B и W . Тем не менее даже при малых значениях этих параметров получено хорошее соответствие с известными результатами для оптимального декодирования.

Ключевые слова — граница случайного кодирования, канал с конечным числом состояний, несогласованное декодирование, теорема Перрона — Фробениуса, канал с межсимвольной интерференцией.

Цитирование: Trofimov A. N. Random Coding Bound for Channels with Memory — Decoding Function with Partial Overlapping. Part 2. Examples and Discussion // Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 73–85. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-73-85

Citation: Trofimov A. N. Random Coding Bound for Channels with Memory — Decoding Function with Partial Overlapping. Part 2. Examples and Discussion. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 73–85. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-73-85

EVOLUTION OF MULTIPLE-ACCESS NETWORKS — CELLULAR AND NON-CELLULAR — IN HISTORICAL PERSPECTIVE. PART 1

A. M. Sergeev^a, Senior Lecturer, orcid.org/0000-0002-4788-9869

N. Sh. Blaunstein^{b,c}, Dr. Sc., Phys.-Math., Professor, nathan.blaunstein@hotmail.com

^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

^bBen-Gurion University of the Negev, POB 653, 1, Ben Gurion St., Beer Sheva, 84105, Israel

^cJerusalem College of Technology — Lev Academic Center, 21 Havaad Haleumi, P.O.B. 16031, Jerusalem, 91160, Israel

Introduction: The goal of this review is the analysis of evolution of the current and novel wireless networks, from second generation (2G) to fifth generation (5G), as well as changes in technologies and their corresponding theoretical background and protocols – from Bluetooth, WLAN, WiFi and WiMAX to LTE, OFDM/OFDMA, MIMO and LTE/MIMO advanced technologies with new hierarchy of cellular maps design – femto/pico/micro/macro. **Methods:** We use new theoretical frameworks to describe advanced technologies, such as multicarrier diversity technique, OFDM and OFDM novel approach, new aspects of MIMO description based on multi-beam antennas, design of various cellular maps based on new algorithms of femto/pico/micro/macrocell deployment, and the methodology of a new MIMO/LTE system integration based on multi-beam antennas. **Results:** We have created a new methodology for multi-carrier diversity description of novel multiple-access networks, for the usage of OFDM/OFDMA modulation in order to overcome inter-user and inter-symbol interference in multiple-access networks, as well as multiplicative noises in multiple-access wireless networks caused by multi-ray phenomena. Finally, we have suggested how to overcome the propagation effects occurring in the terrestrial communication channels by using a combination of MIMO and LTE technologies based on multi-beam antennas. For these purposes, we present a new stochastic approach which takes into account the terrain features, such as buildings' overlay profile, buildings' density around the base station and each user's antennas, and so forth. These parameters allow us to estimate the effects of fading as a multiplicative noise source. **Practical relevance:** The new methodology of estimating the effects created by multiplicative noise and inter-user and inter-symbol interference in terrestrial wireless networks allows us to predict a-priori practical aspects of the current and new multiple-access wireless communication systems, like the potential number of users or the spectral efficiency of user channels for various configurations of cell deployment: femto, pico, micro, and macro, as well as the novel MIMO/LTE system configurations for future networks of the 4th and 5th generations.

Keywords — Additive White Gaussian Noise, AWGN, Code Division Multiple Access, CDMA, Direct Fast Fourier Transform, DFFT, Direct Sequence Spread Spectrum, DS-SS, Global System for Mobile Communications, GSM, Frequency Division Multiple Access, FDMA, Inverse Fast Fourier Transform, IFFT, Inter-Channel Interference, ICI, Inter-Symbol Interference, ISI, Inter-User Interference, IUI, Long-Term Evolution Releases, LTE, Medium Access Control, MAC, Multicarrier Diversity, Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA, Orthogonal Time Division Multiple Access, OTDMA, Multiple-Input-Multiple-Output, MIMO, Single-Input-Multiple-Output, SIMO, Signal-to-Noise Ratio, SNR, Time Division Multiplexing, TDMA, User Equipment, UE, Wireless Fidelity Network, WiFi, Wireless Local Area Network, WLAN, Wireless Metropolitan Area Network, WiMAX, Wireless Personal Area Network, WPAN.

Citation: Sergeev A. M., Blaunstein N. Sh. Evolution of Multiple-Access Networks — Cellular and Non-cellular — in Historical Perspective. Part 1. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 86–104. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-86-104

1. Introduction to Overview of Current Wireless Networks

Scanning the existing literature related to the description of the wireless multiple access technologies, we notice that there are a lot of excellent works (see for example, references [1–20]), in which the multichannel, multiuser and multicarrier accesses were described in details for cellular and non-cellular networks beyond third (3G) and fourth (4G) generations. However, all these works mostly described the corresponding techniques and technologies via a prism of additive white Gaussian

noise (AWGN) and lesser via prism of multiplicative noise depending on fading phenomena, fast and slow. So, they ignore the multiplicative noise caused by fading phenomena. In references [1–20], the authors dealt mostly with classical AWGN channels or channels with the inter-user interference. As was shown there, the “response” of such channels is not time-varied or frequency-varied, that is, such propagation channels were not time or/and frequency dispersive. In [21, 22] were described the main features of the multiplicative noise caused by slow and fast fading that occur in terrestrial, atmospheric and ionospheric wireless communication links

and networks. As was shown in [21, 22], the aspects of fading are very important for predicting the multiplicative noise in various radio channels, terrestrial, atmospheric and ionospheric, for the purpose of increasing the efficiency of land-land, land-aircraft, and land-satellite communication networks. The proposed approaches were then extended for description of multimedia and optical communications based on the stochastic and other statistical models [23–27] and on usage of special non-standard matrices [28, 29].

As was shown in [21, 22], due to the “time-dispersion” and “frequency-dispersion” of each specific wireless communication channel, the signal data, as a stream of sequences of symbols (e.g. bits), can be corrupted by fading and, finally, a new phenomenon called *inter-symbol interference* (ISI) is observed at the receiver. Moreover, in multiple accesses servicing, if any subscribers use the same or close frequency bands, they can be affected by another subscribers located in their vicinity. In this situation, a new “artificial noise” takes place, which causes the so-called *inter-user interference* (IUI) or *inter-channel interference* (ICI). An example of how multipath fading causes ISI.

To overcome such kinds of effects caused by multiplicative noise, some canonical techniques were introduced in modulation schemes of current networks, defined and briefly described in [22], such as the *spread spectrum modulation techniques* (DS-SS, FH-SS, TH-SS, respectively). Additionally, to explain how the IUI can be overcome, the classical multiple access technologies, such as CDMA (code division multiple access) on the basis of DS-SS modulation, FDMA (frequency division multiple access) on the basis of FH-SS modulation technique, and TDMA (time division multiple access), on the basis of TH-SS modulation technique is briefly described in [22]. There were briefly introduced these techniques based on space, time, and frequency and polarization diversities for multi-beam adaptive antenna applications. In this section, we introduce the orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) techniques and the corresponding orthogonal frequency division multiple accesses (OFDMA), occurring in the frequency domain, as well as the orthogonal time division multiple access (OTDMA), occurring in the time domain.

Below in our special issue, in Section 1, we briefly introduce the existing classical recently performed networks via their historical perspective, such as the Global System for Mobile Communications (GSM), the Wireless Personal Area Network (WPAN), also called Bluetooth (BT), the Wireless Local Area Network (WLAN), related to the Wireless Fidelity (WiFi) System, the Wireless Metropolitan Area Network (WirelessMAN or WiMAX), and the Long-Term Evolution (LTE) standards. All these systems

and technologies cover the time period of the last four decades in wireless generation’s developments — from the past 2nd generation to the new 4th generation. It is important to notice that all modulation techniques, the conventional CDMA/TDMA/FDMA and advanced OFDM/OFDMA/OTDMA, related to above networks, fully depend on the fading phenomena that occur in such networks and described by the corresponding channel parameters [21].

We do not focus in description of the respective current and advanced protocols, such as 802.15, 802.11, 802.16, for LTE-releases, which are usually used in the above networks, as well as on the architecture of these networks, because these aspects are beyond the scope of this special issue and are fully described in other references [1–9, 11–20]. At the same time, based on the fading parameters introduced above, we will show the advantages and disadvantages of the corresponding techniques and will propose for practical applications more attractive and advanced technologies.

Let us briefly introduce the reader to the current wireless networks and the corresponding technologies below fourths generation (4G).

We will start to describe the matter by presenting first the **Bluetooth–WPAN Networks**, was originally created by Ericsson Company (Sweden) in 1998 before other companies started to launch this system and the corresponding technology and protocols. The WPAN system was named “Bluetooth” according to the name of Danish King Harald Bluetooth living at the 10th century. BT technology is based on 802.15 protocol and is called 802.15.1 protocol [30]. This protocol was performed for management and control of low-cost, low-power radio devices operated within small local areas (up to ten meters), which allows stable communication at short distances between personal devices such as notebooks, cellular phones, personal computers, and so on.

Such type of small-range areas were defined in [31, 64] as “piconets”. Currently, the protocol for BT technology allows sending a data stream through each channel with the maximal rate of 1 Mbps, that is, it allocates for each channel of WPAN system the nominal bandwidth of 1 MHz. The WPAN system operates at the carrier frequency of 2.4 GHz using frequency-hopping spread spectrum (FH-SS) modulation technique described in details in [30]. Thus, the whole bandwidth, consisting of 79 hopping channels is ranged from 2.402 to 2.480 GHz with minimum hopping range of 6 channels. Piconet is presented as a cluster of up to 8 radio devices that are differentiated as “master” and “slaves”. The rate of frequency changing equals 1600 times per second. WPAN–BT system is based on TDD (time-division duplexing) technique, according to which the channel is divided into slots with the time-slot of 625 μ s.

Let us now briefly state the advantages and disadvantages of the WPAN–BT system. The advantages are:

- effective and inexpensive wireless solution both for data and for voice at short distances from the receiver;

- applicable for stationary and mobile environments;

- no setup needed for work;

- inexpensive;

- voice/data compatible;

- low power consumption.

The disadvantages are:

- short range of antenna (up to 10–20 m);

- low data rate;

- existence of interference from other networks operating at the same frequency bands;

- absence of data security.

The second more popular and effective combined with WLAN network was the **WiFi–WLAN Network**. In 1990, the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) established the 802.11 working group to create a wireless local area network (WLAN) providing a set of standards for WLANs. The wing “.11” refers to a subset of the 802 group which is the wireless LAN working group [32, 33]. Then, WLANs were associated with WiFi networks. The IEEE 802.11 working group and the WiFi Alliance [34] came out as the key groups in creating different standard 802.11 protocol standards. Thus, we will also associate WLAN technologies and the corresponding protocols with WiFi networks and the corresponding protocols.

Thus, the WLAN systems, which were performed for pico/micro cell servicing (up to 1–2 km) are based on the standard protocol 802.11, the physical layer of which is signal processing operating on the basis of the standard Frequency Hopping Spread Spectrum (FH-SS) modulation technique (see [22]). Modern WLANs are now widely accepted and performed in private and local commercial areas to support subscribers, stationary and mobile, with special terminals, called access points (APs). Then, for WLAN networks a *medium access control* (MAC) technique was performed for providing quality of service (QoS) in packet-switched services of multiple subscribers located in picocell and microcell local areas (the corresponding protocol is called IEEE 802.11 MAC Standards) [35–37]. The main goal of IEEE 802.11 Mac was to support voice-over-IP (VoIP) services that are to support QoS for real-time services, such as telephony, multimedia (video and audio) communications.

As for VoIP, it is a popular service where the corresponding network converts voice data in digital form, and conversely. However, since today’s VoIP calls are possible in a WLAN environment, there are a number of factors that negatively affect the

use and acceptance of VoIP. Current WLANs have limited ability to support multimedia communications. Therefore, as will be mentioned briefly below, QoS provisions must be incorporated with the current WLAN systems to support the requirements of real-time services such as VoIP. For further reading on advanced techniques to support real-time voice service in WLAN systems the reader is referred to references [38–45].

We should mention that different modifications of IEEE 802.11 technology and its protocol were introduced during the last two decades, such as protocols 802.11a/b/g and 802.11n/e on the basis of OFDM/OFDMA modulation techniques.

Why such a broad set of 802.11 standards were created? To answer this question, let us briefly describe some of the popular standards of 802.11 technologies, to help the reader understand how the standard technologies, networks and the corresponding protocols allow designers of WLAN/WiFi systems to increase efficiency of grade of service (GOS) and quality of service (QOS) of WLANs, how to eliminate the ISI and the ICI in each channel (e.g. for each carrier) of the desired system. A WLAN and the corresponding 802.11b technology and protocol were adopted in 1999 by moving from fixed wire networks (such as Bluetooth) to wireless networks.

The protocol 802.11b is based on Direct Sequence Spread Spectrum (DS-SS), described in [21]. This technology was focused on the physical layer and data link layer, simultaneously [38]. Ranging up to distances of 100 m, and supporting send data streams with the maximal rate of 11 Mbps with fallback rates of 1, 2, 5.5 Mbps, all depend on effects of noise, clutter conditions, distance between APs, and so forth. The 802.11b technology and its protocols allow the connection of hundreds of computers and users using DS-SS modulation technique with a 2.4 GHz carrier frequency.

The logical structure of 802.11 technologies allows usage at the physical layer, not only with DS-SS modulation, but also using FH-SS modulation, combining with logical link control (LLC) layer and MAC layer. The first one provides addressing and data link control, independently from any topology and medium, and connecting to MAC access, which provides access to wireless medium.

Using 14 non-overlapping channels, each of 22 MHz wideband, placed 5 MHz apart each other (e.g., channel 1 is placed at central frequency, 2.412 GHz, channel 2 is at 2.417 GHz, and so on, up to channel 14 placed at 2.477 GHz). Such logical structure of 802.11 protocols give a lot of benefits such as:

- wide coverage range in an indoor/outdoor picocell/microcell environment;

- free and stable work both with stationary and mobile subscribers;

— possibility to work with other picocell networks, such as WPAN, using the same 2.4 GHz frequency band;

— scalability and security for each subscriber located in area of service.

Recently, the enhancement of the existing protocols, called IEEE 802.11e standard, was performed for VoIP [41–47]. The VoIP technology has advanced rapidly during recent years. This enhanced technology is better than the previous ones, since it allows transmitting low-power signal data with lower time delay and supports better duplex transmission, like VoIP, by sending each voice signal separately via network channels [35, 37, 45, 48]. Using beam-forming antennas, as additional attributes of this technology, the 802.11n network allows to eliminate multipath fading effects and, therefore, eliminate ISI and ICI usually occur in wireless communication in environments with fading (see details in [49–110]).

To be objective, we should also mention on **WiMAX Networks** and 802.16 protocol, despite the fact that they till nowadays did not find their “applicable layer” among other technologies below 4G. They relate to broadband wireless systems operating on the basis of adaptive multibeam or phased array antennas, which were performed from 2002 for macro-cell servicing (up to tens of kilometer), their physical layer is operated on the basis of the standard protocol 802.16 [111–118]. This wireless network is called WiMAX. A WiMAX antenna can cover metropolitan areas of several tens of kilometers for fixed stations and up to ten kilometers for mobile stations. Therefore, initially (on April 2002) the IEEE Standard 802.16-2001 was defined as wireless metropolitan area network (WirelessMAN) [112].

Wireless-MAN offers alternative networks based on wire communications (via cables or fiber optics) with their modems and digital subscriber line (DSL) links. Despite this fact, wireless WiMAX networks have a huge capacity to address broad geographic areas without additional infrastructure required in cable links installation in each individual site or for each individual subscriber. In such a scenario, WiMAX technology brings the network to subscribers located inside which are connected with conventional indoor networks such as Ethernet (IEEE Standard 802.3) or wireless local area networks (LANs) [Standards 802.11a-e described above]. With MAC technology expanding in this direction, it is important to emphasize that 802.16 MAC standard technology could accommodate all connections with full QoS and increase of GOS.

The signal processing technique implemented in a WiMAX system is based on OFDM/OFDMA modulation techniques that will be described in Sec-

tion 2 and operates at frequencies from 2 to 10 GHz. A WiMAX antenna can transfer information data with a maximum rate of up to 70 Mbps. The main goal of such technology is to handle any effects of NLOS in urban and sub-urban environments that usually occur in the built-up scene (see [21, 22]). The main features of WiMAX networks are [111–116]:

- a) it uses advanced OFDMA technique;
- b) its bandwidth varies from 1.25 to 28 MHz;
- c) it additionally uses TDD and FDD (frequency division duplex) techniques (see definitions in [22]);
- d) it uses MIMO antenna systems based on a beam forming technology of each element of BS (base station), AP and MU antenna performance;
- e) it uses advanced signal modulation techniques;
- f) it uses advanced coding techniques such as space-time coding and turbo coding.

Recently, to obey several vivid drawbacks, the WiMAX technology was deployed to operate simultaneously with macro-cell BS antennas and Femto-Access Point antennas and this was the main goal performing the 4th generation of wireless networks (on such a configuration we will talk below in Section 4). Moreover, a tendency of integration of narrow-range WiFi networks with a wide-range WiMAX networks, operating at different rates and having different mobility, are sensitive to blocking of users’ calls, dynamic spectrum assignment for each user, stationary or mobile, and to energy-efficient handover schemes with the geographic mobility awareness. The problems of integration of different systems having limited possibilities either in mobility or in speed, such as WiFi and WiMAX systems were discussed in references [119–124], where the main goal of the researchers was to decrease a blocking probability and increase the efficiency of handover schemes and frequency spectrum sharing among user’s channels. Following References [119–124], we briefly introduce the reader to some of the problems and tools used algorithms overcome them.

A **WiFi/WiMAX integrated network** was proposed to achieve high-quality communication by using WiFi and WiMAX as complementary access resources. The integrated network, according to researchers’ main aim, will enable support a load balancing between WiFi and WiMAX by using each system selectively in response to the demands of subscribers, stationary and/or mobile, and the usage status of each system. According to such an idea, in the integrated WiFi/WiMAX network each wireless system will use the spectrum band prescribed by law, so that even if the WiMAX system has unused spectrum temporarily, it cannot be used by WiFi wireless systems.

The first problem, investigated in reference [122], was to find an effective spectrum sharing method for WiFi/WiMAX integrated mesh net-

work. Resolving the problem of spectrum sharing in WiFi networks, allows connecting the WiFi mesh network to a WiMAX base station, obtaining an increase of throughput. The problem is that in a WiFi mesh network, several WiFi APs are interconnected by wireless links and the communication with the backbone network transits through the gateway AP connected by wire cables. It was expected to reduce the cost of infrastructure and to adapt it not only to urban, but also to rural areas. In addition, in a multi-channel, multi-interface mesh network, where each AP can use two or more channels simultaneously, it was found possible to increase the network capacity by dynamic channel assignment for each wireless link. However, when many mobile users communicate with the backbone network, the network throughput decreases due to congestion around gateway APs [122].

To overcome this problem, a WiFi/WiMAX integrated mesh network was proposed in [122], where WiMAX is used as backhaul for the WiFi mesh network. In such a combined network, there are two kinds of gateway APs:

- a) one is a traditional gateway AP directly connected to the backbone by a wired cable; and
- b) the other is an AP which is wirelessly connected with the WiMAX BS and works as a gateway.

Also, dynamic spectrum assignment based on call blocking probability prediction in WiFi/WiMAX integrated network was investigated in [123]. The main idea of this research was to allow WiFi systems to use a spectral band of WiMAX systems, temporally, in an integrated network of operation stages. Thus, because the WiFi system uses the spectrum in units of 20 MHz, the WiMAX system divides its spectrum into channels of 20 MHz and assigns one of them to the WiFi APs, which leads to more effective use of spectrum in the integrated network. To achieve this, a channel in the WiMAX system should be assigned to as many WiFi systems as possible, as long as they are not adjacent. Specifically, a WiMAX system provides 74.8 Mbps per channel and a WiFi system provides 54 Mbps per channel at maximum. Therefore, if two or more WiFi APs use one channel of the WiMAX system, the spectrum utilization efficiency can be enhanced for the whole integrated network. The proposed method is based on the predicted numbers of blocked calls, an analytical analysis of which is fully presented in reference [123]. The proposed method in reference [123] introduces an effective dynamic spectrum assignment, where the same spectrum can be repeatedly used by assigning a channel of the WiMAX system to two or more WiFi systems without causing interference between adjacent WiFi APs.

Special discussion should be done on so-called **LTE technology** and the corresponding networks.

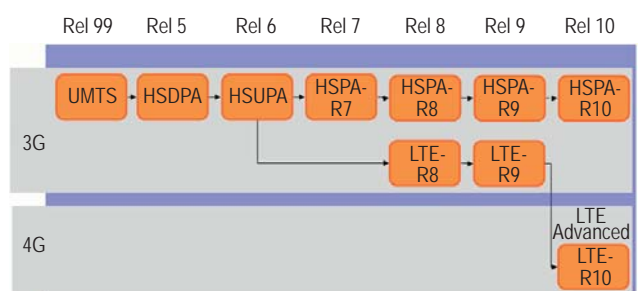
The LTE technology, networks and the corresponding protocols were developed recently to increase the capacity and speed of wireless data passing wireless communication links and networks, using modern hardware (compared to WiMAX networks) and advanced digital signal processing techniques [125–137]. LTE was defined in 2009 by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) as a highly flexible broadband radio system with high user data rate (up to 30 Mbps), with a data stream and radio sensors/networks delay not exceeding 5 ms, with simple network architecture, efficient spectra allocations, and so on. As was mentioned in [131]: “*LTE is designed to meet carrier needs for high-speed data and media transport as well as high-capacity voice support well into the next decade*”.

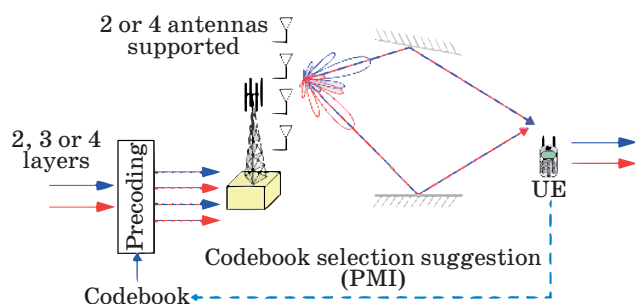
Moreover, the main goal of the first nine releases of LTE was to support both FDD and TDD combined with a wideband system in order to achieve a large number of various spectra allocations [130, 131]. All these nine standard releases (Table 1) were implemented recently to overcome the well-known WiMAX technologies, such as enhanced IEEE 802.16e, performed in 2005. Thus, for example, the LTE-E-UTRAN technology has much better parameters regarding data speed and data protection within communication channels with respect to WiMAX with enhanced IEEE.802.16e protocol.

Recently, LTE was introduced to support the systems that can be considered as a continuous evolution from earlier 3GPP networks, such as TD-SCDMA (time-division synchronous code-division multiple access) and wide-band code-division multiple access (WCDMA) combined with high-speed packet access (HSPA). The current Releases 8 and 9 of LTE technology, denoted sometimes as 3GPP-LTE (or E-UTRAN), include many of features of 4G systems. Therefore, they were considered as the best candidates for 4G generation of networks and as a major step toward the advanced international mobile telephony (ITM-Advanced) [127–145].

Namely, LTE Release 8 was performed for single user (SU) network to service of each user equipment (UE). Its arrangement is presented schematically in Fig. 1.

■ **Table 1.** Evolution of LTE releases (Rel) during recent years (extracted from Internet)





■ **Fig. 1.** Scheme of SIMO-LTE, supports 2 or 4 antennas at the BS with spatial multiplexing, using the LTE Release 8 technology (rearranged from [131, 144])

It has the following characteristics [144]:

- it combines TDD and FDD modes and OFDM technique in downlink (DL) and SC (single carrier) – FDMA technique in uplink (UL), using adaptive modulation and coding such as QPSK/16QAM/64QAM in both DL and UL channels;
- data rate for 20 MHz-bandwidth: 100 Mbps in downlink and 50 Mbps in UL channel;
- spectral efficiency for 20 MHz-bandwidth: 5 (bits/sec/Hz) in DL and 2.5 (bits/sec/Hz) in UL;
- latency (e. g. delay of data for each desired user) is less than 5 ms for small IP packets.

The LTE Release 9 standard was performed as an enhanced version of LTE Release 8 standard [132, 133], where for demodulation purposes a virtual antenna with pre-coded UE specific reference signals was added. Here also both *paired* and *unpaired* bands of the radio spectra was proposed depending on the types of environment, rural, sub-urban, urban, on the built-up terrain features, and on the configuration of the bandwidth allocated for users' servicing. The paired frequency bands correspond to configurations where UL and DL transmissions are assigned separate frequency bands, whereas the unpaired frequency bands corresponds to configurations where UL and DL must share the same frequency band. As illustrated from Fig. 1 (extracted from [131]), LTE technology allows for an overall system bandwidth ranging from as small as 1.4 MHz up to 20 MHz, where the latter is required to provide the highest data rate within LTE system communication channels.

All user terminals support the widest bandwidth. Unlike previous cellular systems of 3rd generation mentioned above, the LTE system provides the possibility for different UL and DL bandwidths, enabling asymmetric spectrum utilization. Usage of effective and flexible spectra sharing not only in different frequency bands, but also different bandwidths, combining with efficient migration of other radio-access technologies to LTE technology, are the main keys of the LTE radio access that provide a good foundation for further 4th generation evolution.

Below, in Section 5, we will present combination of LTE advanced technology with MIMO system that is planned to be useful for 4th and 5th generations.

Now, in Section 2, we will introduce some advanced diversity techniques adapted for the multi-carrier accessing networks. Then, in Section 3, we will describe the advanced MIMO spatial-time diversity and spatial multiplexing techniques, focusing the special attention on how fading phenomena affect the capacity and spectral efficiency of MIMO channels. Fading propagation effects are described in terms of the unified stochastic approach introduced in [21, 22] for land communication networks. In Section 4 we introduce the femtocell-microcell and femtocell-macrocell (indoor/outdoor) configurations for different types of femtocell advanced deployment strategies, and, finally, in Section 5, we show advances of the combined femtocell-microcell layout with MIMO/LTE modern concept for future 4th and 5th generation performance.

2. Novel Multicarrier Diversity Techniques

Diversity is a powerful communication receiver technique, which can be used to handle fading phenomena occurring in different wireless communication links, terrestrial, atmospheric and ionospheric (described in [21, 22]). Using diversity techniques, one can improve the multiple access system performance operating in indoor/outdoor multipath environments. These techniques are based on the very simple principle of sending M copies of the desired signal data sequence (related to the desired user) via M different channels, instead of usage only one channel to transmit and receive this desired information data.

There are different kinds of diversity techniques which are currently used in canonical (e.g. current) and modern networks. We briefly described these techniques in Section 5 regarding the adaptive multi-beam antenna applications. Here, we introduce some advanced techniques based on the proposed concept.

The analysis of fading, time-varying and frequency-varying, leads to the use of time varying (adaptive) equalizers for stable communication achievement [3–5]. However, the design and use of time varying and adaptive equalizers are difficult in practice, especially for broadband channels operating on the basis of adaptive/smart antennas. Only one solution currently exists, which is to use multicarrier (e.g., multichannel) techniques, based on frequency and time diversity algorithms, or on the space diversity principle currently adapted for the MIMO systems. This means that instead of one carrier, M carriers will be used to eliminate all kinds of noises, naturally or artificially generated.

2.1. Advantages of Multicarrier Diversity Techniques

Before starting to analyze the methods of frequency, time and space diversity, let us, first of all, determine quantitatively and show analytically the advantages that can be achieved using multicarrier diversity methods. For this purpose, let us consider M independent Rayleigh fading channels, i.e., operated in worst-case scenarios with the absence of LOS components, that is, for a fading parameter $K = 0$ (see definitions in [3–10, 21, 22]). We call each channel a *diversity branch*. The corresponding scheme of how to combine and separate all carriers at the transmitter and then select the desired carrier at the receiver, is shown in Fig. 2.

We also assume that each branch has the same average signal-to-multiplicative noise ratio (SNR) defined as $\Gamma = (E_b/N_0) \langle \alpha^2 \rangle$, where E_b is the energy of the bit of information data passing the channel with strong fast fading, $\langle \alpha^2 \rangle$ is the normalized deviation of signal data energy due to fading, and N_0 is the energy of the AWGN. Each branch has an instantaneous SNR $= \gamma_i$. Then the PDF (plural distribution functions) of such a multiplicative noise, caused by fast and/or slow fading, can be written for $\gamma_i \geq 0$ as

$$p(\gamma_i) = \frac{1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\Gamma}\right), \quad (1)$$

where now Γ is the average SNR for each branch. The probability that a single branch has a SNR less than some threshold of multiplicative noise, γ , is the cumulative distribution function (CDF) defined for Rayleigh channel with fading as

$$\begin{aligned} CDF(\gamma_i) &\equiv P[\gamma_i \leq \gamma] = \int_0^\gamma p(\gamma_i) d\gamma_i = \\ &= \int_0^\gamma \frac{1}{\Gamma} \exp\left(-\frac{\gamma_i}{\Gamma}\right) d\gamma_i = 1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right). \end{aligned} \quad (2)$$

Now, the probability that all M independent diversity branches receive signals which are simultaneously less than some specific SNR threshold γ can be presented as

$$P[\gamma_1, \dots, \gamma_M \leq \gamma] = \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right)\right]^M \equiv P_M(\gamma). \quad (3)$$

This probability describe situation when all branches cannot achieve this threshold. If any branch with number i achieves this threshold, i.e., $SNR > \gamma$, then

$$P[\gamma_i > \gamma] \equiv 1 - P_M(\gamma) = 1 - \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right)\right]^M. \quad (4)$$

Formula (4) describes the situation of exceeding of the threshold when *selection diversity* is used. For low Γ , that is, for strong fading effects, (4) reduces to

$$P \propto \left(\frac{\gamma}{\Gamma}\right)^M. \quad (5)$$

For selection diversity the PDF is found as the derivative of CDF of all braches to achieve threshold, that is,

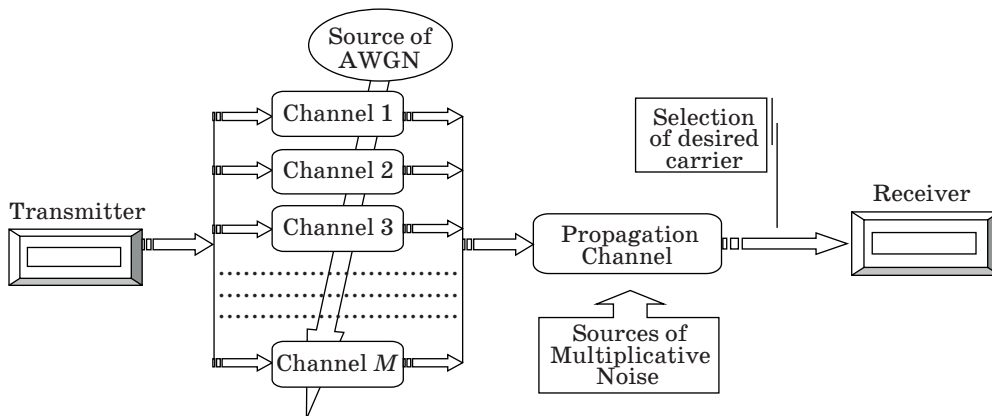
$$p_M(\gamma) = \frac{dP_M(\gamma)}{d\gamma} = \frac{M}{\Gamma} \left[1 - \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right)\right]^{M-1} \exp\left(-\frac{\gamma}{\Gamma}\right). \quad (6)$$

Then, the mean SNR, $\bar{\gamma}$, can be defined as

$$\bar{\gamma} = \int_0^\infty \gamma \cdot p_M(\gamma) d\gamma = \Gamma \int_0^\infty Mx \left[1 - e^{-x}\right]^{M-1} e^{-x} dx, \quad (7)$$

where $x = \gamma/\Gamma$. Formula (7) is evaluated to obtain the average SNR improves offered by the selection diversity

$$\frac{\bar{\gamma}}{\Gamma} = \sum_{k=1}^M \frac{1}{k}. \quad (8)$$



■ Fig. 2. Multicarrier diversity principle for desired user selection

As was shown by numerous computations, for the independent Rayleigh fading branches, as channels with the average multiplicative noise, the probability that the SNR drops below some specific threshold for one branch is of 2–3 times greater in magnitude than if several independent (separated) branches are used in the multicarrier diversity technique.

2.2. Frequency Multicarrier Advanced Diversity Technique

This technique allows for modulating the information data signal (e.g., the baseband signal) through different M carriers. Frequency diversity transmits information on more than one carrier frequency. Here frequencies are separated by less (or equal) to the coherent bandwidth of the channel and, therefore will not experience the frequency selective or time-selective fades (see definitions above). Here, we need to choose the symbol duration T_s in such a manner that the coherence bandwidth of each sub-channel, denoted as $b_w \equiv b_c = B_c/N$, where N is the number of carriers, will be much smaller than the bandwidth of the channel B_w . In this case, slow and flat fading will take place and effects of frequency-selective fast fading will be minimized. The above assumption leads to the following constraint:

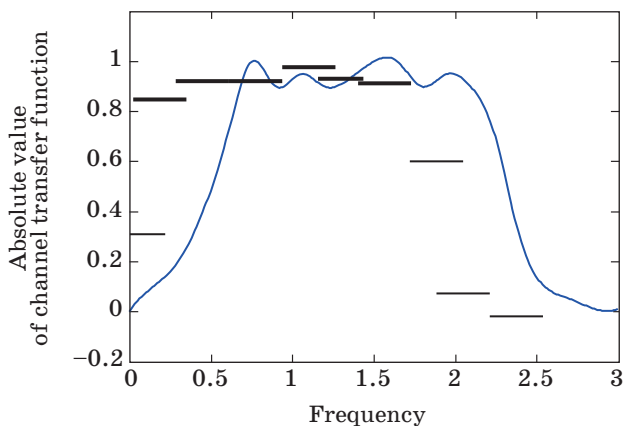
$$B_w > \frac{1}{T_s} \equiv b_c. \tag{9}$$

By using N carriers, we finally have

$$N = \frac{B_w}{b_c} = \frac{B_w}{1/T_s} = B_w T_s. \tag{10}$$

All definitions of the parameters presented above in Section 1.

Figure 3 depicts an example of how we can split the channel bandwidth B_w in N sub-channels with



■ Fig. 3. The principle of splitting of the whole channel bandwidth on N sub-channels where effects of signal deviations are minimal

a bandwidth b_c that is enough narrow to exclude effects of deep fading and narrowband ICI. Then, each independent symbol signal will have, in frequency domain, a rectangular shape of power spectral density (PSD), which in the time domain has a sharp δ -function presentation. Conversely, the rectangular shaping function $g(t)$ in the time domain (i.e., a pulse with data), has in the frequency domain a shape of the *sinc-function* that in the literature is called the Nyquist-shaped filter or the ideal filter [1–7].

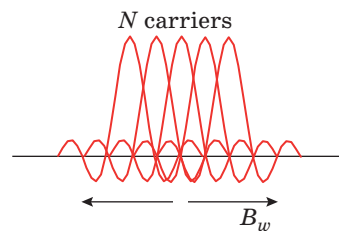
2.3. OFDM and OFDMA Novel Technologies

As it follows from the description of FDD and FDMA techniques, described in [22], the spectral efficiency of the above techniques are too weak because of the existence of guard intervals (i.e., the loss of useful bandwidth spectra) [46]. To eliminate this problem, it is more effective to use the independent (e.g., orthogonal) subcarriers, as shown in Fig. 4.

In such a technique, one can split the total frequency-band spectra of the system on separate overlapping subcarriers (sub-bands or sub-channels) with independent properties. This technique is called the *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* for resolving the problem of spectral overlapping, because each individual subcarrier, being orthogonal with respect to other subcarriers, can be easily recovered despite the overlapping in the total spectra. Thus, there is no need of guard intervals as in FDD or FDMA techniques [22, 64].

Orthogonal Frequency Division Multiplexing. Let us now consider the OFDM procedure as a pure mathematical problem. We assume that the transmitted signal passing the fading channel consisting of N subcarrier (corresponding to N paths) can be generally presented through the fading factor introduced above. If so, a total data signal (e.g., baseband signal) can be presented as a function of the amplitude of the signal received in n th sub-channel, denoted by α_n , and its own phase, $\Delta\phi_n = n\Delta\omega t$, as

$$s(t) = \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \phi_n], \quad 0 < t < T_s, \tag{11}$$



■ Fig. 4. The spectral overlapping for each subcarrier in OFDM technique, when each peak of any subcarrier corresponds to zeros positions of other subcarriers due to their orthogonality

where

$$\omega_0 = \frac{2\pi L}{T_s}; \quad \Delta\omega = \frac{2\pi}{T_s} \quad (12)$$

and L is the length of the channels.

The subcarriers of OFDM are orthogonal on the interval $[0, T_s]$, from which it follows that

$$\int_0^{T_s} s(t) \cdot \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t] dt = \alpha_n T_s \cos \varphi_n;$$

$$\int_0^{T_s} s(t) \cdot \sin[(\omega_0 + n\Delta\omega)t] dt = \alpha_n T_s \sin \varphi_n. \quad (13)$$

The corresponding splitting allows us to obtain a signal for the each carrier in the following manner:

$$s^{(q)}(t) = A_c \sum_{n=0}^{N-1} \alpha_n^{(q)} \cos[(\omega_0 + n\Delta\omega)t + \varphi_n^{(q)}],$$

$$(q-1)T_s < t < qT_s, \quad (14)$$

where

$$a_n^{(q)} \equiv \alpha_n^{(q)} \exp\{-j\varphi_n^{(q)}\}, \quad (15)$$

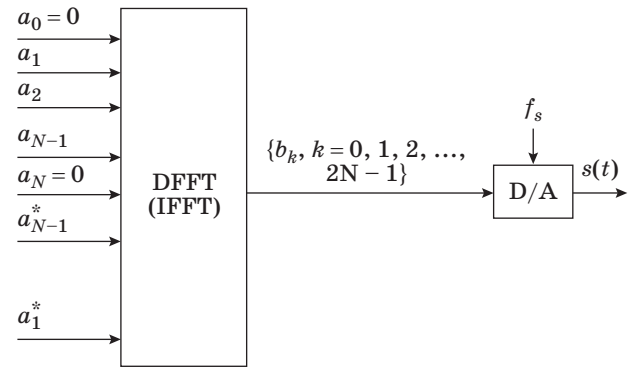
$a_n^{(q)} \in A$, and A is a set of constellation's points containing L points

$$\mathbf{a}^{(q)} \equiv (a_0^{(q)}, a_1^{(q)}, \dots, a_{N-1}^{(q)}), \quad (16)$$

or for orthogonal (independent) sub-channels $a_n^{(q)} \in A$, $n = 0, 1, \dots, N-1$.

From the beginning, the OFDM-technique implementation was based on the *discrete Fourier transform* (DFT), mathematically described by (11) or (14) [64]. Simply speaking, the DFT converts the time domain representation of the desired signal with data to the frequency domain representation. Conversely, the *inverse DFT* (IDFT) converts the signal spectrum, that is, the frequency domain signal data representation to the time domain representation. Later, instead of the DFT/IDFT technique, the direct and inverse fast Fourier transform (denoted DFFT and IFFT, respectively) were used to significantly decrease the implementation complexity and time of the proposed technique. Mathematically both methods are similar, but FFT is much more efficient for the implementation. Below we will briefly present the mathematical aspects of the FFT technique for the OFDM implementation.

First of all, we should state that the corresponding block-diagrams of the IFFT for the transmitter and of the DFFT for the receiver are circuit-wise and have similar blocks (only the block of discrete-to-analogue (D/A) should be changed to A/D, correspondingly).



■ Fig. 5. Block-scheme of the fast Fourier transform technique, inverse (IFFT) at the transmitter and direct (DFFT) at the receiver; D/A is the digital/analogue transformer

Therefore, we present in Fig. 5 the block-diagram of the receiver, where the samples of the multicarrier signal can be obtained by the DFFT of the data symbols.

According to the key goal of the OFDM modulation technique, the corresponding discrete-form presentation of the IFFT algorithm at the transmitter is the following: a sequence of the discrete signals with the noises, $\{b_k\}$, for each independent subcarrier (or sub-channel), is presented in the following manner:

$$b_k = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{n=0}^{2N-1} a_n \exp\{j2\pi nk/2N\} =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2N}} \left[\sum_{n=1}^{N-1} a_n \exp\{j2\pi nk/2N\} + \sum_{n=N+1}^{2N-1} a_{2N-n}^* \exp\{j2\pi nk/2N\} \right] =$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2N}} \left[\sum_{n=1}^{N-1} a_n \exp\{j2\pi nk/2N\} + \sum_{m=N-1}^1 a_m^* \exp\{j2\pi(2N-m)k/2N\} \right], \quad (17)$$

where for the second sum we placed at the bottom and top limits $m = 2N - n$, and therefore, the upper limit will equal $m = 2N - (N - 1) = 1$. In (17), the amplitude of each subcarrier can be presented in the baseband form:

$$a_n = \alpha_n \exp\{j\varphi_n\}. \quad (18)$$

Finally, using direct FFT (DFFT), we finally get

$$b_k = \frac{1}{\sqrt{2N}} \sum_{n=1}^{N-1} \alpha_n \left[\exp\{j(2\pi nk/2N + \varphi_n)\} + \exp\{-j(2\pi nk/2N + \varphi_n)\} \right] =$$

$$= \frac{2}{\sqrt{2N}} \sum_{n=1}^{N-1} \alpha_n \cos[2\pi nk/2N + \varphi_n]. \quad (19)$$

In (19) the following parameters were introduced:

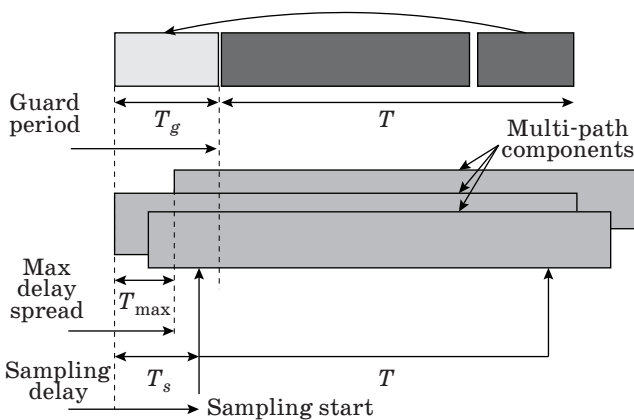
$$\Delta f = \frac{1}{T_s}; \quad \Delta t = \frac{T_s}{2N} = \frac{1}{2N\Delta f}; \quad f_s = \frac{1}{\Delta t}.$$

Now we put a question: what does it mean that in (17) was extended the OFDM symbol sequence by introducing the second term? If a-priori, due to the multiplicative noise occurring in the multipath channel with fading (defined by the maximum delay spread), the previous part of each OFDM symbol will be corrupted by the delay sample of the neighboring OFDM symbol, the orthogonality between symbols will be lost leading to the so-called ISI or ICI [64].

Since OFDM technique excludes usage of the guard intervals compared to the FDMA system (see [22]), it is possible to extend the OFDM symbol sequence with additional replica consisting of N symbols of “zeros” corresponding to the so-called “virtual guard” with a period of T_g .

If so, we can convert the symbol sequence in the time domain at the transmitter using IFFT in such a manner that its time period T_s will be extended on T_g , that is, $T = T_s + T_g$ (Fig. 6). This procedure is called the *prefix cycling* [64].

Using this IFFT technique, described mathematically by (17), we obtain that the first term in (17) will present a desired signal of symbol data, from which at the receiver the transmitted symbol sequence $\{b_k\}$ can be easily recorded. The second term in (17) corresponds to the part of the symbols that can be corrupted by fading during passing via the communication sub-channel. In other words, the second sequence of samples will be transmitted in the guard period (see Fig. 6) as a cycle process. Therefore, this sequence in the literature is called



■ Fig. 6. The procedure of obeying the part of the data of OFDM signal corrupted by fading (defined by the sampling delay time) by extension of the symbol time T with the “virtual” guard period (cyclic prefix)

cycle prefix [64]. This extracted sequence finally will be eliminated at the receiver, if the elements of the second sum in (17) will be substituted as a “zeros” with the time-scale of the “virtual” guard interval T_g .

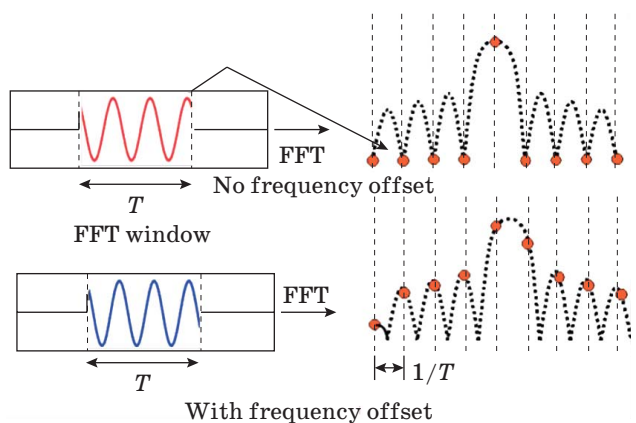
After such a procedure, we can obtain expression (19) as a real symbol replica recorded at the receiver after implementation of the DFFT procedure. Using the above notations, we finally present for each independent sub-channel the signal shaped function at the receiver in the following form, using just a DFFT on a sampled symbol signals $s(t)$:

$$s(k\Delta t) = \sum_{n=1}^{N-1} \alpha_n \cos[2\pi n\Delta f k\Delta t + \varphi_n] = \sum_{n=1}^{N-1} \alpha_n \cos\left[2\pi n\Delta f k \frac{1}{2N\Delta f} + \varphi_n\right] = \frac{\sqrt{2N}}{2} b_k. \quad (20)$$

Indeed, at the receiver, the N independent copies are combined in such a manner to give an optimal replica of the signals with date sequences of samples that are not corrupted by fading. Unfortunately, what is easily to perform using mathematical algorithms cannot be ideally obtained in practice of wireless communication, where the sub-channel time-scale (or length) is not constant, and therefore the preface cycle parameters are also not constant.

Another problem that should be avoided by using the OFDM technique is the frequency shift of the received signal spectrum called the *frequency offset* [64]. Due to this effect the IFFT procedure at the transmitter and DFFT procedure at the receiver are not “symmetrical”, i.e., they do not correspond strictly to each other. The effect of the frequency offset is clearly seen in Fig. 7.

According to frequency shifting, the adjacent subcarriers can be affected by ICI caused by the energy leakage of the neighbor symbol signals to each other. As was shown in [46], the overall energy of

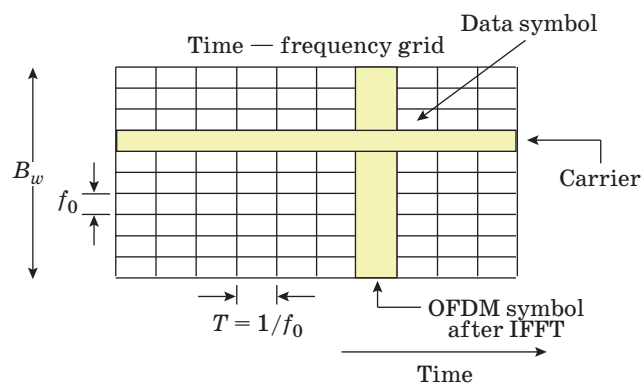


■ Fig. 7. Effects of frequency offset on OFDM FFT modulation technique

ICI grows with the frequency offset. To avoid this effect, a frequency domain equalization by using N separate equalizers for each subcarrier is needed that significantly increase the complexity of the receiver implementation. For further reading on this approach, we refer the reader to the references [13, 18–20, 64].

To complete our explanation of the OFDM technique we should mention that before starting for the specific channel splitting into N sub-channels, the coherent bandwidth b_{cn} of the sub-channel (we assume that they have the same bandwidth $\Delta f_n \equiv f_0$, $n \in [1, N - 1]$) should be estimated a-priori. Thus, as was shown experimentally and was described in [102] during a special campaign carried out in the city of Tokyo for two scenarios of heavy (the first scenario) and lower layout (the second scenario) of buildings, in the first scenario was obtained $b_{cn} \approx 70\div 90$ kHz, with an average value of $b_{cn} \approx 80$ kHz, whereas for the second scenario $b_{cn} \approx 390\div 420$ kHz. If now, after the OFDM division procedure on N sub-channels, the bandwidth f_0 of each sub-carrier was decided to be $f_0 = 100$ kHz, as it follows from the second scenario, f_0 is smaller than the corresponding bandwidth b_{cn} , and the OFDM procedure fully obeys fading phenomena in each sub-channel for the second scenario. However, such a division procedure is not effective in obeying any fading phenomena for the first scenario, where $f_0 \geq b_{cn}$. Finally, a strong frequency selective fading occurring in the dense urban scene can affect each sub-channels by corrupting the signal data for each subscriber located in the area of service. This example emphasizes the fact that before using the OFDM procedure, each designer of wireless network should estimate the fading parameters for each urban scenario, such as the time delay spread and coherence bandwidth (for stationary channels) and the Doppler shift bandwidth and time of coherence (for dynamic channel).

Orthogonal Frequency Division Multiple Access. From equation (20) it is clearly seen that the OFDM is a one-dimensional (1-D) technique because the branches are splitting in the frequency domain only. A new multiple access technique was introduced during the 1st decade (see references [13, 18–20, 64]), which is two-dimensional (2-D) splitting the signal in bins both in time and frequency domain. This multicarrier access procedure is called Orthogonal Frequency Division Multiple Access. Here, we will briefly explain its algorithm and difference with respect to standard OFDM modulation technique. For this purpose, we arrange the corresponding scheme of each carrier signal data presentation in the joint 2D time-frequency domain, as shown in Fig. 8. One can that in an OFDMA system for each carrier we get the narrow bandwidth $f_0 = B_w/N$ with the inter-carrier separation that equals $1/T_s \ll f_0$.



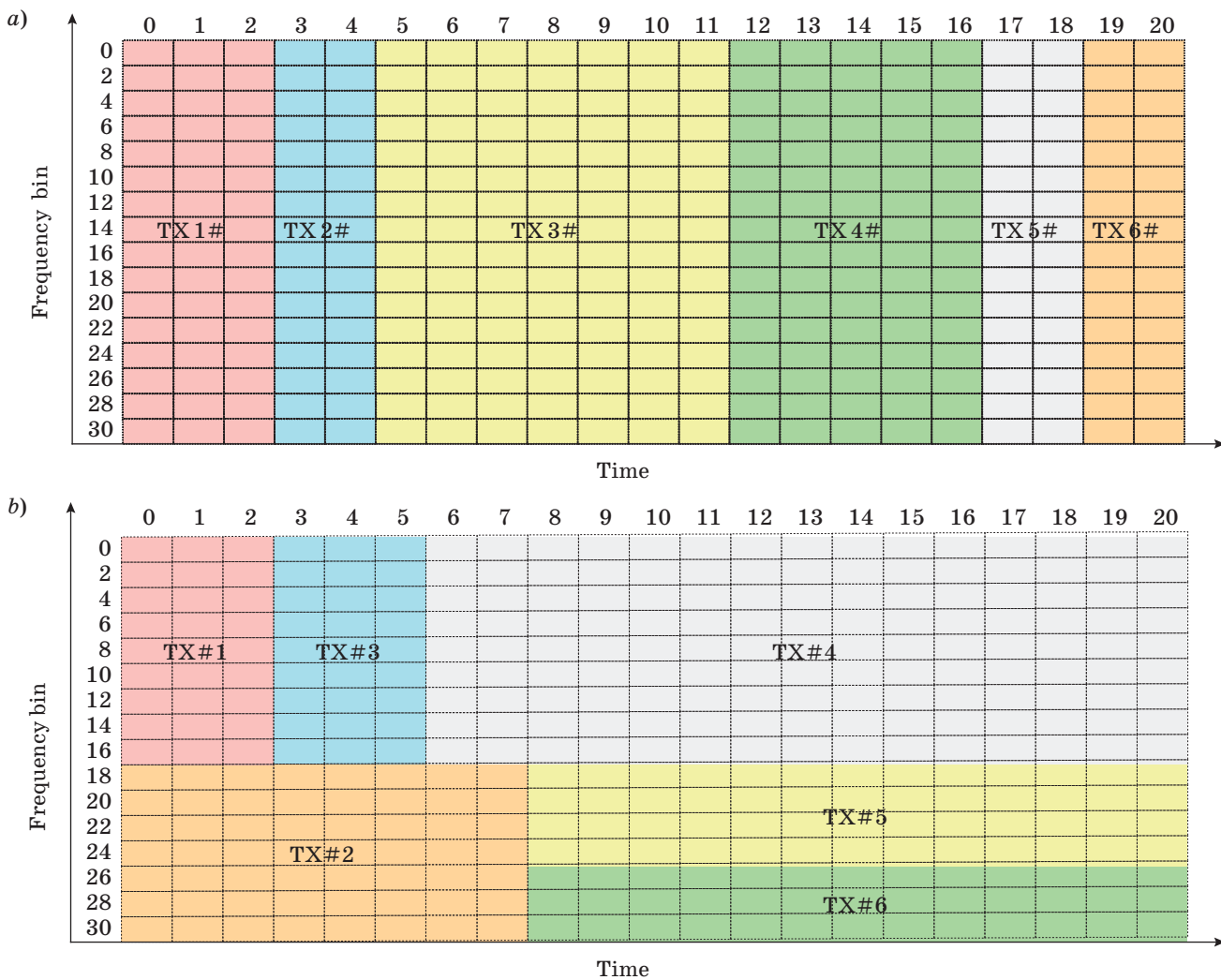
■ Fig. 8. 2D time-frequency signal presentation according to OFDMA technique

We should also mention that during this procedure of splitting the total bandwidth B_w into N sub-channels, the each carrier bandwidth f_0 must be shorter than the bandwidth of coherence of each sub-channel, that is, $f_0 < b_{cn}$, as was proved experimentally in [102]. Taking into account the above constrain, we can, by using OFDMA technique, fully exclude the ICI, that is, the overlapping between each separate bin and, finally, we do not spend bits for guarding effects, as was used in narrowband technologies, such as the FDMA and TDMA, definitions of which were introduced in [22]. Therefore, the OFDMA technique can be considered as a hybrid FDMA/TDMA scheme described above, because it allows users to flexibly share both the frequency sub-band (e.g., the carrier) and the time slot. Mentioned above allows us to state the following features of OFDMA:

- OFDMA is based on OFDM, the multiple narrow-band subcarriers modulated in parallel;
- OFDMA combines OFDM modulation and a multiple access scheme, let say TDMA, as it is shown in Fig. 9, a;
- OFDMA combines time division and frequency division multiple access techniques, that is, OFDMA = TDMA+FDMA (Fig. 9, b).

Moreover, the above analysis allows us to notice that using a large number of parallel narrowband sub-carriers instead of a single wideband carrier to transport information, we can:

- very easy and efficiently deal with time-dispersive multipath fading;
- protect against narrow-band interference due to the orthogonality of the sub-carrier channels;
- offer the flexibility to adapt the transmission rate per narrowband sub-channel (e.g. sub-carrier) to the most suitable transmission electronic schemes at the transmitter;
- reduce some of the electronic elements at the receiver, because using such a technique, we do not need to implement the N oscillators, filters, and so forth, for each carrier.



■ Fig. 9. OFDMA as a combination of OFDM modulation and TDMA technology (a) and OFDMA as a combination OFDM modulation simultaneously with FDMA and TDMA technologies (b)

At the same time we notice that the OFDM/OFDMA techniques have some disadvantages of this technique, such as:

- this technique is sensitive to frequency and phase offsets;
- it has a peak-to-average problem that reduces the power efficiency of the RF amplifier at the transmitter (for any multicarrier technique).

Despite the fact that the OFDM/OFDMA techniques have the above disadvantages, they were taken strong candidates for most of the 3G and 4G wireless networks and were adapted in various modern standard technologies, such as WPAN or Bluetooth, WLAN, which is equivalent to WiFi, WiMAX, LTE, and so on. Currently, the OFDMA technology is intensively used in IEEE 802.16/WiMAX standard networks and in their combination with MIMO systems (see brief descriptions of the corresponding networks below in Section 4).

2.4. Time Advanced Multicarrier Diversity Techniques

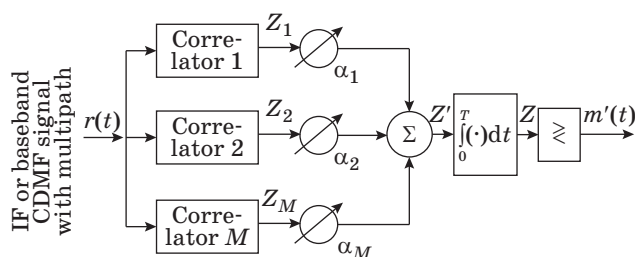
As was defined in [21, 22], in situations when the signal bandwidth is larger than the coherence bandwidth of the channel, that is, $B_w \gg B_c$, the channel is frequency selective and fast. If the same channel is subdivided into a number of orthogonal frequency-division multiplexing sub-channels having a mutual separation in center frequencies of at least $\Delta f \approx B_c$, the effects of fading on the signal data transmitted via each sub-channel can be eliminated.

However, in the case of wideband modulation, such as in the CDMA technique, the multiple sequences of the data signal from each subscriber arriving at the receiver can destroy the independence between the codes (i.e., their orthogonal properties) if their delays will exceed a single chip duration. This usually occurs, if the chip rate exceeds the coherent bandwidth of the sub-channel, that is,

$R_c > b_{cw}$. In such scenarios an alternative method is usually used on the basis of a so-called Rake detector [5–7]. Here a time diversity technique is used, assuming $T_s \gg T_c = 1/b_{cw}$, that is, the information signals duration exceeds the coherence time of the sub-channel. In this case multiple repetitions of the signal will be received with independent fading conditions. In other words, we can obtain time diversity by transmitting the same signal multiple times, separated signals apart in time in such a manner that the channel multipath fading will be decorrelated between replicas.

As was shown in references [5–7], the one modern implementation of time diversity involves the use of a RAKE receiver, working as n -delay line through which the received signal is passed. Its action is somewhat analogous to an ordinary garden rake, and consequently, the name “RAKE receiver” has been used for this device by Price and Green in 1958 [5–7].

As we mentioned in Section 1 (see also [22]), in DS-SS system (or CDMA), the chip rate is much greater than the fading bandwidth of the channel. CDMA spreading PN-codes are designed to provide very low correlation between successive chips. Thus, propagation delay spread in the wireless channel merely provides multiple versions of the transmitted signal at the receiver. If these multipath components are delayed in time by more than the chip duration, they appear like uncorrelated noise at the CDMA receiver, and an equalizer is not required. However, since there is useful information in the multipath components, CDMA receivers can combine the time-delayed versions of the original signal transmission in order to improve the SNR at the receiver. The RAKE receiver is usually used for such purposes. This receiver, using the tapped delay line structure with discrete time intervals equal to the chip period T_c , multiplies several copies of the received signal by versions of a spreading code, shifted by multiples of T_c . Finally, a Rake detector collects the time-shifted versions of the original signal by provide a separate correlation receiver for each of the multipath signals. The RAKE receiver, shown in Fig. 10, is essentially a diversity receiver designed specially for CDMA,



■ Fig. 10. Block-scheme of the RAKE receiver

where the diversity is provided by the fact that the multipath components are practically uncorrelated from one another, when their relative propagation delays exceed a chip period T_c .

As it is seen from Fig. 10, a RAKE receiver utilizes multiple correlators to separately detect the M multipath components with deep fading (i.e., strongest multipath components). Such a procedure allows the components of the desired signal with data (e.g., with a original bits' sequence) to be recovered and recombined with the corresponding time shifts due to the channel removing.

Let us briefly analyze the RAKE receiver working process in more details following block-scheme presented in Fig. 10. The outputs of each correlator are weighted to provide a better estimate of the transmitted signal. Demodulation and bit decisions are then based on the weighted outputs of the M correlators. Assume M correlators are used in a CDMA receiver to capture the M strongest multipath components. A weighting network is used to provide a linear combination of the correlator output for bit detection.

The first correlator is synchronized to the strongest multipath component of the signal $r(t)$ with data and multiplicative noise due to fading. The multipath component m_2 arrives τ_1 later than component m_1 . The second correlator is synchronized to the component m_2 . It is correlated strongly with m_2 , but has low correlation with m_1 . Note, if one correlator is used, as it usually done for single-carrier systems, such as FDMA and TDMA, the strong fading corrupted the channel cannot be eliminated by single receiver. Then bit decisions based on only a single correlation may produce a large bit rate of the information data passing through such single-carrier channel. In a RAKE receiver, if the output from one correlator is corrupted by fading, the others may not be, and the corrupted signal may be discounted through the weighting process. Decisions based on the combination of the M separate decision statistics offered by the RAKE provide a form of diversity which can overcome fading and thereby improve CDMA reception. The M decision statistics are weighted to form an overall decision statistics, as shown in Fig. 10.

The outputs of the M correlators are denoted as Z_1, Z_2, \dots, Z_M . They are weighted by $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M$, respectively. The weighting coefficients are based on the power or the SNR from each correlator output. If the power or SNR is small out of the particular correlator, it will be assigned a small weighting factor. As in the combining diversity scheme, the overall signal Z' is given

$$Z' = \sum_{m=1}^M \alpha_m Z_m. \quad (21)$$

The weighting coefficients, α_m , are normalized to the output signal power of the correlator in such a way that the coefficients sum is equal to one, shown by the following formula:

$$\alpha_m = \frac{Z_m^2}{\sum_{m=1}^M Z_m^2}. \quad (22)$$

As in the case of adaptive equalizers and diversity combining, there are many ways to generate weighting coefficients. Choosing weighting coefficients based on the actual outputs of the correlators yields better RAKE receiver performance. This performance gives a conditional error probability in the form of

$$P(\gamma_b) = Q\left(\sqrt{\gamma_b(1-\rho_r)}\right), \quad (23)$$

where $\rho_r = 0$ for the orthogonal signals and $\rho_r = -1$ for antipodal signals; the Q-function was defined in the literature via the error function [1–22]. Here γ_b is the current SNR, which equals:

$$\gamma_b = \frac{E_b}{N_0} \sum_{k=1}^M \alpha_k^2 = \sum_{k=1}^M \gamma_k. \quad (24)$$

For Rayleigh fading channel, we can finally obtain the probability for instantiations SNR, γ_k :

$$p(\gamma_k) = \frac{1}{\bar{\gamma}_k} \exp\left\{-\frac{\gamma_k}{\bar{\gamma}_k}\right\}, \quad (25)$$

where, as above, $\bar{\gamma}_k = E_b \langle \alpha_k^2 \rangle / N_0$ is an average SNR for the k^{th} path (k^{th} subcarrier or sub-channel).

To be continued.

References

- Jakes W. C. *Microwave Mobile Communications*. Wiley, New York, 1974.
- Lee S. C. Y. *Mobile Cellular Telecommunication Systems*. McGraw-Hill, New York, 1989.
- Steele R. *Mobile Radio Communication*. IEEE Press, 1992.
- Proakis J. G. *Digital Communications* (3d ed.). McGraw-Hill, New York, 1995.
- Stuber G. L. *Principles of Mobile Communications*. Kluwer Academic Publishers, Boston, 1996.
- Peterson R. L., Ziemer R. E., and Borth D. E. *Introduction to Spread Spectrum Communications*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 1995.
- Rappaport T. S. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 1996; (2nd ed.) in 2001.
- Steele R., and Hanzo L. *Mobile Communications*. 2nd ed. John Wiley & Sons, Chichester, 1999.
- Li J. S., and Miller L. E. *CDMA Systems Engineering Handbook*. Artech House, Boston-London, 1998.
- Saunders S. R. *Antennas and Propagation for Wireless Communication Systems*. John Wiley & Sons, Chichester, 2001.
- Burr A. *Modulation and Coding for Wireless Communications*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 2001.
- Molisch A. F. (Ed.). *Wideband Wireless Digital Communications*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000.
- Paetzold M. *Mobile Fading Channels: Modeling, Analysis, and Simulation*. John Wiley & Sons, Chichester, 2002.
- Simon M. K., Omura J. K., Scholtz R. A., and Levitt B. K. *Spread Spectrum Communications Handbook*. McGraw-Hill, New York, 1994.
- Glisic S., and Vucetic B. *Spread Spectrum CDMA Systems for Wireless Communications*. Artech House, Boston-London, 1997.
- Dixon R. C. *Spread Spectrum Systems with Commercial Applications*. John Wiley & Sons, Chichester, 1994.
- Viterbi A. J. *CDMA: Principles of Spread Spectrum Communication*. Addison-Wesley Wireless Communications Series, 1995.
- Goodman D. J. *Wireless Personal Communication Systems*. Addison-Wesley, Reading, Massachusetts, 1997.
- Schiller J. *Mobile Communications*. 2nd ed. Addison-Wesley Wireless Communications Series, 2003.
- Molisch A. F. *Wireless Communications*. John Wiley & Sons, Chichester, 2007.
- Blaunstein N., and Christodoulou C. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Links*. 1st ed. Wiley & Sons, New Jersey, 2007.
- Blaunstein N., and Christodoulou C. *Radio Propagation and Adaptive Antennas for Wireless Communication Networks — Terrestrial, Atmospheric and Ionospheric*. 2nd ed. Wiley & Sons, New Jersey, 2014.
- Hadar O., Bronfman I., and Blaunstein N. S. Optimization of Error Concealment Based on Analysis of Fading Types. Part 1. Statistical Description of a Wireless Video Channel, Models of BER Determination and Error Concealment of Video Signals. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 1, pp. 72–82. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.1.72
- Hadar O., Bronfman I., and Blaunstein N. S. Optimization of Error Concealment Based on Analysis of Fading Types. Part 2. Modified and New Models of Video Signal Error Concealment. Practical Simulations and their Results. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 2, pp. 67–76. doi:10.15217/issn1684-8853.2017.2.67
- Vostrikov A., Kurtyanik D., Sergeev A. Choosing Embedded WI-FI Module for Mobile Optic-Information Systems. *Vestnik*, 2018, no. 4, pp. 26–29 (In Russian).

26. **Vostrikov A., Balonin Yu., Kurtyanik D., Sergeev A., Sinitsyna O.** On Hybrid Method of Video Data Protection in IP-networks. *Telekommunikatsii* [Telecommunications], 2018, no. 2, pp. 34–39 (In Russian).
27. **Erosh I., Sergeev A., Filatov G.** Protection of Images During Transfer via Communication Channels. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2007, no. 5, pp. 20–22 (In Russian).
28. **Sergeev A.** Generalized Mersenne Matrices and Balonin's Conjecture. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, vol. 48, no. 4, pp. 214–220.
29. **Sergeev A. M., Blaunstein N. S.** Orthogonal Matrices with Symmetrical Structures for Image Processing. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2017, no. 6, pp. 2–8 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2017.6.2
30. *Modulation and Coding Techniques in Wireless Communications*. Ed. by Krouk E., and Semenov S. John Wiley & Sons, Chichester, United Kindom, 2011.
31. *Specification of the Bluetooth System*. Dec. 1, 1999. Available at: www.bluetooth.com. (accessed 15 August 2017).
32. **Junaid M., Mufti M., and Ilyas M. U.** Vulnerabilities of IEEE 802.11i Wireless LAN. *Trans. Eng., Comput. and Technol.*, Feb. 2006, vol. 11, pp. 228–233.
33. *IEEE 802.11 Working Group*. Available at: <http://grouper.ieee.org/groups/802/11/index.html> (accessed 15 August 2017).
34. *Wireless Ethernet Compatibility Alliance*. Available at: <http://www.wirelessethernet.org/index.html> (accessed 15 August 2017).
35. **Sharon O., and Altman E.** An Efficient Polling MAC for Wireless LANs. *IEEE/ACM Trans. on WiMAX Systems Evaluation Methodology V2.1etworking*, 2001, vol. 9, no. 4, pp. 439–451.
36. IEEE std. 802.11-1999: *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHL) Specifications*, 1999.
37. **Qainkhani I. A., and Hossain E.** A Novel QoS-aware MAC Protocol for Voice Services over IEEE 802.11-based WLANs. *J. Wireless Communic. and Mobile Comput.*, 2009, vol. 9, pp. 71–84.
38. Wireless LAN Medium Access Control and Physical Layer Specification. *IEEE Press*, 1999, Jan. 14.
39. **Zyren J.** *Reliability of IEEE 802.11 High Rate DSSS WLANs in a High Density Bluetooth Environment*; 802.11 section, 8–6, 1999.
40. **Perahia E.** IEEE 802.11n Development: History, Process, and Technology. *IEEE Communic. Magazine*, 2008, vol. 46, pp. 46–55.
41. **Ni Q., Romshani L., and Turletti T.** A Survey of QoS Enhancements for IEEE 802.11 Wireless LAN. *J. Wireless Communic. and Mobile Comput.*, 2004, vol. 4, no. 5, pp. 547–566.
42. **Wang W., Liew S. C., and Li V. O. K.** Solutions to Performance Problems in VoIP over 802.11 Wireless LAN. *IEEE Trans. Veh. Tech.*, 2005, vol. 54, no. 1, pp. 366–384.
43. **Robinson J. W., and Randhawa T. S.** Saturation Throughput Analysis of IEEE 802.11e Enhanced Distributed Coordination Function. *IEEE J. Select. Areas of Communic.*, 2004, vol. 22, no. 5, pp. 917–928.
44. **Wang P., Jiang H., and Zhuang W.** 802.11e Enhancement for Voice Service. *IEEE Wireless Communic.*, 2006, vol. 13, no. 1, pp. 30–35.
45. **Perez-Costa X., and Camps-Mur D.** IEEE 802.11e QoS and Power Saving Features Overview and Analysis of Combined Performances. *IEEE Wireless Communic.*, 2010, vol. 17, no. 2, pp. 88–96.
46. **Kopsel A., and Wolisz A.** Voice Ptransmission in an IEEE 802.11 WLAN Based Access Network. *Proc. of 4th ACM Intern. Workshop on Wireless Mobile Multimedia (WoWMoM)*, Rome, Italy, 2001, pp. 24–33.
47. **Veeraraghavan M., Chocker N., and Moors T.** Support of Voice Services in IEEE 802.11 Wireles LANs. *Proc. of IEEE INFOCOM'01*, 2001, vol. 1, pp. 488–497.
48. **Kim Y.-J., and Suh Y.-J.** Adaptive Polling MAC Schemes for IEEE 802.11 Wireless LANs Supporting Voice-over-IP (VoIP) Services. *J. Wireless Communic. and Mob. Comput.*, 2004, vol. 4, pp. 903–916.
49. **Andersen J. B.** Array Gain and Capacity of Known Random Channels with Multiple Element Arrays at Both Ends. *IEEE J. Selected Areas in Coomun.*, 2000, vol. 18, pp. 2172–2178.
50. **Blaunstein N., and Yarkoni N.** Capacity and Spectral Efficiency of MIMO Wireless Systems in Multipath Urban Environment with Fading. *Proc. of the European Conf. on Antennas and Propagation, EuCAP-2006*, Nice, France, 2006, pp. 111–115.
51. **Tsalolihin E., Bilik I., and Blaunstein N.** MIMO Capacity in Space and Time Domain for Various Urban Environments. *Proc. of 5th European Conf. on Antennas and Propagation, EuCAP*, Rome, Italy, 11–15 April, 2011, pp. 2321–2325.
52. **Chizhik D., Farrokhi F., Ling J., and Lozano A.** Effect of Antenna Separation on Capacity of BLAST in Correlated Channels. *IEEE Commun. Letters*, 2000, vol. 4, no. 11, pp. 337–339.
53. **Gesbert D., Shafi M., Shiu D., Smith P., and Naguib A.** From Theory to Practice: An Overview of MIMO Space-Time Coded Wireless Systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Commun.*, 2003, vol. 21, no. 3, pp. 281–302.
54. *Radioplan*. RPS user Manual 5.4. Available at: <http://www.actix.com> (accessed 15 August 2017).
55. **Philippe J., Schumacher L., Pedersen K., Mogensen P., and Frederiksen F.** A Stochastic MIMO Radio Channel Model with Experimental Validation. *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, 2002, vol. 20, no. 6, pp. 1211–1226.
56. **Gesbert D., Boleskei H., Gore D. A., and Paulraj A. J.** Outdoor MIMO Wireless Channels: Models and Performance Prediction. *IEEE Trans. Commun.*, 2002, vol. 50, no. 6, pp. 1926–1934.
57. **Boleskei H., Borgmann M., and Paulraj A. J.** On the Capacity of OFDM-based Spatial Multiplexing

- Systems. *IEEE Trans. Commun.*, 2002, vol. 50, no. 1, pp. 225–234.
58. Boleskei H., Borgmann M., and Paulraj A. J. Impact of the Propagation Environment on the Performance of Space-Frequency Coded MIMO-OFDM. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 2003, vol. 21, no. 2, pp. 427–439.
 59. Chizik D., Ling J., Wolniansky P. W., Valenzuela R. A., Costa N., and Huber K. Multiple-input-multiple-output Measurements and Modeling in Manhattan. *IEEE J. on Selected Areas in Commun.*, 2003, vol. 23, no. 2, pp. 321–331.
 60. Oyman O., Nabar R. U., Boleskei H., and Paulraj A. J. Characterizing the Statistical Properties of Mutual Information in MIMO Channels. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2003, vol. 51, pp. 2784–2795.
 61. Paulraj A. J., Gore D. A., Nabar R. U., and Boleskei H. An Overview of MIMO Communications – A Key to Gigabit Wireless. *Proc. of IEEE*, 2004, vol. 92, no. 2, pp. 198–218.
 62. Forenza A., et al. Adaptive MIMO Transmission for Exploiting the Capacity of Spatially Correlated Channels. *IEEE Trans. Vehic. Technol.*, 2007, vol. 56, no. 2, pp. 619–630.
 63. Foschini G. J., and Gans M. J. On Limits of Wireless Communications in a Fading Environment when using Multiple Antennas. *Wireless Person. Communic.*, 1998, vol. 6, no. 3, pp. 311–335.
 64. Proakis J. G. *Digital Communications*. 4th ed. McGraw-Hill, New York, 2001.
 65. Paulraj A. J., and Kailath T. *Increasing Capacity in Wireless Broadcast Systems using Distributed Transmission/Directional Reception (DTDR)*. US patent 5,345,599, Sept. 6, 1994.
 66. Foschini G. J. Layered Space-time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment when using Multiple Antennas. *Bell Labs. Tech. J.*, 1996, vol. 1, no. 2, pp. 41–59.
 67. Golden G. D., Foschini G. J., Valenzuela R. A., and Wolniansky P. W. Direction Algorithm and Initial Laboratory Results using the V-BLAST Space-time Communication Architecture. *Electron. Lett.*, 1999, vol. 35, no. 1, pp. 14–15.
 68. Nabar R. U., Boleskei H., Erceg V., Gesbert D., and Paulraj A. J. Performance of Multiantenna Signaling Techniques in the Presence of Polarization Diversity. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2002, vol. 50, no. 10, pp. 2553–2562.
 69. Zheng L., and Tse D. Diversity and Multiplexing: A Fundamental Tradeoff in Multiple Antenna Channels. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2003, vol. 49, no. 5, pp. 1073–1096.
 70. Varadarajan B., and Barry J. R. The Rate-diversity Trade-off for Linear Space-time Codes. *Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf.*, 2002, vol. 1, pp. 67–71.
 71. Godovarti M., and Nero A. O. Diversity and Degrees of Freedom in Wireless Communications. *Proc. ICASSP*, May 2002, vol. 3, pp. 2861–2864.
 72. Raleigh G. G., and Cioffi J. M. Spatio-temporal Coding for Wireless Communication. *IEEE Trans. Commun.*, 1998, vol. 46, no. 3, pp. 357–366.
 73. Wittniben A. Base Station Modulation Diversity for Digital Simulcast. *Proc. IEEE Vehicular Tech. Conf.*, May 1991, pp. 848–853.
 74. Seshadri N., and Winters J. H. Two Signaling Schemes for Improving the Error Performance of Frequency-Division-Duplex (FDD) Transmission Systems using Transmitter Antenna Diversity. *Int. J. Wireless Inform. Networks*, 1994, vol. 1, no. 1, pp. 49–60.
 75. Alamouti S. M. A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications. *IEEE J. Select. Areas Commun.*, 1998, vol. 16, no. 8, pp. 1451–1458.
 76. Tarokh V., Seshandri N., and Calderbank A. R. Space-time Codes for High Data Rate Wireless Communication: Performance Criterion and Code Construction. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 1999, vol. 45, no. 5, pp. 1456–1467.
 77. Ganesan G., and Stoica P. Space-time Block Codes: A Maximum SNR Approach. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2001, vol. 47, no. 4, pp. 1650–1656.
 78. Hassibi B., and Hochwald B. M. High-rate Codes that are Linear in Space and Time. *IEEE Trans. Inform. Theory*, 2002, vol. 48, no. 7, pp. 1804–1824.
 79. Heath Jr., R. W., and Paulraj A. J. Linear Dispersion Codes for MIMO Systems based on Frame Theory. *IEEE Trans. Signal Process.*, 2002, vol. 50, no. 10, pp. 2429–2441.
 80. Winters J. H. The Diversity Gain of Transmit Diversity in Wireless Systems with Rayleigh Fading. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 1998, vol. 47, no. 1, pp. 119–123.
 81. Bjerke B. A., and Proakis J. G. Multiple-antenna Diversity Techniques for Transmission over Fading Channels. *Proc. Wireless Communic. and Networking Conf.*, Sept. 1999, vol. 3, pp. 1038–1042.
 82. Heath Jr., R. W., and Paulraj A. J. Switching between Diversity and Multiplexing in MIMO Systems. *IEEE Trans. Commun.*, 2005, vol. 53, no. 6, pp. 962–968.
 83. Chandrasekhar V., Andrews J. G., and Gatherer A. Femtocell Networks: A Survey. *IEEE Commun. Magazine*, 2003, vol. 46, no. 9, pp. 59–67.
 84. Shannon C. E. A Mathematical Theory of Communication. *Bell System Tech. J.*, July and October 1948, vol. 27, pp. 379–423 and pp. 623–656.
 85. Yeh S.-P., Talwar S., Lee S.-C., and Kim H. WiMAX Femtocells: A Perspective on Network Architecture, Capacity, and Coverage. *IEEE Commun. Magazine*, 2008, vol. 46, no. 10, pp. 58–65.
 86. Knisely D. N., Yoshizawa T., and Favichia F. Standardization of Femtocells in 3GPP. *IEEE Commun. Magazine*, 2009, vol. 47, no. 9, pp. 68–75.
 87. Knisely D. N., and Favichia F. Standardization of Femtocells in 3GPP2. *IEEE Commun. Magazine*, 2009, vol. 47, no. 9, pp. 76–82.
 88. Chandrasekhar V., and Andrews J. G. Uplink Capacity and Interference Avoidance for Two-tier Femtocell

- Networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2009, vol. 8, no. 7, pp. 3498–3509.
89. **Calin D., Claussen H., and Uzunalioglu H.** On Femto Deployment Architectures and Macrocell Offloading Benefits in Joint Macro-femto Deployments. *IEEE Commun. Magazine*, 2010, vol. 48, no. 1, pp. 26–32.
 90. **Kim R. Y., Kwak J. S., and Etemad K.** WiMAX Femtocel: Requirements, Challenges, and Solutions. *IEEE Commun. Magazine*, 2009, vol. 47, no. 9, pp. 84–91.
 91. **Lopez-Perez D., Valcarce A., de la Roche G., and Zhang J.** OFDMA Femtocells: A Roadmap on Interference Avoidance. *IEEE Commun. Magazine*, 2009, vol. 47, no. 9, pp. 41–48.
 92. **Chandrasekhar V., Andrews J. G., Muharemovic T., Shen Z., and Gatherer A.** Power Control in Two-tier Femtocell Networks. *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2009, vol. 8, no. 8, pp. 4316–4328.
 93. **Yavuz M., Meshkati F., Nanda S., et al.** Interference Management and Performance Analysis of UMTS/HSPA+Femtocells. *IEEE Commun. Magazine*, 2009, vol. 47, no. 9, pp. 102–109.
 94. *Femto Forum*. Available at: <http://www.femtoforum.org/femto/> (accessed 15 August 2017).
 95. **Blaunstein N. S., Sergeev M. B.** Channel Capacity Prediction for Femtocell-Macrocell Deployment Strategies in the Urban Environments with Congested Layout of Users. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 3, pp. 54–62 (In Russian).
 96. **Tsalolihin E., Bilik I., Blaunstein N., and Babich Y.** Channel Capacity in Mobile Broadband Heterogeneous Networks based on Femto Cells. *Proc. of EuCAP-2012 Int. Conf.*, Prague, Czech Republic, March 26–30, 2012, pp. 1–5.
 97. **Blaunstein N., and Levin M.** VHF/UHF Wave Attenuation in a City with Regularly Spaced Buildings. *Radio Science*, 1996, vol. 31, no. 2, pp. 313–323.
 98. **Blaunstein N.** Prediction of Cellular Characteristics for Various Urban Environments. *J. Anten. and Propagatat. Magazine*, 1999, vol. 41, no. 6, pp. 135–145.
 99. **Blaunstein N.** Average Field Attenuation in the Non-regular Impedance Street Waveguide. *IEEE Trans. on Anten. and Propagatat.*, 1998, vol. 46, no. 12, pp. 1782–1789.
 100. **Blaunstein N., Katz D., Censor D., et al.** Prediction of Loss Characteristics in Built-up Areas with Various Buildings' Overlay Profiles. *J. Anten. and Propagatat. Magazine*, 2002, vol. 44, no. 1, pp. 181–192.
 101. **Yarkoni N., Blaunstein N., and Katz D.** Link Budget and Radio Coverage Design for Various Multipath Urban Communication Links. *Radio Science*, 2007, vol. 42, no. 2, pp. 412–427.
 102. **Katz D., Blaunstein N., Hayakawa M., and Kishiki Y. S.** Radio Maps Design in Tokyo City based on Stochastic Multi-parametric and Deterministic Ray Tracing Approaches. *J. Anten. and Propag. Magazine*, 2009, vol. 51, no. 5, pp. 200–208.
 103. **Okumura Y., Ohmori E., Kawano T., and Fukuda K.** Field Strength and its Variability in the VHF and UHF Land Mobile Radio Service. *Review Elect. Communic. Lab.*, 1968, vol. 16, no. 9-10, pp. 825–843.
 104. **Wells P. J.** The Attenuation of UHF Radio Signal by Houses. *IEEE Trans. Veh. Technol.*, 1977, vol. 26, no. 4, pp. 358–362.
 105. **Bertoni H. L.** *Radio Propagation for Modern Wireless Systems*. Prentice Hall PTR, New Jersey, 2000.
 106. **Seidel S. Y., and Rappaport T. S.** 914 MHz Path Loss Prediction Models for Indoor Wireless Communications in Multifloored Buildings. *IEEE Trans. Anten. Propagatat.*, 1992, vol. 40, no. 2, pp. 200–217.
 107. **Yarkoni N., and Blaunstein N.** Prediction of Propagation Characteristics in Indoor Radio Communication Environments. *J. Electromagnetic Waves and Applications: Progress in Electromag. Research, PIER*, 2006, vol. 59, pp. 151–174.
 108. **Yu W., Ginis G., and Cioffi J. M.** Distributed Multi-user Power Control for Digital Subscriber Lines. *IEEE J. Select. Areas in Communic.*, 2002, vol. 20, no. 5, pp. 1105–1115.
 109. **Scutari G., and Barbarossa D. P. P.** Optimal Linear Precoding Strategies for Wideband Non-cooperative Systems based on Game Theory. Part II: Algorithms. *IEEE Trans. Signal Processing*, 2008, vol. 56, no. 3, pp. 1250–1267.
 110. **Scutari G., Palomar D. P., and Barbarossa S.** Asynchronous Iterative Water-filling for Gaussian Frequency-selective Interface Channels. *IEEE Trans. Information Theory*, 2008, vol. 54, no. 7, pp. 2868–2878.
 111. *WiMAX Forum. WiMAX System Evaluation Methodology*, V2-1, 2008. 230 p.
 112. **Eklund K., Marks R. B., Kenneth L., Wang and S.** IEEE standard 802.16: A Technical Overview on the WirelessMANTM Air Interface for Broadband Wireless Access. *IEEE Commun. Magazine*, 2002, vol. 40, pp. 98–107.
 113. **Ohseki T., Morita M., and Inoue.** Burst Constructions and Packet Mapping Scheme for OFDMA Downlink in IEEE 802.16 Systems. *Proc. IEEE Global Telecommunic. Conf.*, Washington, DC, 2007, pp. 4307–4311.
 114. **Sengupta S., Chatterjee M., and Ganguly S.** Improving Quality of VoIP Streams over WiMAX. *IEEE Trans. Comput.*, 2008, vol. 57, pp. 145–156.
 115. **So-In Chakchai, Raj Jain, and Abdel-Karim Tami.** Scheduling in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks: Key Issues and a Survey. *IEEE J. Select. Areas of Communicat.*, 2009, vol. 27, no. 2, pp. 156–171.
 116. **Niyato D., and Hossain E.** Queue-aware Uplink Bandwidth Allocation and Rate Control for Polling Service in IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks. *IEEE Trans. on Mobile Comput.*, 2006, vol. 5, no. 6, pp. 668–679.

117. Cicconetti C., Erta A., Lenzini L., and Mingozi E. Performance Evaluation of the IEEE 802.16 MAC for QoS Support. *IEEE Trans. on Mobile Comput.*, 2007, vol. 6, no. 1, pp. 26–38.
118. Taahol P., Salkintzis A. K., and Iyer J. Seamless Integration of Mobile WiMAX in 3GPP Networks. *IEEE Commun. Magazine*, Oct. 2008, pp. 74–85.
119. Etemad K. Overview of Mobile WiMAX Technology and Evolution. *IEEE Commun. Magazine*, 2008, vol. 46, pp. 31–40.
120. Niyato D., and Hossain E. Integration of WiMAX and WiFi: Optimal Pricing for Bandwidth Sharing. *IEEE Commun. Magazine*, 2007, vol. 45, no. 5, pp. 140–146.
121. Nie J., Wen J., Dong O., and Zhou Z. A Seamless Handoff in IEEE 802.16a and IEEE 802.11 Hybrid Networks. *Proc. Intern. Conf. on Convergence Inform. Technol.*, 2007, pp. 24–29.
122. Nie J., He X., Zhou Z., and Zhou C. Communication with Bandwidth Optimization in IEEE 802.16 and IEEE 802.11 Hybrid Networks. *Proc. Intern. Symp. on Commun. and Inform. Technol.*, 2005, pp. 26–29.
123. Kinoshita K., Yoshimoto M., Murakami K., and Kawano K. An Effective Spectrum Sharing Method for WiFi/WiMAX Interworking Mesh Network. *Proc. of IEEE Conf. WCNC*, 2010, pp. 986–990.
124. Kinoshita K., Kanamori Y., Kawano K., and Murakami K. A Dynamic Spectrum Assignment Method based on Call Blocking Probability Prediction in WiFi/WiMAX Integrated Networks. *Proc. of IEEE Conf. WCNC*, 2010, pp. 991–995.
125. Yang W.-H., Wang Y.-Ch., Tseng Yu-Ch., and Lin B.-Sh. P. An Energy-Efficient Handover Scheme with Geographic Mobility Awareness in WiMAX-WiFi Integrated Networks. *Proc. of IEEE Conf. WCNC*, 2010, pp. 996–1001.
126. 3GPP. *UTRA-UTRAN Long Term Evolution (LTE) and 3GPP System Architecture*. 2005. Available at: <http://www.3gpp.org/article/lte> (accessed 15 August 2017).
127. Zyren J., and McCoy W. Overview of the 3GPP Long Term Evolution Physical Layer. *3G Americas White Paper*, Doc. Number: 3GPPEVOLUTIONWP, July, 2007.
128. 3GPP. *TR 36.912. Feasibility Study for Further Advancements of E-UTRA (LTE-Advanced)*. 2009. Available at: <http://www.3gpp.org/article/lte-advanced> (accessed 5 August 2013).
129. 3GPP. *TR 36.913. Requirements for Further Advancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) (LTE-Advanced)*. 2010. Available at: <http://www.3gpp.org/article/lte-advanced> (accessed 5 August 2013).
130. Ghosh A., Ratasuk R., Mondal B., et al. LTE-advanced: Next Generation Wireless Broadband Technology. *IEEE Wireless Commun.*, 2010, vol. 17, no. 3, pp. 10–22.
131. Parkvall S., Furuskar A., Dahlman E., and Research E. Evolution of LTE Toward IMT-advanced. *IEEE Commun. Magazine*, 2011, vol. 50, no. 5, pp. 84–91.
132. Astey D., Dahlman E., Furuskar A., et al. LTE: The Evolution of Mobile Broadband. *IEEE Commun. Magazine*, 2009, vol. 47, no. 2, pp. 44–51.
133. 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Physical Layer Procedures (Release 9)*. 3GPP TS36.213 V9.3.0, June 2010.
134. 3GPP Technical Specification Group Radio Access Network. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA), Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects (Release 9)*. 3GPPTS36.814V9.0.0, March 2010.
135. Ghaffar R., and Knopp R. Interference-aware Receiver Structure for Multi-user MIMO and LTE. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2011, vol. 40, 24 p.
136. Li Q., Li G., Lee W., et al. MIMO Techniques in WiMAX and LTE: A Future Survey. *IEEE Commun. Magazine*, 2010, vol. 48, no. 5, pp. 86–92.
137. Kusume K., et al. System Level Performance of Downlink MU-MIMO Transmission for 3GPP LTE-advanced. *Proc. of the IEEE Vehicular Technol. Conf.-Spring (VTC '05)*, Ottawa, Canada, Sept. 2010, 5 p.
138. Covavacs I. Z., Ordenez L. G., Navarro M., et al. Toward a Reconfigurable MIMO Downlink Air Interface and Radio Resource Management: The SURFACE Concept. *IEEE Commun. Magazine*, 2010, vol. 48, no. 6, pp. 22–29.
139. EU FP7 Project SAMURAI – *Spectrum Aggression and Multi-User MIMO: Real-World Impact*. Available at: <http://www.ict-samurai.eu/page1001.en.htm> (accessed 15 August 2017).
140. 3GPP TSG RAN WG1 #62. *Way Forward on Transmission Mode and DCI Design for Rel-10 Enhanced Multiple Antenna Transmission*. R1-105057, Madrid, Spain, August 2010.
141. 3GPP TSG RAN WG1 #62. *Way Forward on 8 Tx Codebook for Release 10 DL MIMO*. R1-105011, Madrid, Spain, August 2010.
142. 3GPP TR 36.942 V10.3.0 (2012-06). *3rd Generation Partnership Project, Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) System Scenarios (Release 10)*. June 2012.
143. *3G Americas white paper*. 3GPP Mobile Broadband Innovation Path to 4G: Release 9, Release 10 and Beyond: HSPA+, SAE/LTE and LTE-advanced, 2010. Available at: http://www.4gamericas.org/documents/3GPP_Rel-9_Beyond%20Feb%202010.pdf (accessed 15 August 2017).
144. Duplicy J., Badic B., Balraj R., et al. MU-MIMO in LTE Systems. *EURASIP J. on Wireless Commun. and Networking*, 2011, Article ID 496763, 13 p. doi:10.1155/2011/496763

145. 3GPP TR 36.942 V8.4.0 (2012-06). 3rd Generation Partnership Project. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) System Scenarios (Release 8). June, 2012.

146. Zhang H., Prasad N., and Ranganarajan S. MIMO Downlink Scheduling in LTE and LTE-advanced Systems. *Tech. Report, NEC Labs America*, June 2011. Available at: <http://www.nec-labs.com/~honghai/TR/lte-scheduling.pdf> (accessed 15 August 2017).

УДК 621.371

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-86-104

Эволюция многопроцессорных систем связи — сотовых и несотовых — в исторической перспективе. Часть 1

Сергеев А. М.^а, старший преподаватель, orcid.org/0000-0002-4788-9869

Блаунштейн Н. Ш.^{б, в}, доктор физ.-мат. наук, профессор, nathan.blaunstein@hotmail.com

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бНегевский университет им. Бен-Гуриона, П.О.Б. 653, Бен-Гуриона ул., 1, г. Беэр-Шева, 74105, Израиль

^вИерусалимский технологический колледж, Хавад Халейми, 21, П.О.Б. 16031, Иерусалим, 91160, Израиль

Постановка проблемы: целью данного обзора является анализ эволюции систем беспроводной связи от второй генерации (2G) до пятой генерации (5G), а также изменения технологий и их существующих теоретических основ и протоколов — от Bluetooth, WLAN, WiFi и WiMAX до LTE, OFDM/OFDMA, MIMO и LTE/MIMO — продвинутой технологий с новой иерархической структурой дизайна сотовых карт femto/pico/micro/macro. **Методы:** использованы новые теоретические подходы для описания продвинутой технологии, таких как многопользовательская техника разделения пользователей, OFDM и OFDM-новейший подход, новые аспекты описания MIMO-систем на базе использования многолучевых антенн, дизайн различных сотовых карт на основе новых алгоритмов построения фемто/пико/микро/макро сот, а также новой методологии интегрирования новой MIMO/LTE-системы с помощью многолучевых антенн. **Результаты:** создана новая методология описания многопользовательского разделения, использования комбинированной OFDM/OFDMA-модуляции для обхождения интерференции между пользователями и между символами в новых многопроцессорных системах, мультипликативных шумов, имеющих место в беспроводных многопроцессорных системах связи, вызванных явлениями многолучевости. В итоге предложено, как обойти эффекты распространения, имеющие место в наземных каналах связи, используя комбинацию MIMO- и LTE-технологий, основанных на применении многолучевых антенн. Для этих целей разработан новый стохастический подход к проблеме, учитывающий особенности застройки земной поверхности, такие как профиль застройки домов, плотность застройки домов вокруг антенн базовой станции и пользователей и т. д. Эти характеристики позволяют в итоге оценить эффекты фединга как источника мультипликативного шума. **Практическая значимость:** новая методология оценки эффектов, созданных мультипликативным шумом, интерференцией между пользователями и между символами, имеющими место в наземных системах беспроводной связи, позволяет прогнозировать практические аспекты существующих и новых многопроцессорных беспроводных систем связи, такие как емкость (количество) пользователей и спектральная эффективность каналов пользователей для различных конфигураций построения сот — фемто/пико/микро/макро, а также новейших конфигураций систем MIMO/LTE для построения будущих систем 4-го и 5-го поколений.

Ключевые слова — аддитивный белый гауссов шум, AWGN, процесс многократного разделения по кодам, CDMA, прямое быстрое преобразование Фурье, DFFT, прямое уширение спектра последовательности, DS-SS, глобальная система подвижной связи, GSM, процесс многократного разделения по частотам, FDMA, обратное быстрое преобразование Фурье, IFFT, внутриканальная интерференция, ICI, внутрисимвольная интерференция, ISI, внутрисимвольная интерференция, IUI, долгосрочные эволюционные реализации, LTE, процесс контроля среды, MAC, мультиплексирование за счет разделения по ортогональным частотам, OFDM, процесс мультиплексирования за счет разделения по ортогональным частотам, OFDMA, процесс мультиплексирования за счет разделения по ортогональным временным частотам, OTDMA, многократный вход — многократный выход, MIMO, единственный вход — многократный выход, SIMO, отношение сигнала к шуму, SNR, процесс многократного разделения по временам, TDMA, оборудование пользователя, UE, беспроводная пользовательская сеть, WiFi, локальная беспроводная сеть, WLAN, беспроводная сеть метрополи, WiMAX, беспроводная пользовательская сеть, WPAN.

Цитирование: Sergeev A. M., Blaunstein N. Sh. Evolution of Multiple-Access Networks — Cellular and Non-cellular — in Historical Perspective. Part 1. Информационно-управляющие системы, 2018, no. 4, pp. 86–104. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-86-104

Citation: Sergeev A. M., Blaunstein N. Sh. Evolution of Multiple-Access Networks — Cellular and Non-cellular — in Historical Perspective. Part 1. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 86–104. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-86-104

УЧЕТ СПЕЦИФИКИ ДОСТУПА БОЛЬШОГО ЧИСЛА УСТРОЙСТВ ПРИ МЕЖМАШИННОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ В СОВРЕМЕННЫХ СОТОВЫХ СЕТЯХ

О. С. Галинина^а, PhD, старший научный сотрудник, olga.galinina@gmail.com

С. Д. Андреев^а, PhD, старший научный сотрудник, orcid.org/0000-0001-8223-3665, serge.andreev@gmail.com

А. М. Тюрликов^б, доктор техн. наук, профессор, turlikov@vu.spb.ru

^аТехнологический университет г. Тампере, Коркеакоулункату, 1, Тампере, 33100, Финляндия

^бСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

Введение: межмашинное взаимодействие, предполагающее передачу информации от всевозможных беспроводных устройств, вызывает существенный интерес со стороны сотовых операторов. При этом важно отслеживать и предотвращать ситуации перегрузки, связанные с доступом в сеть большого числа таких устройств в течение короткого промежутка времени. **Цель:** анализ режима перегрузки радиосети на этапе начального доступа с учетом специфики межмашинного взаимодействия. **Результаты:** рассмотрена система, включающая в себя множество счетчиков, сигнализирующих об аварийных ситуациях и автономно собирающих информацию о расходе электроэнергии. Предложен аналитический подход, позволяющий изучать функционирование такой системы с большим числом устройств, а также анализировать влияние настроек протокола случайного доступа в сотовую сеть и механизмов управления перегрузками на вероятность успешного доступа, задержку доступа к среде и потребляемую устройствами мощность. Проведено сопоставление полученных аналитических результатов с данными имитационного моделирования.

Ключевые слова — сотовая система связи, случайный множественный доступ, большое число пользователей, доступ к среде передачи.

Цитирование: Галинина О. С., Андреев С. Д., Тюрликов А. М. Учет специфики доступа большого числа устройств при межмашинном взаимодействии в современных сотовых сетях// Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 105–114. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-105-114

Citation: Galinina O. S., Andreev S. D., Tyurlikov A. M. On Multiple Access of a Large Number of Machine-Type Devices in Cellular Networks. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 105–114 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-105-114

Введение

Машинно-ориентированное или межмашинное (M2M — machine-to-machine) взаимодействие является неотъемлемой составной частью ряда современных технологий. Отраслевые отчеты свидетельствуют о значительном потенциале рынка M2M, на котором в последующие годы возникнут миллиарды подключенных устройств, что приведет к значительным доходам в этом секторе [1, 2]. В соответствии с, например, работами [3, 4] концепция M2M предоставляет широкому кругу беспроводных устройств (интеллектуальным счетчикам, измерителям, сенсорам и др.) возможность зафиксировать некоторое событие и передать информацию о нем через опорную сеть связи соответствующему приложению, которое в свою очередь предоставит данные потребителю.

По мере того как выручка от традиционных голосовых сервисов продолжает сокращаться, сотовые операторы обращают все больше внимания на приложения M2M. По этой причине European Telecommunications Standards Institute (ETSI) начал перспективные проекты по разработке стан-

дартов, определяющих сквозную архитектуру M2M [5]. Состояние данной области предполагает, что умная сеть счетчиков, сигнализирующих об аварийных ситуациях и автономно собирающих информацию о расходе электроэнергии, может стать одним из ключевых контекстов использования систем M2M, позволяя снизить эксплуатационные расходы и осуществить поддержку тарификации коммунальных услуг на основе ценообразования, зависящего от нагрузки [6, 7].

Ожидается, что технологии сотовых сетей, такие как 3rd Generation Partnership Project Long Term Evolution (3GPP LTE), будут играть решающую роль в создании приложений для умных счетчиков электроэнергии. Комитет 3GPP определил в связи с этим несколько задач по межмашинному взаимодействию, прежде всего в отношении контроля перегрузки радиосетей доступа [8, 9]. Группа 3GPP по услугам также заинтересована в усовершенствованиях, связанных с M2M для системы LTE в контексте мобильных приложений данных [10, 11].

В данной статье предлагается подход к оценке работы канала случайного доступа (PRACH — Physical Random Access Channel) в системах M2M,

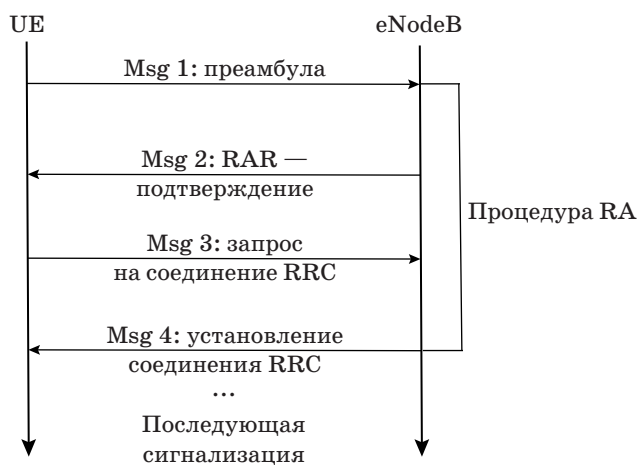
построенных по технологии 3GPP LTE. Особый интерес представляет исследование условий перегрузки, вызванной доступом большого числа устройств M2M в течение короткого промежутка времени. В связи с тем, что такие устройства обычно являются малогабаритными и получают питание от аккумулятора, учет их энергопотребления имеет первостепенное значение [6, 12] и поэтому включается в структуру исследования наряду с традиционными показателями производительности системы связи, такими как задержка доступа и вероятность успешной передачи информации.

Описание системы доступа и ее модель

Особенности работы канала случайного доступа

Процедура случайного доступа (RA — Random Access) в сеть 3GPP LTE представлена на рис. 1. Пользовательское оборудование (UE — User Equipment) в режиме случайного доступа направляет на сотовую базовую станцию (называемую также eNodeB) специальное сообщение (Msg 1), называемое преамбулой и выбираемое случайным образом из некоторого зафиксированного набора [13, 14]. Заметим, что некоторые из указанных в спецификации протокола преамбул могут быть зарезервированы для других целей в зависимости от конфигурации сети. Передача преамбулы также может оказаться неуспешна вследствие недостаточной мощности отправителя.

Если преамбула принята корректно, базовая станция отвечает подтверждением (RAR — random access response, или Msg 2) в пределах определенного окна ответа. Когда RAR получен, индикатор ресурса физического нисходящего общего канала может быть передан по физическому нисходящему управляющему каналу [15, 16].



■ **Рис. 1.** Процедура случайного доступа RA в 3GPP LTE
 ■ **Fig. 1.** Random Access procedure in 3GPP LTE system

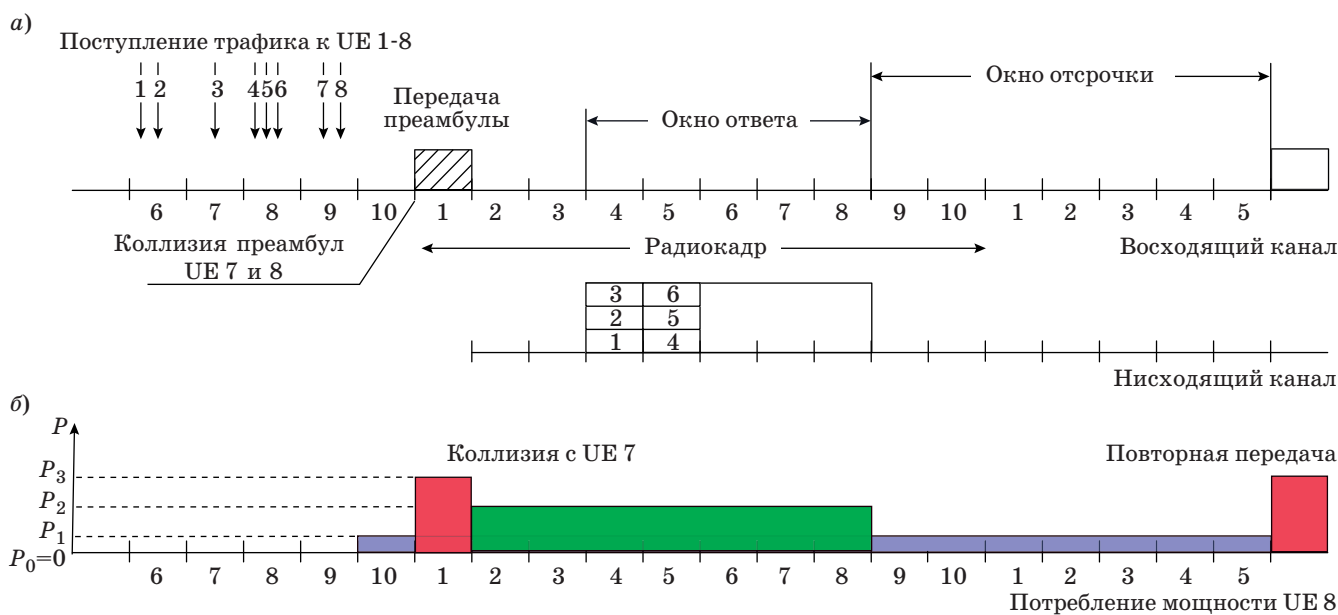
Поскольку базовая станция должна определить, какое именно пользовательское оборудование направило преамбулу, требуется запустить процесс разрешения коллизий. Коллизии могут происходить на базовой станции, когда два или более пользовательских устройства выбирают идентичные преамбулы и отправляют их в одно и то же время [17, 18].

По прошествии некоторого времени обработки RAR пользовательское оборудование передает сообщение о запросе на соединение (Msg 3) через физический общий канал восходящей линии, используя ресурсы, выделенные ему Msg 2. Процедура случайного доступа завершается успешным получением сообщения о подтверждении соединения (Msg 4) от базовой станции. При наличии коллизии преамбул базовая станция посылает одно и то же Msg 2 более чем одному пользовательскому устройству, и собственно коллизия происходит на этапе отправки Msg 3. Если пользовательское устройство не получает ожидаемых сигнальных сообщений, оно возвращается к процедуре RA после некоторого времени отсрочки, выбирая его случайным образом в пределах заданного окна.

Узким местом рассмотренной процедуры сигнализации, особенно в условиях множественных запросов со стороны пользовательского оборудования, может стать нарастающая вероятность коллизии (рис. 2, а). Однако посылка RAR в рамках окна ответа может также оказаться неуспешной из-за ограниченных ресурсов нисходящего канала. Кроме того, Msg 3 и Msg 4 могут иметь некоторые вероятности неуспешного приема. Отметим также, что отказ при случайном доступе RA может привести к увеличению задержки начального доступа в сеть.

Вероятность коллизии увеличивается с ростом числа запросов от устройств M2M, а также зависит от характеристик их трафика. Для сценариев, связанных с перегрузкой PRACH, число устройств, конкурирующих за доступ к каналу в одной соте, может достигать больших значений (до 30 000 устройств в соответствии с оценками Vodafone [19], заимствованными [20] и принятыми 3GPP [21]). Такое большое число устройств может привести к чрезмерно высокой вероятности коллизии и быстрому истощению системных ресурсов. Поэтому 3GPP проявляет повышенный интерес к исследованию подобных перегрузок и соответствующих им параметров работы системы LTE.

В таблице приведена сводка параметров из нескольких методологических документов по моделированию системы доступа [21, 22]. Основные величины связаны с конфигурацией Msg 1, которая базируется на индексе конфигурации PRACH. Также определено число подкадров, в которых пользовательское оборудование может пытаться



■ **Рис. 2.** Пример работы процедуры RA: временная диаграмма (а) и потребляемая мощность, например, UE № 8 (б)
 ■ **Fig. 2.** Example RA procedure operation: time diagram (a) and consumed power of e.g., UE #8 (б)

■ Основные параметры моделирования
 ■ Main modeling parameters

Обозначение	Описание	Величина
–	Полоса пропускания	5 МГц
–	Индекс конфигурации PRACH	6
s	Общее число преамбул	54
L_1	Максимальное число преамбул	10
–	Число грантов для восходящего канала на RAR	3
W	Индикатор отсрочки	20 мс
π_3/π_4	Вероятность успешной доставки Msg 3/Msg 4	0,9/0,9
L_3	Максимальное число передач для Msg 3 и Msg 4	5
M	Число устройств M2M	5 тыс., 10 тыс., 30 тыс.
N	Число доступных подкадров для активных устройств	10 тыс., 60 тыс.
b	Периодичность окон PRACH для передачи	5 мс
K	Окно ответа RAR	5 мс
K_1	Длительность передачи преамбулы	1 мс
K_0	Длительность обработки преамбулы на базовой станции	2 мс
t_{pr}	Длительность обработки перед передачей Msg 3	5 мс
t_{tx}	Длительность передачи Msg 3, ожидание и прием Msg 4	6 мс
P_0	Потребление мощности в неактивном состоянии	0,0 мВт
P_1	Потребление мощности в состоянии простоя	0,025 мВт [23]
P_2	Потребление мощности при обработке и приеме	50 мВт [23]
P_3	Потребление мощности во время передачи	50 мВт [23]

передавать преамбулу, и длина преамбулы. Настройки протокола доступа к среде определяют число подкадров, в течение которых пользовательское устройство находится в состоянии

ожидания после передачи Msg 3 (до объявления отказа процедуры случайного доступа RA). Некоторые дополнительные параметры будут детально рассмотрены ниже.

Модель системы и ее допущения

Проанализируем основные предположения моделирования более детально. Одна из сот 3GPP LTE рассматривается как система для обслуживания M одинаковых машинно-ориентированных устройств. Устройства выбирают подкадр для активации своей восходящей передачи случайным образом, следуя равномерному (трафик типа 1) или бета-распределению (трафик типа 2) на интервале $[1, N]$. Преамбула, которой требуется 1 подкадр для передачи, может быть передана в каждом b -м подкадре, т. е. во временных слотах $1, b + 1, \dots, bi + 1, i \in \mathbb{Z}^+$. Каждый раз, когда устройство M2M активируется, оно становится занятым до завершения своей процедуры RA. В противном случае устройство становится неактивно.

В подкадрах обслуживания (когда имеется возможность доступа PRACH) каждое такое устройство M2M выбирает одну из преамбул s равномерным образом и отправляет ее. Следуя работе [21], будем предполагать наличие коллизии, когда два устройства или более выбирают одну и ту же преамбулу, а все преамбулы с коллизией будем рассматривать как отказ доступа после некоторой длительности обслуживания. С другой стороны, преамбула передается успешно с вероятностью $1 - e^{-i}$ вследствие механизма наращивания мощности, где i — число попыток передачи [21]. Максимально разрешенное число попыток передачи преамбулы составляет L_1 . Если произошел отказ передачи из-за коллизии или недостаточной мощности, устройство M2M равномерно выбирает счетчик отсрочки из W .

После K_0 подкадров ожидания начинается окно ответа размером K (см. рис. 2, а). В пределах окна ответа базовая станция посылает сообщение RAR в подкадре, выбранном равномерно на интервале $[1, K]$. Если устройство M2M не получает RAR, попытка передачи преамбулы считается неуспешной, а устройство переходит в состояние ожидания. После того как устройство M2M успешно получает RAR, оно начинает обработку Msg 3 для передачи в течение t_{pr} . Далее это устройство посылает Msg 3 и ожидает $t_{tx} - 1$ до получения Msg 4 (см. рис. 1). Msg 3 и Msg 4 доставляются успешно с вероятностями π_3 и π_4 соответственно. Максимально разрешенное число попыток передачи Msg 3 составляет L_3 .

Подход к анализу системы доступа

Оценка времени доступа

В данном разделе рассмотрим сценарий перегрузки PRACH при наличии трафика типа 1 (модель равномерного распределения загрузки) в соответствии с методологией 3GPP [21]. Опишем предложенный аналитический подход к оценке

функционирования PRACH в терминах средней задержки к сети доступа. При этом разделим общую задержку на две составляющие, возникающие при обработке сообщений Msg 1–2 и Msg 3–4 соответственно:

$$E[\tau] = E[\tau^{(1)}] + E[\tau^{(2)}],$$

где $E[\tau^{(1)}]$ — интервал времени между активацией устройства и получением им ответа RAR; $E[\tau^{(2)}]$ — интервал времени между окончанием подкадра, в котором был получен ответ RAR, и завершением обработки сообщения Msg 4.

Нахождение распределения и среднего значения случайной величины $\tau^{(2)}$ тривиально, и окончательное выражение представляется следующим образом:

$$E[\tau^{(2)}] = t_{pr} + t_{tx} \cdot \bar{n}_3,$$

где t_{pr} и t_{tx} — длительности обработки и синхронизации передачи соответственно, а \bar{n}_3 — среднее число передач Msg 3 и Msg 4.

Распределение числа передач Msg 3 и Msg 4 вычисляется следующим образом:

$$Pr\{n_3 = 1\} = \pi_{tx},$$

$$Pr\{n_3 = 2\} = (1 - \pi_{tx})\pi_{tx}, \dots$$

$$Pr\{n_3 = L_3\} = (1 - \pi_{tx})^{L_3-1} \pi_{tx},$$

где $\pi_{tx} = \pi_3\pi_4$ — вероятность того, что оба сообщения Msg 3 и Msg 4 переданы успешно (соответственно, $(1 - \pi_3\pi_4)$ — вероятность того, что Msg 3 или Msg 4 будет потерян), а L_3 — максимальное число разрешенных попыток передачи сообщения Msg 3 или Msg 4. Здесь принимаются во внимание только успешные отправки сообщений. Вследствие того, что вероятность потери пренебрежимо мала, будем опускать потерянные преамбулы и предполагать, что ожидаемое число попыток передачи любых преамбул приблизительно равно ожидаемому числу передач успешно принятых преамбул.

Таким образом, среднее число попыток передачи сообщений Msg 3 и Msg 4 может быть определено следующим образом:

$$\begin{aligned} \bar{n}_3 &= \pi_{tx} \sum_{n=1}^{L_3} n(1 - \pi_{tx})^{n-1} = \\ &= \frac{1}{\pi_{tx}} \left[1 - (1 - \pi_{tx})^{L_3} (1 + L_3\pi_{tx}) \right]. \end{aligned}$$

Система без коллизий

Для анализа $\tau^{(1)}$ рассмотрим исходную систему случайного доступа в предположении о том, что коллизии не происходят. Соответственно, повтор-

ные передачи могут возникать только вследствие недостаточной мощности отправителя. В случае успешной передачи преамбулы с первой попытки длительность обслуживания включает в себя время передачи преамбулы, обработки и ответа RAR. Кроме того, следует принимать во внимание среднее время $b/2$ между активацией устройства и первой попыткой передачи им преамбулы:

$$E[\tau^{(1)} | 1\text{-й успех}] = b/2 + K_1 + K_0 + (K+1)/2,$$

где K_1 — длительность передачи преамбулы; K_0 — длительность периода ожидания, а K — размер окна ответа RAR, мс. Здесь $(K+1)/2$ означает среднее время ответа RAR, поскольку предполагается, что обработка начинается немедленно после получения ответа RAR; это соответствует дискретному равномерному распределению на интервале $[1, K]$.

Как было отмечено выше, вероятность успешной передачи преамбулы для попытки i составляет $1 - e^{-i}$, а дополнительная вероятность отказа при передаче — e^{-i} . Далее усредним сумму длительности интервала отсрочки и дополнительного времени ожидания до следующего b -го слота, обозначая такую усредненную величину через \bar{w} . Тогда распределение длительности обслуживания для сообщений Msg 1-2 может быть получено как

$$\Pr\left\{E[\tau^{(1)}] = \frac{b}{2} + K_1 + K_0 + \frac{K+1}{2}\right\} = \left(1 - \frac{1}{e^1}\right),$$

$$\Pr\left\{E[\tau^{(1)}] = \frac{b}{2} + (K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + K_1 + K_0 + \frac{K+1}{2}\right\} =$$

$$= \frac{1}{e^1} \left(1 - \frac{1}{e^2}\right), \dots$$

$$\Pr\left\{E[\tau^{(1)}] = \frac{b}{2} + (n-1)(K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + K_1 + K_0 + \frac{K+1}{2}\right\} =$$

$$= \left(1 - \frac{1}{e^n}\right) \prod_{i=1}^{n-1} \frac{1}{e^i}, \dots,$$

где $b/2$ обозначает время между поступлением запроса и началом первой попытки передачи преамбулы, а $K_1 + K_0 + K + \bar{w}$ — составляющая, которая добавляется каждый раз, когда передача завершается отказом. Затем усредним длительность обслуживания и получим среднюю длительность обслуживания до начала передачи сообщения Msg 3 как

$$E[\tau^{(1)}] = (K_1 + K_0 + K + \bar{w}) \sum_{n=1}^{L_1} n \left(1 - \frac{1}{e^n}\right) \prod_{i=1}^{n-1} \frac{1}{e^i} +$$

$$+ \frac{b-K+1}{2} - \bar{w} = c_1(K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + \frac{b-K+1}{2} - \bar{w},$$

где $\bar{w} = c_2(c_2 + 1) + (c_2 + b + bc_3)(W - bc_3 - c_2) + bc_3c_2$, $c_1 \approx 1,42$, $c_2 = B \lceil K/b \rceil - K$, а $c_3 = \lfloor (W - C_2)/b \rfloor$. Это выражение представляет собой нижнюю границу $E[\tau^{(1)}]$ для исследуемой системы.

Система с коллизиями

Анализ системы с коллизиями является более сложной задачей, точное решение которой затруднительно вследствие наличия процесса с последствием. Это связано с характеристиками системы со случайной длительностью отсрочки, необходимостью синхронизации и большим числом преамбул. Например, в классической многопользовательской системе с одной преамбулой аппроксимация значений задержки может быть легко получена тем же методом, как это было сделано для системы Алоха в работе [24]. Однако для рассматриваемой системы использование этой популярной техники не дает приемлемой аппроксимации, и необходимо расширить подход с использованием [25].

Для того чтобы абстрагироваться от наличия последствия и получить оценку для $E[\tau^{(1)}]$ в системе с коллизиями, используем следующую эквивалентную модель.

1. Предположим, что поступающий поток (активации устройств) представляет собой поток Бернулли с интенсивностью λ , а устройство генерирует запрос на новое соединение в подкадр с эквивалентной вероятностью $\pi_3 = 1/N$, где N — число подкадров в исходной системе.

2. Опуская рассмотрение длительности времени ожидания и окна отсрочки, заменим их предположением о том, что в каждый подкадр ожидающее устройство активируется с заданной вероятностью $\pi_0 = 1/(K_0 + K_1 + K + \bar{w})$. Это означает, что если первая попытка передачи завершилась отказом вследствие коллизии или недостаточной мощности передачи, то устройство активируется один раз за интервал $K_1 + K_0 + K + \bar{w}$.

3. Вероятность успешного завершения составляет μ , т. е. запрос обслуживается в текущем подкадре с вероятностью μ . В противном случае устройство пытается получить доступ к каналу в следующих доступных подкадрах.

4. Наконец, абстрагируемся от максимального числа попыток передачи преамбулы, считая его неограниченным.

В рамках этой упрощенной эквивалентной модели аппроксимация средней задержки доступа может быть получена следующим образом. Для системы без коллизий вероятность обслуживания $\tilde{\mu}$ может быть найдена из выражения $E[\tilde{\tau}^{(1)}] = E[\tau^{(1)}]$ в виде

$$\tilde{\mu} = \frac{1}{E[\tilde{\tau}^{(1)}]} = \frac{1}{c_1(K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + \frac{b-K+1}{2} - \bar{w}}, \quad (*)$$

где $E[\tau^{(1)}]$ — средний интервал времени между активацией устройства и получением им RAR, и при этом $E[\tilde{\tau}^{(1)}]$ — соответствующий интервал для эквивалентной модели. Отметим, что данное выражение используется в дальнейшем для вычисления нагрузки от устройств, которые избегают коллизий.

Продолжим анализ, приняв во внимание коллизии. Рассмотрим один подкадр и предположим, что конкретное устройство i сгенерировало запрос, а также выбрало преамбулу. Пусть система находится в состоянии j , где j — число ожидающих устройств, включая устройство i . В состоянии j поведение устройства i может быть представлено в виде несложной цепи Маркова с двумя состояниями. Здесь состояние представляет собой число запросов Q_i от устройства, которое может принимать два значения: 0 или 1 (рис. 3). Матрица интенсивностей переходов для рассматриваемой цепи выглядит следующим образом:

$$\Pi = \begin{pmatrix} 1 - \pi & \pi \\ \mu_j & 1 - \mu_j \end{pmatrix}.$$

Таким образом, стационарное распределение $\omega = \{\omega_0, \omega_1\}$ может быть получено из условия $\Pi^T \omega = \omega$, когда $\omega_0 + \omega_1 = 1$. Следовательно, среднее число запросов Q_i определяется как

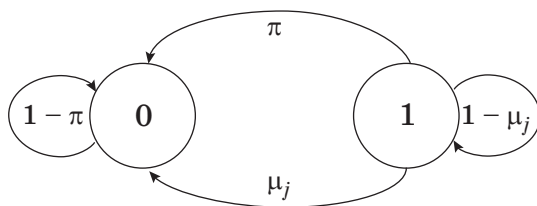
$$E[Q_i] = \frac{\pi}{\pi + \mu_j},$$

где μ_j — вероятность успешной передачи преамбулы.

В соответствии с формулой Литтла получаем среднюю длительность нахождения системы в состоянии j как

$$E[\tau_j^{(1)}] = \frac{E[Q_i]}{\pi} = \frac{1}{\pi + \mu_j}.$$

В состоянии j для $j - 1$ ожидающих устройств вероятность доступа к каналу и выбора той же самой преамбулы, которую выбрало устройст-



■ **Рис. 3.** Марковская цепь с двумя состояниями, представляющая запросы от устройства

■ **Fig. 3.** Two-state Markov chain that models user requests

во i , составляет $\pi_0 \cdot 1/s$. Для неактивных $M - j$ устройств соответствующая вероятность равна $\pi \cdot 1/s$. Таким образом, вероятность π_j^* отсутствия коллизий для устройства i в состоянии j может быть найдена следующим образом:

$$\pi_j^* = (1 - \pi_0 s^{-1})^{j-1} (1 - \pi s^{-1})^{M-j}.$$

Далее учтем эффект наращивания мощности. Вероятность избежать коллизии при попытке с номером n задается в виде

$$\Pr\{1\text{-й успех}\} = \left(1 - \frac{1}{e}\right) \pi_j^*,$$

$$\Pr\{2\text{-й успех}\} = \left(1 - \left(1 - \frac{1}{e}\right) \pi_j^*\right) \left(1 - \frac{1}{e^2}\right) \pi_j^*,$$

...

$$\Pr\{n\text{-й успех}\} = \left(1 - \frac{1}{e^n}\right) \pi_j^* \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 - \pi_j^* \left(1 - \frac{1}{e^i}\right)\right),$$

...

Здесь также опустим все потерянные преамбулы, как это делалось ранее, усредняя успешные попытки передачи и заменяя искомое математическое ожидание условным. Тогда среднее число попыток передачи может быть получено следующим образом:

$$\bar{n}_j = \pi_j^* \sum_{n=1}^{L_1} n \left(1 - \frac{1}{e^n}\right) \prod_{i=1}^{n-1} \left(1 - \pi_j^* \left(1 - \frac{1}{e^i}\right)\right).$$

Принимая во внимание эффект наращивания мощности, определим вероятность μ_j успешной передачи запроса i как

$$\mu_j = \left(\bar{n}_j (K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + \frac{b - K + 1}{2} - \bar{w} \right)^{-1}.$$

В результате средняя длительность времени обслуживания может быть записана в виде

$$E[\tau^{(1)}] = \sum_{j=1}^M \theta_j E[\tau_j^{(1)}] = \sum_{j=1}^M \theta_j \frac{1}{\pi + \mu_j},$$

где $\{\theta_j\}_{j=1}^M$ — стационарное распределение вероятностей, а θ_j — стационарная вероятность нахождения процесса в состоянии j .

Для получения приведенного выше стационарного распределения вероятностей необходимо рассмотреть все переходы между состояниями и решить соответствующее матричное уравнение размерности M . В целях уменьшения сложности

подобных вычислений можно не рассматривать более трудоемкие переходы между состояниями и получить среднее θ_j , используя биномиальное распределение:

$$\theta_j = \binom{M-1}{j-1} \rho^{j-1} (1-\rho)^{M-j},$$

где ρ — нагрузка устройства, а $\binom{M-1}{j-1} = \frac{(M-1)!}{(j-1)!(M-j)!}$.

Далее будем опускать возможные коллизии между другими устройствами, полагая, что только рассматриваемое устройство i может участвовать в коллизиях. Таким образом, возможно вычислить нагрузку системы $\rho = \pi/\bar{\mu}$ с использованием выражения (*) для вероятности обслуживания μ , полученного для системы без коллизий. Тогда окончательное выражение для искомой аппроксимации средней длительности времени обслуживания выглядит следующим образом:

$$E[\tau^{(1)}] = \sum_{j=1}^M \frac{\binom{M-1}{j-1} \rho^{j-1} (1-\rho)^{M-j}}{j-1 \frac{1}{N} + \left(a_j(K_1 + K_0 + K + \bar{w}) + \frac{b-K+1}{2} - \bar{w} \right)^{-1}}.$$

Учет энергопотребления

Как было отмечено ранее, предложенный в данной работе подход может быть расширен для учета энергопотребления устройств M2M. Введем в рассмотрение важные параметры, отражающие уровень расхода энергии типовым устройством M2M. В частности, рассмотрим четыре различных состояния устройства с точки зрения потребляемой им мощности (рис. 2, б).

1. P_0 — неактивное состояние. В этом состоянии устройство потребляет минимальную мощность. Буфер сообщений пуст, никакие данные не передаются.

2. P_1 — состояние простоя. Устройство активно, но никакой информации в текущем подкадре не передает.

3. P_2 — состояние приема (Rx). Устройство ожидает сообщения Msg 2/Msg 4 или обрабатывает полученные ответы.

4. P_3 — состояние передачи (Tx). Устройство передает сообщения Msg 1/Msg 3. При этом потребляется максимальная мощность.

Оценим общее потребление устройства за один подкадр как сумму долей времени, затраченного в каждом из введенных выше состояний, умноженных на потребление в соответствующем со-

стоянии. Далее определим длительность промежутка времени, в течение которого устройство находится в каждом из четырех возможных состояний, и вычислим соответствующие доли времени следующим образом. В состоянии Tx

$$q_3 = K_1 \bar{n} + \frac{1}{\pi_{tx}} \left[1 - (1 - \pi_{tx})^{L_3} (1 + L_3 \pi_{tx}) \right],$$

где \bar{n} — оценка среднего числа попыток передачи преамбулы, а $K_1 \bar{n}$ соответствует длительности передачи преамбулы; при этом вторая часть выражения учитывает среднее число попыток передачи сообщения Msg 3. Далее в состоянии Rx имеем

$$q_2 = K(\bar{n} - 1) + \frac{K+1}{2} t_{pr} + \frac{t_{tx} - 1}{\pi_{tx}} \left[1 - (1 - \pi_{tx})^{L_3} (1 + L_3 \pi_{tx}) \right],$$

где $K(\bar{n} - 1)$ — время, потраченное на ожидание ответа RAR; $(K + 1)/2$ — среднее время ответа от базовой станции для успешных попыток, а остальное соответствует обработке и приему сообщений Msg 3 и Msg 4.

Состояние простоя может быть описано следующим образом:

$$q_1 = \frac{b}{2} + K_0 \bar{n} + (\bar{n} - 1) \bar{w},$$

где $K_0 \bar{n}$ — время обработки преамбулы после ее получения на eNodeB, а $b/2$ — длительность времени простоя между активацией и началом передачи преамбулы.

Ожидаемое число попыток передачи преамбулы задается выражением

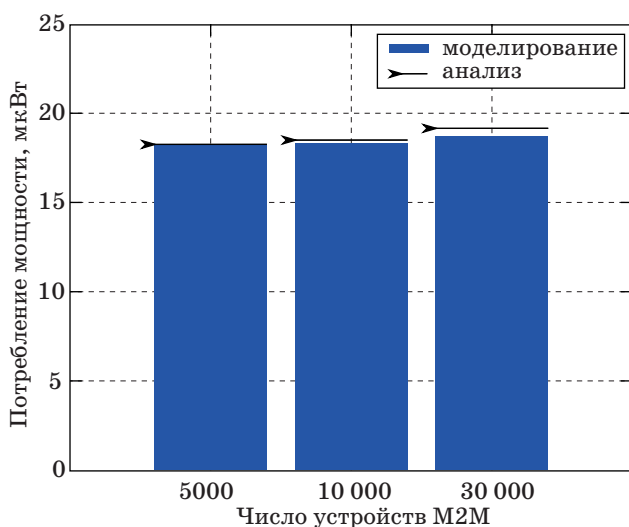
$$\bar{n} = \sum_{j=1}^M \binom{M-1}{j-1} \rho^{j-1} (1-\rho)^{M-j} \bar{n}_j.$$

Тогда оценка для общего потребления устройством M2M может быть выписана следующим образом:

$$\varepsilon = P_0(1 - q_3 - q_2 - q_1) + P_1 q_1 + P_2 q_2 + P_3 q_3.$$

Численные результаты

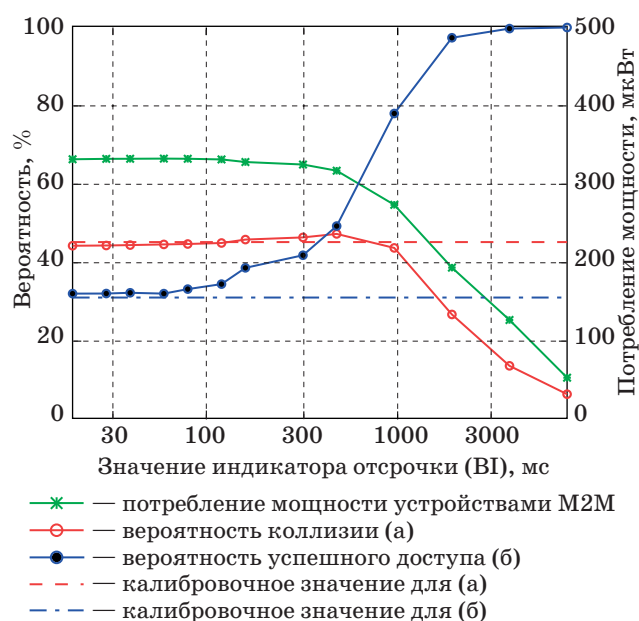
Полученные аналитические результаты и данные имитационного моделирования с точки зрения мощности, потребляемой устройством M2M (трафик типа 1, равномерное распределение), показаны на рис. 4. Можно сделать вывод



■ **Рис. 4.** Анализ потребления мощности для процедуры RA
 ■ **Fig. 4.** Power consumption analysis for RA procedure

о том, что предложенный аналитический подход является достаточно точным даже при наличии большого числа устройств M2M. Также полезно изучить поведение системы при наличии обоих типов трафика, рассмотренных в работе [21], в случае перегрузки сети радиодоступа. Самый «тяжелый» трафик типа 2 (бета-распределение при активации) дает высокую корреляцию попыток входа устройств M2M в сеть. Далее рассмотрим соответствующие численные результаты.

В частности, на рис. 5 рассмотрено потребление мощности устройствами M2M, вероятность коллизии, а также вероятность успешного доступа для различных значений индикатора отсрочки (которые могут превышать текущие значения, определенные в спецификациях LTE). Здесь значения индикатора отсрочки начинаются от 20 мс и увеличиваются до своего максимума 960 мс [13]. Как видно из графика, по истечении всех возможных попыток передачи вероятность успешного доступа составляет около 80 %, что может быть неприемлемо для многих приложений M2M. Поэтому будем рассматривать три резервных значения для индикатора отсрочки согласно работе [13]: 1920, 3840 и 7680 мс. В результате дополнительная задержка



■ **Рис. 5.** Управление перегрузкой в системе с большим числом устройств M2M
 ■ **Fig. 5.** Overload control in M2M systems with a large number of devices

ка компенсируется существенно более высоким уровнем надежности при доступе в сеть (вплоть до 100 %).

Заключение

Предложенный в данной работе подход позволяет исследовать функционирование системы M2M с большим числом устройств, а также анализировать влияние настроек протокола случайного доступа и механизмов управления перегрузками на вероятность успешного доступа и задержку доступа к среде. В частности, возможно выявить ограничения существующих протоколов входа в сеть при наличии коррелированных попыток доступа и преодолеть их. Кроме того, разработанный аналитический подход может быть использован для изучения важных дополнительных показателей, связанных, например, с потреблением мощности устройствами M2M на всех этапах их работы в процессе доступа к сотовой сети 3GPP LTE.

Литература

1. Machine-To-Machine (M2M) & Smart Systems Forecast 2010–2014. Harbor Research Report, 2009. <https://www.slideshare.net/harborresearch/harbor-research-machine-to-machine-m2-m-smart-systems-market-forecast> (дата обращения: 22.08.2018).

2. Palattella M. R., Dohler M., Grieco L. A., Rizzo G., Torsner J., Engel T., Ladid L. Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models// IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2016. N 34(3). P. 510–527.
 3. Emmerson B. M2M: the Internet of 50 Billion Devices// Win-Win Magazine. 2010. N 1. P. 19–22.

4. **Gazis V.** A Survey of Standards for Machine-to-Machine and the Internet of Things// IEEE Communications Surveys and Tutorials. 2017. N 19(1). P. 482–511.
5. ETSI. Machine-to-Machine Communications (M2M); M2M Service Requirements. TS 102 689. 2010. https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/102689/01.01.01_60/ts_102689v010101p.pdf (дата обращения: 22.08.2018).
6. **Andreev S., Galinina O., Koucheryavy Y.** Energy-Efficient Client Relay Scheme for Machine-to-Machine Communication// Global Telecommunications Conference (GLOBECOM). 2011. P. 1–5.
7. **Iraji S., Mogensen P., Ratasuk R.** Recent Advances in M2M Communications and Internet of Things (IoT)// IJWIN. 2017. N 24(3). P. 240–242.
8. 3GPP. System Improvements for Machine-Type Communications. TR 23.888. 2011. <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/23888-b00.pdf> (дата обращения: 22.08.2018).
9. 3GPP. Study on Enhancements for MTC. TR 22.888. 2012. http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.888/22888-c00.zip (дата обращения: 22.08.2018).
10. 3GPP. Machine-Type and other Mobile Data Applications Communications Enhancements. TR 23.887. 2012. http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.887/23887-c00.zip (дата обращения: 22.08.2018).
11. **Ksairi N., Tomasin S., Debbah M.** A Multi-Service Oriented Multiple Access Scheme for M2M Support in Future LTE// IEEE Communications Magazine. 2017. N 55(1). P. 218–224.
12. **Ali A., Shah G. A., Arshad J.** Energy Efficient Techniques for M2M Communication: A Survey// J. Network and Computer Applications. 2016. N 68. P. 42–55.
13. 3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification. TS 36.321. 2007. <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36321-800.pdf> (дата обращения: 22.08.2018).
14. **Koseoglu M.** Lower Bounds on the LTE-A Average Random Access Delay Under Massive M2M Arrivals// IEEE Trans. Communications. 2016. N 64(5). P. 2104–2115.
15. **Johnson C.** Long Term Evolution in Bullets. — Louisville, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2010. — 280 p.
16. **Rico-Alvariño A., Vajapeyam M., Xu H., Wang X., Blankenship Y. W., Bergman J., Tirronen T., Yavuz E. A.** An Overview of 3GPP Enhancements on Machine to Machine Communications// IEEE Communications Magazine. 2016. N 54(6). P. 14–21.
17. **Gursu H. M., Vilgelm M., Kellerer W., Reisslein M.** Hybrid Collision Avoidance-Tree Resolution for M2M Random Access// IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems. 2017. N 53(4). P. 1974–1987.
18. **Alavikia Z., Ghasemi A.** Collision-Aware Resource Access Scheme for LTE-based Machine-to-Machine Communications// IEEE Trans. Vehicular Technology. 2018. N 67(5). P. 4683–4688.
19. 3GPP. TSG RAN WG2. RACH Intensity of Time Controlled Devices. R2-102296. 2010. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/wg2_rl2/TSGR2_69bis/Docs/R2-102296.zip (дата обращения: 22.08.2018).
20. **Maeder A., Staehle D., Rost P.** The Challenge of M2M Communications for the Cellular Radio Access Network// 11th Wurzburg Workshop on IP: Joint ITG and Euro-NF Workshop. 2011. P. 1–2.
21. 3GPP. Study on RAN Improvements for Machine-type Communications. TR 37.868. 2011. http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.868/37868-b00.zip (дата обращения: 22.08.2018).
22. 3GPP. Feasibility Study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced). TR 36.912. 2011. https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136912/10.00.00_60/tr_136912v100000p.pdf (дата обращения: 22.08.2018).
23. **Dohler M., Alonso-Zrate J., Watteyne T.** Machine-to-Machine: An Emerging Communication Paradigm// Wireless World Research Forum. 2010. P. 1–4.
24. **Kleinrock L., Lam S.** Packet-Switching in a Multi-Access Broadcast Channel: Performance Evaluation// IEEE Trans. on Communications. 1975. N 23(4). P. 410–423.
25. **Sidi M., Segall A.** Two Interfering Queues in Packet-Radio Networks// IEEE Trans. on Communications. 1983. N 31(1). P. 123–129.

UDC 004.77

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-105-114

On Multiple Access of a Large Number of Machine-Type Devices in Cellular NetworksGalina O. S.^a, PhD, Senior ResearcherAndreev S. D.^a, PhD, Senior Researcher, serge.andreev@gmail.comTyurlikov A. M.^b, Dr. Sc., Tech., Professor, turlikov@vu.spb.ru^aTampere University of Technology, 1, Korkeakoulunkatu, 33100, Tampere, Finland^bSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Machine-to-machine communication assumes data transmission from various wireless devices and attracts attention of cellular operators. In this regard, it is crucial to recognize and control overload situations when a large number of such devices

access the network over a short time interval. **Purpose:** Analysis of the radio network overload at the initial network entry stage in a machine-to-machine communication system. **Results:** A system is considered that features multiple smart meters, which may report alarms and autonomously collect energy consumption information. An analytical approach is proposed to study the operation of a large number of devices in such a system as well as model the settings of the random-access protocol in a cellular network and overload control mechanisms with respect to the access success probability, network access latency, and device power consumption. A comparison between the obtained analytical results and simulation data is also offered.

Keywords — Cellular Network, Random Multiple Access, Large Number of Devices, Initial Network Access.

Citation: Galinina O. S., Andreev S. D., Tyurlikov A. M. On Multiple Access of a Large Number of Machine-Type Devices in Cellular Networks. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 105–114 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-105-114

References

1. *Machine-To-Machine (M2M) & Smart Systems Forecast 2010–2014*. Harbor Research Report, 2009. Available at: <https://www.slideshare.net/harborresearch/harbor-research-machine-to-machine-m2m-smart-systems-market-forecast> (accessed 22 August 2018).
2. Palattella M. R., Dohler M., Grieco L. A., Rizzo G., Torsner J., Engel T., Ladid L. Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2016, no. 34(3), pp. 510–527.
3. Emmerson B. M2M: the Internet of 50 Billion Devices. *Win-Win Magazine*, 2010, no. 1, pp. 19–22.
4. Gazis V. A Survey of Standards for Machine-to-Machine and the Internet of Things. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 2017, no. 19(1), pp. 482–511.
5. *ETSI. Machine-to-Machine Communications (M2M): M2M Service Requirements*. TS 102 689, 2010. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/102600_102699/102689/01.01.01_60/ts_102689v010101p.pdf (accessed 22 August 2018).
6. Andreev S., Galinina O., Koucheryavy Y. Energy-Efficient Client Relay Scheme for Machine-to-Machine Communication. *Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2011, pp. 1–5.
7. Iraj S., Mogensen P., Ratasuk R. Recent Advances in M2M Communications and Internet of Things (IoT). *IJWIN*, 2017, no. 24(3), pp. 240–242.
8. *3GPP. System Improvements for Machine-Type Communications*. TR 23.888, 2011. Available at: <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/23888-b00.pdf> (accessed 22 August 2018).
9. *3GPP. Study on Enhancements for MTC*. TR 22.888, 2012. Available at: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/22_series/22.888/22888-c00.zip (accessed 22 August 2018).
10. *3GPP. Machine-Type and other Mobile Data Applications Communications Enhancements*. TR 23.887, 2012. Available at: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/23_series/23.887/23887-c00.zip (accessed 22 August 2018).
11. Ksairi N., Tomasin S., Debbah M. A Multi-Service Oriented Multiple Access Scheme for M2M Support in Future LTE. *IEEE Communications Magazine*, 2017, no. 55(1), pp. 218–224.
12. Ali A., Shah G. A., Arshad J. Energy Efficient Techniques for M2M Communication: A Survey. *J. Network and Computer Applications*, 2016, no. 68, pp. 42–55.
13. *3GPP. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification*. TS 36.321, 2007. Available at: <http://www.qtc.jp/3GPP/Specs/36321-800.pdf> (accessed 22 August 2018).
14. Koseoglu M. Lower Bounds on the LTE-A Average Random Access Delay under Massive M2M Arrivals. *IEEE Trans. Communications*, 2016, no. 64(5), pp. 2104–2115.
15. Johnson C. *Long Term Evolution in Bullets*. Louisville, CreateSpace Independent Publishing Platform, 2010. 280 p.
16. Rico-Alvarino A., Vajapeyam M., Xu H., Wang X., Blankenship Y. W., Bergman J., Tirronen T., Yavuz E. A. An Overview of 3GPP Enhancements on Machine to Machine Communications. *IEEE Communications Magazine*, 2016, no. 54(6), pp. 14–21.
17. Gursu H. M., Vilgelm M., Kellerer W., Reisslein M. Hybrid Collision Avoidance-Tree Resolution for M2M Random Access. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, 2017, no. 53(4), pp. 1974–1987.
18. Alavikia Z., Ghasemi A. Collision-Aware Resource Access Scheme for LTE-based Machine-to-Machine Communications. *IEEE Trans. Vehicular Technology*, 2018, no. 67(5), pp. 4683–4688.
19. *3GPP. TSG RAN WG2. RACH intensity of Time Controlled Devices*. R2-102296, 2010. Available at: http://www.3gpp.org/ftp/tsg_ran/wg2_rl2/TSGR2_69bis/Docs/R2-102296.zip (accessed 22 August 2018).
20. Maeder A., Staehle D., Rost P. The Challenge of M2M Communications for the Cellular Radio Access Network. *11th Wurzburg Workshop on IP: Joint ITG and Euro-NF Workshop*, 2011, pp. 1–2.
21. *3GPP. Study on RAN Improvements for Machine-type Communications*. TR 37.868, 2011. Available at: http://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.868/37868-b00.zip (accessed 22 August 2018).
22. *3GPP. Feasibility Study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)*. TR 36.912, 2011. Available at: https://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/136900_136999/136912/10.00.00_60/tr_136912v100000p.pdf (accessed 22 August 2018).
23. Dohler M., Alonso-Zrate J., Watterey T. Machine-to-Machine: An Emerging Communication Paradigm. *Wireless World Research Forum*, 2010, pp. 1–4.
24. Kleinrock L., Lam S. Packet-Switching in a Multi-Access Broadcast Channel: Performance Evaluation. *IEEE Trans. on Communications*, 1975, no. 23(4), pp. 410–423.
25. Sidi M., Segall A. Two Interfering Queues in Packet-Radio Networks. *IEEE Trans. on Communications*, 1983, no. 31(1), pp. 123–129.

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ПРЕДСКАЗАНИЯ ЭПИЛЕПТИЧЕСКИХ ПРИСТУПОВ ПО МНОГОКАНАЛЬНЫМ ЗАПИСЯМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ МОЗГА

В. А. Максименко^а, канд. физ.-мат. наук, доцент, orcid.org/0000-0002-4632-6896, maximenkovl@gmail.com

А. А. Харченко^а, аспирант

А. Люттьёханн^б, PhD, orcid.org/0000-0002-9248-1264

^аСаратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю. А., Политехническая ул., 77, Саратов, 410054, РФ

^бИнститут физиологии Мюнстерского университета, ул. Роберта Коха, 27а, D-48149, Мюнстер, Германия

Постановка проблемы: большой интерес к изучению процессов, протекающих в головном мозге, с использованием частотно-временных паттернов на регистрируемых электроэнцефалографических данных, связан с возможностью разработки на основе электроэнцефалограмм интерфейсов мозг-компьютер. Основой функционирования интерфейсов мозг-компьютер является детектирование в реальном времени характерных паттернов на многоканальных электроэнцефалограммах и преобразование их в команды для управления внешними устройствами. Одной из важных сфер применения интерфейсов мозг-компьютер является контроль патологической активности головного мозга, что востребовано, в частности, для различных форм эпилепсии, не поддающихся медикаментозному лечению. **Цель:** разработка методики детектирования характерных паттернов нейронной активности, предшествующих возникновению эпилептического приступа. **Результаты:** с использованием многоканальных электроэнцефалограмм исследована динамика таламо-кортикальной сети головного мозга, предшествующая возникновению эпилептического приступа. Разработана методика, позволяющая предсказывать возникновение эпилептического приступа. Методика реализована в виде нейроинтерфейса, который испытан *in vivo* на животной модели абсанс-эпилепсии. **Практическая значимость:** результаты исследования свидетельствуют о возможности предсказания эпилептических приступов по многоканальным электроэнцефалограммам. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нейроинтерфейсов для предсказания и предотвращения приступов различных типов эпилепсии у человека.

Ключевые слова — электроэнцефалография, нейроинтерфейс, непрерывное вейвлет-преобразование, частотно-временная динамика, эпилептический приступ.

Цитирование: Максименко В. А., Харченко А. А., Люттьёханн А. Автоматизированная система для предсказания эпилептических приступов по многоканальным записям электрической активности мозга//Информационно-управляющие системы. 2018. № 4. С. 115–122. doi:10.31799/1684-8853-2018-4-115-122

Citation: Maksimenko V. A., Harchenko A. A., Lüttjohann A. Automated System for Epileptic Seizures Prediction based on Multi-Channel Recordings of Electrical Brain Activity. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 115–122 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-115-122

Введение

Современные тенденции в области нейрофизиологии связаны с анализом поведения различных нейронных сетей головного мозга, которые взаимодействуют друг с другом при выполнении некоторых когнитивных задач [1, 2], как, например, формирование памяти [3], восприятие визуального объекта [4] или развитие (на клиническом уровне) патологических ритмов, таких как эпилептические приступы [5]. Подобные процессы, протекающие в нейронной сети, могут быть количественно оценены с помощью степени синхронности, которая может быть измерена как локально (т. е. в пределах одной и той же области мозга), так и в более глобальном масштабе (т. е. между различными областями мозга) [6].

В то время как нейрофизиология направлена на понимание процессов взаимодействия между отдельными нейронами [7], большинство имеющихся данных (особенно полученных у пациентов) регистрируется при помощи неинвазивных методов. В качестве таких методов в повседневной практике используют электроэнцефалографию (ЭЭГ) или магнитоэнцефалографию (МЭГ), которые представляют собой измерения (электрической или магнитной) групповой активности крупных ансамблей нейронов.

Современная задача для физиков и нейрофизиологов состоит, таким образом, в понимании процессов на микроскопическом уровне, регулирующих взаимодействие между нейронами при формировании различных видов нейронной активности, выявленных (на макроскопическом

масштабе) при помощи ЭЭГ- и МЭГ-оборудования.

Актуальность данной задачи тесно связана с возможностью использовать сигналы ЭЭГ для разработки нейроинтерфейсов, или интерфейсов мозг-компьютер (ИМК). В основе функционирования таких систем лежит детектирование в реальном времени характерных паттернов на ЭЭГ и преобразование их в управляющие команды.

Одним из возможных применений ИМК можно выделить контроль состояния головного мозга при заболеваниях центральной нервной системы, характеризующихся возникновением патологической нейронной активности. В частности, необходимость в подобных ИМК существует для пациентов с эпилепсией. Эпилепсия характеризуется спонтанным возникновением приступов, при этом в 30 % случаев медикаментозное лечение не позволяет предотвратить возникновение приступов. Для пациентов, устойчивых к медикаментозной терапии, представляется перспективным использование нейроинтерфейсов, позволяющих остановить приступ путем электрической стимуляции головного мозга [8]. В настоящее время возможность остановки приступа путем электрической стимуляции продемонстрирована в рамках клинических испытаний [9]. Разработанные противоэпилептические нейроинтерфейсы в основном являются односторонними (в английской литературе open-loop). В системах типа open-loop воздействие на нервную систему со стороны генератора импульсов подается в соответствии с заранее определенным алгоритмом и не зависит от текущего состояния организма [10].

Очевидно, что в данном контексте двустороннее взаимодействие (closed-loop), при котором генератор импульсов активируется непосредственно в момент генерации нейронной сетью мозга соответствующих патологических ритмов, более предпочтительно. Однако реализация таких систем требует разработки методик, позволяющих детектировать заданные паттерны нейронной активности на ЭЭГ с высокой степенью чувствительности и селективности. В настоящий момент известны прототипы, детектирующие приступы у животных с вероятностью выше 90 % [11]. В то же самое время разрушение приступа после его детектирования только сокращает его длительность. Для дальнейшего развития технологии необходима разработка методов, позволяющих в автоматическом режиме предсказывать эпилептические приступы по ЭЭГ-данным.

В данном контексте в настоящей работе рассматривается возможность предсказания эпилептических приступов по многоканальным ЭЭГ крыс WAG/Rij — животной модели абсансной

эпилепсии. Методика предсказания основана на раннем детектировании процессов синхронизации активности нейронов, локализованных в различных областях мозга (коре и таламических ядрах), а также взаимодействия между данными областями посредством анализа многоканального набора сигналов ЭЭГ. Разработанная методика апробирована *in vivo* на примере нейроинтерфейса для автоматического предсказания эпилептических приступов у крыс WAG/Rij.

Нейрофизиологический эксперимент

В эксперименте использовались 6-месячные крысы WAG/Rij (всего шесть животных). Регистрация ЭЭГ осуществлялась при помощи хронически имплантированных электродов из нержавеющей стали в 1) слоях 4–6 соматосенсорной коры (рис. 1, а), а также в 2) заднем таламическом ядре (posterior thalamic nucleus) (рис. 1, б), 3) вентрально-посерегулярном таламическом ядре (ventral-posteromedial thalamic nucleus) (рис. 1, в), 4) переднем таламическом ядре (anterior thalamic nucleus) (рис. 1, г) и 5) ретикулярном таламическом ядре (reticular thalamic nucleus) (рис. 1, д).

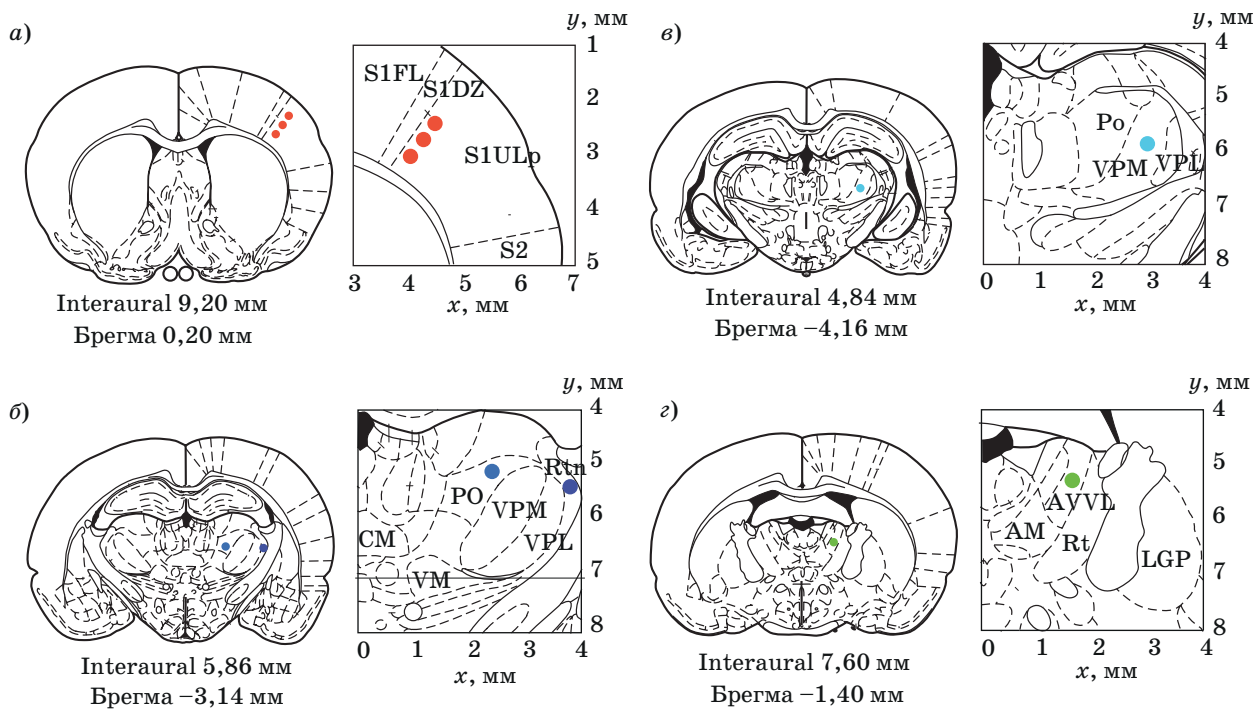
Электроды имплантировались при глубокой изофлороновой анестезии. Через две недели после операции сигналы ЭЭГ регистрировались из вышеуказанных отделов мозга у свободно движущихся животных. Получаемые сигналы ЭЭГ были отфильтрованы полосовым фильтром с точками отсечки 1 (НП) и 100 (ЛП) Гц и полосовым заграждающим фильтром на 50 Гц и оцифровывались с помощью системы регистрации WINDAQ (DATAQ-Instruments Inc., Akron, OH, США) с постоянной частотой дискретизации 500 Гц. Эксперименты проводились в соответствии с этическими нормами, утвержденными комитетом по экспериментам на животных Университета Радбауд Неймеген (RU-DEC).

Частотно-временной анализ

Для того чтобы исследовать динамику сигнала электрической активности мозга (ЭЭГ) $X(t)$ как во временной, так и в частотной области, удобно использовать энергетический вейвлетный спектр, который можно рассчитать по формуле $W(f, t) = |M(f, t)|^2$, где $M(f, t)$ — комплекснозначный коэффициент вейвлет-преобразования:

$$M(f, t') = \sqrt{f} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \psi^*((t-t')f) dt \quad (1)$$

(символ * обозначает комплексное сопряжение). В качестве материнского вейвлета в данной работе выбран вейвлет Морле



■ **Рис. 1.** Расположение регистрирующих электродов в различных отделах головного мозга крысы: *a* — в слоях 4–6 соматосенсорной коры; *б* — в заднем таламическом ядре и ретикулярном таламическом ядре; *в* — в вентрально-послерегулярном таламическом ядре; *з* — в переднем таламическом ядре. Координаты расположения электродов заданы согласно атласу мозга [Paxinos and Watson, 1998]

■ **Fig. 1.** Electrode location: *a* — layers 4–6 of the somatosensory cortex; *б* — the posterior and reticular thalamic nucleus; *в* — the ventral-postero-medial thalamic nucleus; *з* — the anterior thalamic nucleus. Coordinates are shown in accordance with the Rat brain atlas of Paxinos and Watson [Paxinos and Watson, 1998]

$$\psi(\zeta) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \exp(j2\pi\zeta) \exp\left(-\frac{\zeta^2}{2}\right). \quad (2)$$

Вейвлет-преобразование выполнялось для набора регистрируемых сигналов ЭЭГ в частотном диапазоне 2÷20 Гц.

Результаты

В качестве глобальной характеристики $X_i(t)$, описывающей коллективную динамику i -го нейронного ансамбля, рассмотрим запись электрической активности (ЭЭГ), регистрируемую при помощи электрода, расположенного в окрестности данного ансамбля. Данная характеристика представляет собой нестационарный сигнал, спектральный состав которого эволюционирует во времени, и его эволюция определяется процессами взаимодействия (такими как установление синхронизации, образование кластеров) между нейронами данного ансамбля.

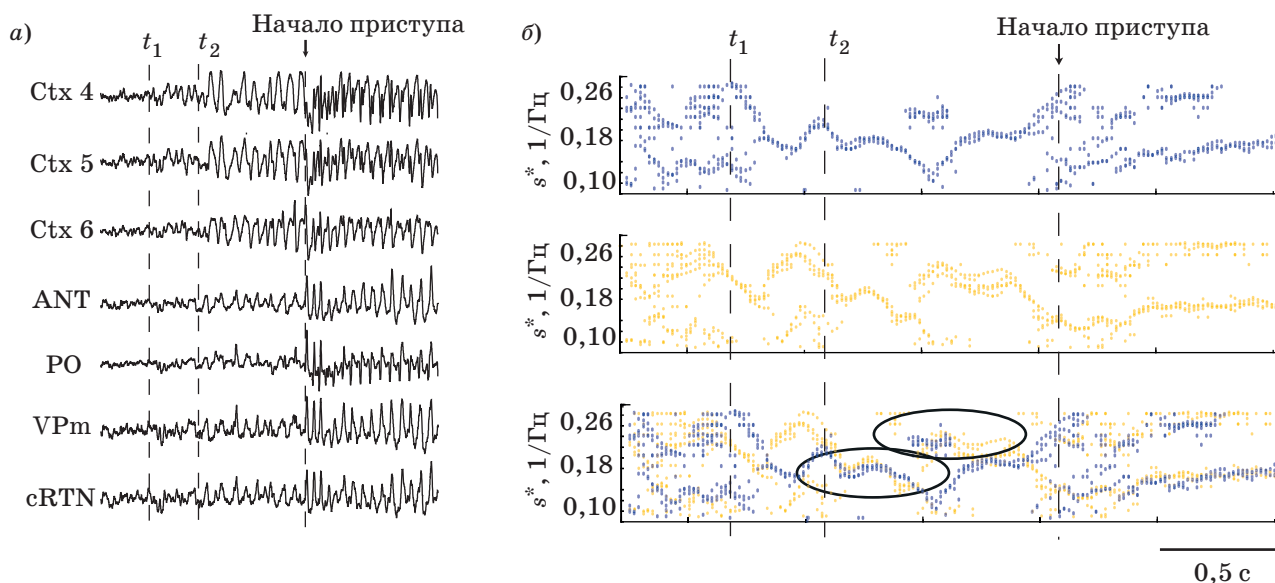
Рассмотренные сигналы $X_i(t)$, являясь глобальными характеристиками, описывающими динамику нейронных ансамблей, могут играть

роль локальных характеристик, когда речь идет о рассмотрении коллективной динамики нейронов, расположенных в различных отделах головного мозга.

Как известно, приступ эпилепсии ассоциируется с установлением синхронного режима нейронной активности, вовлекающего нейроны, принадлежащие различным областям мозга. Для абсансной эпилепсии, приступы которой характеризуются генерацией специфических пик-волновых паттернов на ЭЭГ, характерным является вовлечение нейронов коры головного мозга и таламических ядер [12, 13].

На рис. 2, *a* приведен набор ЭЭГ, регистрируемых у крыс линии WAG/Rij [14] при помощи инвазивных электродов, расположенных в различных слоях коры головного мозга (ctx 4–6) и в таламических ядрах (PO, ANT, VPM, RTn). Представленные записи иллюстрируют переход от нормальной активности к эпилептическому приступу (стрелкой указан момент возникновения приступа, характеризующийся синхронным возникновением пик-волнового паттерна в кортексе и таламусе).

На рис. 2, *б* точками показаны положения спектральных компонент исследуемых сигналов



■ **Рис. 2.** Набор записей ЭЭГ, регистрируемых у крыс специальной линии WAG/Rij при помощи инвазивных электродов, расположенных в различных слоях коры головного мозга (ctx4–6) и в таламических ядрах (а); положения спектральных компонент исследуемых сигналов ЭЭГ, характеризующихся максимальным значением энергии, в каждый момент времени, показанные точками (б)

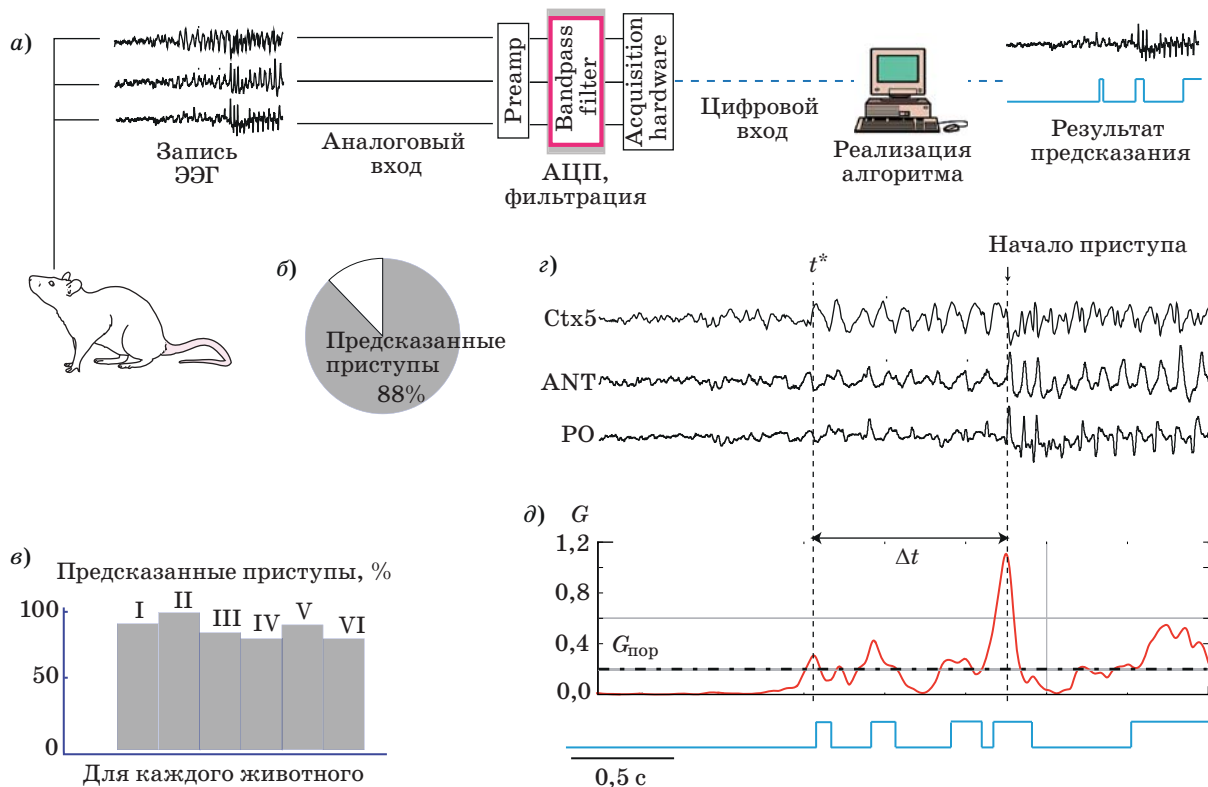
■ **Fig. 2.** A set of EEG traces recorded in the WAG/Rij using invasive electrodes located in different layers of the cortex (ctx4–6) and in thalamic nuclei (а); points correspond to the positions of the spectral components of the analyzed EEG signals, which are characterized by the maximum value of wavelet energy, at each moment of time (б)

ЭЭГ, характеризующихся максимальным значением энергии, в каждый момент времени. При этом приведенные графики сверху вниз соответствуют спектральным компонентам всего набора каналов соответственно.

Представленные зависимости получены на основании рассмотрения энергии вейвлетного спектра $|W(s, t)|^2$, где $W(s, t)$ — комплекснозначный коэффициент, рассчитанный в момент времени t для временного масштаба s ($s = 1/f$, где f — линейная частота), и выделения временных масштабов s^* , характеризующихся локальным увеличением энергии и условием $|W(s^*, t)|^2 > W_{th}$. W_{th} представляет собой пороговое значение энергии, подобранное эмпирически [15, 16]. На рис. 2, б, рассматривая отдельно кортикальные каналы, можно наблюдать, что в момент времени t_1 спектральная энергия сосредоточена в диапазонах ~5 и ~10 Гц. В момент времени t_2 спектральная энергия сосредоточена в области ~6–7 Гц. Можно предположить, что наблюдаемый эффект объясняется увеличением взаимодействия между нейронами, принадлежащими различным слоям коры головного мозга. В момент времени t_1 большая часть нейронов, расположенных в различных слоях коры головного мозга, оказывается вовлеченной в генерацию двух типов коллективной активности — низкочастотной (~5 Гц) и высокочастотной (~10 Гц). Причем степень вовлеченности различных слоев в генерацию этих ритмов оказывает

ся различной и может быть оценена с помощью значения спектральной энергии, приходящейся на данную область спектра. В момент времени t_2 нейроны, находящиеся в различных слоях коры мозга, начинают демонстрировать синхронную динамику в области ~6–7 Гц. При этом можно отметить, что большая часть спектральной энергии для всех рассматриваемых каналов оказывается сосредоточенной в области спектра, соответствующей наблюдаемому типу активности (в данный момент времени энергия остальной части спектра оказывается меньше определенного порогового значения).

Разбирая активность таламических ядер, можно также отметить возникновение синхронной активности нейронов в момент времени t_1 . При этом, рассматривая кортикальные и таламические ЭЭГ совместно, можно видеть, что существуют моменты времени, в которые электрическая активность нейронов коры головного мозга и таламических ядер становится синхронной. В частности, подобная глобальная синхронизация на частоте ~8 Гц соответствует установлению приступа абсансной эпилепсии. В то же самое время, помимо эпилептического приступа, подобные синхронные режимы наблюдаются перед его возникновением (на рис. 2, б соответствующие области обведены сплошной линией). Подобное поведение нейронной сети мозга связано с генерацией специфических паттернов —



■ **Рис. 3.** Схематическое изображение нейроинтерфейса для предсказания эпилептических приступов по сигналам ЭЭГ (а); среднее процентное соотношение числа предсказанных и пропущенных приступов в группе животных (б); процент предсказанных приступов для каждого животного (в); набор записей ЭЭГ, иллюстрирующих возникновение приступа (г); зависимость $G(t)$, иллюстрирующая глобальную характеристику таламо-кортикальной сети, и телеграфный сигнал, иллюстрирующий моменты времени, для которых рассмотренная глобальная характеристика превышает заданное пороговое значение (д)

■ **Fig. 3.** Schematic representation of the brain-computer interface for epileptic seizures prediction using EEG signals (a); middle percentage of predicted and missed seizures in the group of animals (b); percentage of predicted seizures is shown for each animal (c); set of EEG traces illustrating the occurrence of epileptic seizure (g); evolution of the global characteristic of the thalamo-cortical network on the time interval corresponding to the transition from normal activity to epileptic seizure, and the telegraph signal illustrates the moments for which the considered global characteristic exceeds a predetermined threshold (d)

предшественников эпилептического приступа в области 2–5 Гц (δ -предшественники) и 5–8 Гц (θ -предшественники) [17].

С учетом того, что отдельный сигнал электрической активности $X_i(t)$ характеризует динамику нейронного ансамбля, введем параметр $A_i(t)$, характеризующий степень вовлеченности нейронов рассматриваемого ансамбля в генерацию активности, предшествующую возникновению приступа:

$$A_i(t) = \frac{0,2 \Gamma_{\Pi}^{-1} \int |W_i(s, t)|^2 ds}{0,35 \Gamma_{\Pi}^{-1} \int |W_i(s, t)|^2 ds + 0,05 \Gamma_{\Pi}^{-1}}. \quad (3)$$

Полученные коэффициенты $A_i(t)$, $i=1, \dots, N$ являются локальными характеристиками тала-

мокортикальной сети, узлами которой являются нейронные ансамбли, расположенные в различных слоях коры головного мозга и таламических ядрах. Для данной сети введем глобальный параметр $G(t)$, характеризующий увеличение синхронизации между данными областями и увеличение степени их вовлечения в генерацию активности, предшествующей возникновению приступа:

$$G(t) = \prod_{i=1}^N A_i(t). \quad (4)$$

В данном случае N — число рассматриваемых каналов ЭЭГ (см. рис. 2, а). Параметр $G(t)$ может быть измерен в режиме реального времени с частотой, определяемой частотой дискретизации сигналов ЭЭГ, и сопоставлен с некоторым пороговым значением, позволяющим различать

моменты возникновения синхронизации от процессов, регистрируемых на ЭЭГ в фоновом режиме. В настоящей работе для тестирования описанного выше метода был разработан нейроинтерфейс (рис. 3, а). В соответствии с работами [16, 18] мы использовали три электрода, расположенных в слое 5 коры головного мозга и в таламических ядрах ANT и PO. Регистрация, оцифровка и предварительная обработка ЭЭГ осуществлялись с использованием программно-аппаратных средств WINDAQ (DATAQ-Instruments Inc., Akron, OH, США). На базе регистрируемых ЭЭГ вычислялся коэффициент (4) и сопоставлялся со значением $G_{\text{пор}}$, выбираемым для каждого животного индивидуально на основе предварительно записанных сигналов ЭЭГ. ИМК был апробирован на шести животных в течение 4-часовой экспериментальной сессии. В результате был рассчитан процент корректно предсказанных разрядов к общему числу разрядов. В среднем 4-часовые записи ЭЭГ крыс WAG/Rij содержат 50 эпилептических приступов. В результате применения метода число предсказанных приступов у исследуемых животных составило $(87,8 \pm 7,08) \%$ (рис. 3, б, в), при этом приступы были предсказаны за $(0,8 \pm 0,16) \text{ с}$.

На рис. 3, д проиллюстрировано изменение во времени глобальной характеристики (4) на временном интервале, соответствующем переходу от нормальной активности к эпилептическому приступу. Видно, что за секунду до возникновения приступа наблюдается резкий рост $G(t)$. Данное явление обусловлено увеличением значений двух показателей: коэффициентов $A_i(t)$ для рассматриваемых каналов ЭЭГ и переходами высокоэнергетических спектральных компонент, характеризующих активность нейронов коры мозга и таламических ядер, в одну область спектра.

Из рисунка видно, что анализ динамики коэффициента $G(t)$ путем сопоставления его с пороговым значением $G_{\text{пор}}$ дает возможность детектирования активности, предшествующей возникновению приступа.

Заключение

В статье изучена возможность детектирования характерных паттернов нейронной активности, предшествующих возникновению эпилептического приступа, в режиме реального времени. Показано, что сигналы электрической активности головного мозга, регистрируемые из различных его участков посредством ЭЭГ, могут рассматриваться в качестве макроскопических характеристик нейронных ансамблей, локализованных в окрестности регистрирующего электрода. При этом данные характеристики могут также рассматриваться в качестве микроскопических характеристик в том случае, когда анализируется взаимосвязь между удаленными нейронными группами [19, 20]. Показано, что, основываясь на описанном формализме, можно эффективно выявлять характерные свойства нейронной сети, лежащие в основе генерации патологической нейронной активности — эпилептического приступа, характеризующегося, как известно, как локальной синхронизацией нейронов, так и глобальной синхронизацией, вовлекающей различные отделы головного мозга. Разработана методика для выявления процессов установления и развития локальных и глобальных синхронных режимов за секунды до клинического приступа (выявление предвестников эпилептического приступа). Методика реализована в виде нейроинтерфейса, который испытан *in vivo* на животной модели абсанс-эпилепсии. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нейроинтерфейсов для предсказания и предотвращения приступов различных типов эпилепсии у человека.

Работа поддержана Министерством образования и науки РФ (проект 3.861.2017/4.6) и Президентской программой поддержки ведущих научных школ РФ (проект НШ-2737.2018.2).

Авторы выражают благодарность профессорам Е. Л. J. M. van Luijtelaaar и А. Е. Храмову за предоставление экспериментального материала и ценные обсуждения работы.

Литература

1. Betzel R. F., Gu S., Medaglia J. D., Pasqualetti F., Bassett D. S. Optimally Controlling the Human Connectome: The Role of Network Topology // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. 30770. doi:10.1038/srep30770
2. Hermundstad A. M., Bassett D. S., Brown K. S., Aminoff E. M., Clewett D., Freeman S., Frithsen A., Johnson A., Tipper C. M., Miller M. B., Grafton S. T., Carlson J. M. Structural Foundations of Resting-State and Task-Based Functional Connectivity in the

Human Brain // Proc. of the National Academy of Sciences. 2013. Vol. 110. P. 6169–6174. doi:10.1073/pnas.1219562110

3. Buzsaki G. Two-stage Model of Memory Trace Formation: A Role for “Noisy” Brain States // Neuroscience. 1989. Vol. 31. P. 551–570. doi:10.1016/0306-4522(89)90423-5
4. Cichy R. M., Khosla A., Pantazis D., Torralba A., Oliva A. Comparison of Deep Neural Networks to Spatio-Temporal Cortical Dynamics of Human Visual Object Recognition Reveals Hierarchical Correspondence // Scientific Reports. 2016. Vol. 6. 27755. doi:10.1038/srep27755

5. Cavanna A., Monaco F. Brain Mechanisms of Altered Conscious States During Epileptic Seizures // *Nature Reviews Neurology*. 2009. Vol. 5. P. 267–276. doi:10.1038/nrneuro.2009.38
6. Jalili M. Functional Brain Networks: Does the Choice of Dependency Estimator and Binarization Method Matter? // *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. 29780. doi:10.1038/srep29780
7. Maynard E. M., Hatsopoulos N. G., Ojakangas C. L., Acuna B. D., Sanes J. N., Normann R. A., Donoghue J. P. Neuronal Interactions Improve Cortical Population Coding of Movement Direction // *The Journal of Neuroscience*. 1999. Vol. 19. P. 8083–8093. doi:10.1523/JNEUROSCI
8. Durand D. Electrical Stimulation Can Inhibit Synchronized Neuronal Activity // *Brain Research*. 1986. Vol. 382. P. 139–144. doi:10.1016/0006-8993(86)90121-6
9. Stacey W. C., Litt B. Technology Insight: Neuroengineering and Epilepsy — Designing Devices for Seizure Control // *Nature Reviews Neurology*. 2008. Vol. 4. P. 190. doi:10.1038/ncpneuro0750
10. Fisher R. S., Krauss G. L., Ramsay E., Laxer K., Gates J. Assessment of Vagus Nerve Stimulation for Epilepsy: Report of the Therapeutics and Technology Assessment Subcommittee of the American Academy of Neurology // *Neurology*. 1997. Vol. 49. P. 293–297.
11. Ovchinnikov A. A., Lüttjohann A., Hramov A. E., van Luijtelaa G. An Algorithm for Real-Time Detection of Spike-Wave Discharges in Rodents // *Journal of Neuroscience Methods*. 2010. Vol. 194. P. 172–178. doi:10.1016/j.jneumeth.2010.09.017
12. Sitnikova E. Yu., van Luijtelaa G. Cortical and Thalamic Coherence During Spike-Wave Seizures in WAG/Rij Rats // *Epilepsy Res*. 2009. Vol. 71. P. 159–180. doi:10.1016/j.epilepsyres.2006.06.008
13. Sitnikova E. Yu., Hramov A. E., Koronovsky A. A., van Luijtelaa G. Sleep Spindles and Spike-Wave Discharges in EEG: Their Generic Features, Similarities and Distinctions Disclosed with Fourier Transform and Continuous Wavelet Analysis // *J. Neurosci. Methods*. 2009. Vol. 180. P. 304–316. doi:10.1016/j.jneumeth.2009.04.006
14. Sarkisova K., van Luijtelaa G. The WAG/Rij Strain: A Genetic Animal Model of Absence Epilepsy with Comorbidity of Depression // *Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry*. 2011. Vol. 35. P. 854–876. doi:10.1016/j.pnpbp.2010.11.010
15. Павлов А. Н., Храмов А. Е., Короновский А. А., Ситникова Е. Ю., Макаров В. А., Овчинников А. А. Вейвлет-анализ в нейродинамике // *Успехи физических наук*. 2012. Т. 182. С. 905–939. doi:10.3367/UFNr.0182.201209a.0905
16. Maksimenko V. A., van Heukelum S., Makarov V. V., Kelderhuis J., Lüttjohann A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., van Luijtelaa G. Absence Seizure Control by a Brain Computer Interface // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7. P. 2487. doi:10.1038/s41598-017-02626-y
17. van Luijtelaa G., Hramov A. E., Sitnikova E. Yu., Koronovskii A. A. Spike-Wave Discharges in WAG/Rij Rats are Preceded by Delta and Theta Precursor Activity in Cortex and Thalamus // *Clinical Neurophysiology*. 2011. Vol. 122. P. 687–695.
18. van Luijtelaa G., Lüttjohann A., Makarov V. V., Maksimenko V. A., Koronovskii A. A., Hramov A. E. Methods of Automated Absence Seizure Detection, Interference Bystimulation, and Possibilities for Prediction in Genetic Absence Models // *Journal of Neuroscience Methods*. 2011. Vol. 260. P. 144–158. doi:10.1016/j.jneumeth.2015.07.010
19. Maksimenko V. A., Lüttjohann A., Makarov V. V., Goremyko M. V., Koronovskii A. A., Nedaivozov V. O., Runnova A. E., Luijtelaa G., Hramov A. E., Boccaletti S. Macroscopic and Microscopic Spectral Properties of Brain Networks During Local and Global Synchronization // *Phys. Rev. E*. 2017. Vol. 96. P. 012316.
20. Харченко А. А., Макаров В. В., Храмов А. Е. Исследование синхронизации в сети нелинейных осцилляторов со сложной топологией связей по интегральным регистрируемыми характеристикам // *Изв. РАН. Сер. физическая*. 2014. Т. 78. № 12. С. 1616–1620.

UDC 537.86, 577.359

doi:10.31799/1684-8853-2018-4-115-122

Automated System for Epileptic Seizures Prediction based on Multi-Channel Recordings of Electrical Brain ActivityMaksimenko V. A.^a, PhD, Phys.-Math, Associate Professor, orcid.org/0000-0002-4632-6896, maximenkovl@gmail.comHarchenko A. A.^a, Post-Graduate StudentLüttjohann A.^b, PhD in Neuroscience, orcid.org/0000-0002-9248-1264^aYuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77, Politechnicheskaja St., 410054, Saratov, Russian Federation^bUniversity of Münster, Institute of Physiology I, Robert-Koch-Str., 27a, D-48149, Münster, Germany

Introduction: Now the great interest in studying the brain activity based on detection of oscillatory patterns on the recorded data of electrical neuronal activity (electroencephalograms) is associated with the possibility of developing brain-computer interfaces. Brain-computer interfaces are based on the real-time detection of characteristic patterns on electroencephalograms and their transformation

into commands for controlling external devices. One of the important areas of the brain-computer interfaces application is the control of the pathological activity of the brain. This is in demand for epilepsy patients, who do not respond to drug treatment. **Purpose:** A technique for detecting the characteristic patterns of neural activity preceding the occurrence of epileptic seizures. **Results:** Using multi-channel electroencephalograms, we consider the dynamics of thalamo-cortical brain network, preceded the occurrence of an epileptic seizure. We have developed technique which allows to predict the occurrence of an epileptic seizure. The technique has been implemented in a brain-computer interface, which has been tested in-vivo on the animal model of absence epilepsy. **Practical relevance:** The results of our study demonstrate the possibility of epileptic seizures prediction based on multichannel electroencephalograms. The obtained results can be used in the development of neurointerfaces for the prediction and prevention of seizures of various types of epilepsy in humans.

Keywords — Electroencephalography, Pattern, Continuous Wavelet Transformation, Time-Frequency Dynamics.

Citation: Maksimenko V. A., Harchenko A. A., Lüttjohann A. Automated System for Epileptic Seizures Prediction based on Multi-Channel Recordings of Electrical Brain Activity. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2018, no. 4, pp. 115–122 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2018-4-115-122

References

- Betzel R. F., Gu S., Medaglia J. D., Pasqualetti F., Bassett D. S. Optimally Controlling the Human Connectome: The Role of Network Topology. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, 30770. doi:10.1038/srep30770
- Hermundstad A. M., Bassett D. S., Brown K. S., Aminoff E. M., Clewett D., Freeman S., Frithsen A., Johnson A., Tipper C. M., Miller M. B., Grafton S. T., Carlson J. M. Structural Foundations of Resting-State and Task-Based Functional Connectivity in the Human Brain. *Proc. of the National Academy of Sciences*, 2013, vol. 110, pp. 6169–6174. doi:10.1073/pnas.1219562110
- Buzsaki G. Two-stage Model of Memory Trace Formation: A Role for “Noisy” Brain States. *Neuroscience*, 1989, vol. 31, pp. 551–570. doi:10.1016/0306-4522(89)90423-5
- Cichy R. M., Khosla A., Pantazis D., Torralba A., Oliva A. Comparison of Deep Neural Networks to Spatio-Temporal Cortical Dynamics of Human Visual Object Recognition Reveals Hierarchical Correspondence. *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, 27755. doi:10.1038/srep27755
- Cavanna A., Monaco F. Brain Mechanisms of Altered Conscious States During Epileptic Seizures. *Nature Reviews Neurology*, 2009, vol. 5, pp. 267–276. doi:10.1038/nrneuro.2009.38
- Jalili M. Functional Brain Networks: Does the Choice of Dependency Estimator and Binarization Method Matter? *Scientific Reports*, 2016, vol. 6, 29780. doi:10.1038/srep29780
- Maynard E. M., Hatsopoulos N. G., Ojakangas C. L., Acuna B. D., Sanes J. N., Normann R. A., Donoghue J. P. Neuronal Interactions Improve Cortical Population Coding of Movement Direction. *The Journal of Neuroscience*, 1999, vol. 19, pp. 8083–8093. doi:10.1523/JNEUROSCI
- Durand D. Electrical Stimulation Can Inhibit Synchronized Neuronal Activity. *Brain Research*, 1986, vol. 382, pp. 139–144. doi:10.1016/0006-8993(86)90121-6
- Stacey W. C., Litt B. Technology Insight: Neuroengineering and Epilepsy — Designing Devices for Seizure Control. *Nature Reviews Neurology*, 2008, vol. 4, p. 190. doi:10.1038/nrnepneuro0750
- Fisher R. S., Krauss G. L., Ramsay E., Laxer K., Gates J. Assessment of Vagus Nerve Stimulation for Epilepsy: Report of the Therapeutics and Technology Assessment Subcommittee of the American Academy of Neurology. *Neurology*, 1997, vol. 49, pp. 293–297.
- Ovchinnikov A. A., Lüttjohann A., Hramov A. E., van Luijtelaar G. An Algorithm for Real-Time Detection of Spike-Wave Discharges in Rodents. *Journal of Neuroscience Methods*, 2010, vol. 194, pp. 172–178. doi:10.1016/j.jneumeth.2010.09.017
- Sitnikova E. Yu., van Luijtelaar G. Cortical and Thalamic Coherence During Spike-Wave Seizures in WAG/Rij Rats. *Epilepsy Res.*, 2009, vol. 71, pp. 159–180. doi:10.1016/j.eplepsyres.2006.06.008
- Sitnikova E. Yu., Hramov A. E., Koronovsky A. A., van Luijtelaar G. Sleep Spindles and Spike-Wave Discharges in EEG: Their Generic Features, Similarities and Distinctions Disclosed with Fourier Transform and Continuous Wavelet Analysis. *J. Neurosci. Methods*, 2009, vol. 180, pp. 304–316. doi:10.1016/j.jneumeth.2009.04.006
- Sarkisova K., van Luijtelaar G. The WAG/Rij Strain: A Genetic Animal Model of Absence Epilepsy with Comorbidity of Depression. *Prog. Neuropsychopharmacol. Biol. Psychiatry*, 2011, vol. 35, pp. 854–876. doi:10.1016/j.pnpbp.2010.11.010
- Pavlov A. N., Hramov A. E., Koronovskii A. A., Sitnikova E. Yu., Makarov V. A., Ovchinnikov A. A. Wavelet Analysis in Neurodynamics. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2012, vol. 182, pp. 905–939 (In Russian). doi:10.3367/UF-Nr.0182.201209a.0905
- Maksimenko V. A., van Heukelum S., Makarov V. V., Kelderhuis J., Lüttjohann A., Koronovskii A. A., Hramov A. E., van Luijtelaar G. Absence Seizure Control by a Brain Computer Interface. *Scientific Reports*, 2017, vol. 7, p. 2487. doi:10.1038/s41598-017-02626-y
- van Luijtelaar G., Hramov A. E., Sitnikova E. Yu., Koronovskii A. A. Spike-Wave Discharges in WAG/Rij Rats are Preceded by Delta and Theta Precursor Activity in Cortex and Thalamus. *Clinical Neurophysiology*, 2011, vol. 122, pp. 687–695.
- van Luijtelaar G., Lüttjohann A., Makarov V. V., Maksimenko V. A., Koronovskii A. A., Hramov A. E. Methods of Automated Absence Seizure Detection, Interference By-stimulation, and Possibilities for Prediction in Genetic Absence Models. *Journal of Neuroscience Methods*, 2011, vol. 260, pp. 144–158. doi:10.1016/j.jneumeth.2015.07.010
- Maksimenko V. A., Lüttjohann A., Makarov V. V., Goremyko M. V., Koronovskii A. A., Nedaivozov V. O., Runnova A. E., Luijtelaar G., Hramov A. E., Boccaletti S. Macroscopic and Microscopic Spectral Properties of Brain Networks During Local and Global Synchronization. *Phys. Rev. E*, 2017, vol. 96, p. 012316.
- Harchenko A. A., Makarov V. V., Hramov A. E. Studying Synchronization in a Network of Nonlinear Oscillators with a Complex Topology of Relations, According to Integral Registered Characteristics. *Izvestiia RAN. Seriya Fizicheskaya* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics], 2014, vol. 78, no. 12, pp. 1324–1327 (In Russian).

АНДРЕЕВ
Сергей
Дмитриевич



Старший научный сотрудник Технологического университета г. Тампере, Финляндия. В 2006 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Комплексная защита объектов информатизации». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 100 научных публикаций. Область научных интересов — беспроводные системы связи, системы массового обслуживания, мобильные и энергоэффективные системы. Эл. адрес: serge.andreev@gmail.com

БЕЗРУК
Георгий
Григорьевич



Начальник отдела морской робототехники Главного научно-исследовательского испытательного центра робототехники МО РФ, Санкт-Петербург. В 1999 году окончил Балтийский военно-морской институт им. Ф. Ф. Ушакова по специальности «Радиоэлектроника». В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 60 научных публикаций. Область научных интересов — морская робототехника, комплексная обработка разнородной информации, поиск и обнаружение объектов по различным физическим полям, системный анализ. Эл. адрес: geoint99@mail.ru

ГАЛИНИНА
Ольга
Сергеевна



Старший научный сотрудник Технологического университета г. Тампере, Финляндия. Окончила магистратуру Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого по специальности «Прикладная математика и информатика». В 2015 году получила степень PhD в области беспроводной связи в Технологическом университете г. Тампере, Финляндия. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — современные беспроводные системы связи, применение методов прикладной математики к исследованию беспроводных сетей новейшего поколения. Эл. адрес: olga.galinina@gmail.com

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

БЛАУНШТЕЙН
Натан
Шаевич



Профессор Иерусалимского технологического института, профессор-эмиритус кафедры систем связи инженерного факультета Негевского университета им. Бен-Гуриона, Беэр-Шева, Израиль. В 1972 году окончил Томский государственный университет по специальности «Радиофизика и электроника, включая квантовую». В 1991 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором около 200 научных публикаций, в том числе 12 монографий, пяти патентов и трех изобретений. Область научных интересов — радиофизика, системы проводной и беспроводной связи, радары, оптика и лидары. Эл. адрес: nathan.blauinstein@hotmail.com

ГРИБКОВ
Алексей
Николаевич



Профессор, заведующий кафедрой энергообеспечения предприятий и теплотехники Тамбовского государственного технического университета. В 2004 году окончил Тамбовский государственный технический университет по специальности «Проектирование и технология электронных средств». В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 100 научных публикаций и двух патентов на изобретения. Область научных интересов — теория оптимального управления многомерными объектами, методы разработки алгоритмического и программного обеспечения информационно-управляющих систем. Эл. адрес: GribovAlexey@yandex.ru

**ДЖОКОВИЧ
Драгомир**



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

**КОРШУНОВ
Геннадий
Иванович**



Профессор кафедры инноватики и управления качеством Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, генеральный директор ООО «ПАНТЕС групп». Изобретатель СССР.
В 1970 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Автоматика и телемеханика».
В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором более 100 научных публикаций, в том числе шести монографий и семи авторских свидетельств и патентов.
Область научных интересов — метрология, автоматизация приборов и систем, системы контроля, телеметрии и мониторинга, отказоустойчивость и качество сложных систем и др.
Эл. адрес: kgi@pantes.ru

**ЛЮТТЬЁХАНН
Анника**



Научный сотрудник Института психологии Университета Мюнстера, Мюнстер, Германия.
В 2008 году окончила факультет психологии Университета Радбауд, Неймеген, Нидерланды.
В 2012 году получила степень PhD в области нейронауки в Дондерском центре мозга, сознания и поведения Университета Радбауд.
Является автором более 40 научных публикаций.
Область научных интересов — абсансная эпилепсия, таламокортикальная сеть, предсказание эпилептических приступов.
Эл. адрес: Annika.Luettjohann@ukmuenster.de

**КАПРАНОВА
Екатерина
Андреевна**



Студентка кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.
Является автором четырех научных публикаций и двух свидетельств о государственной регистрации программы для ЭВМ.
Область научных интересов — поиск и исследование экстремальных квазиортогональных матриц для задач обработки информации, сжатие фазо-кодо-модулированных сигналов.
Эл. адрес: katyakaty1998-2010@mail.ru

**ЛИПАТНИКОВ
Валерий
Алексеевич**



Профессор, старший научный сотрудник Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург, заслуженный изобретатель РФ, член-корреспондент РАЕН.
В 1974 году окончил Военную академию связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного по специальности «Специальная радиотехника».
В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.
Является автором 267 научных публикаций и 80 патентов на изобретения.
Область научных интересов — теория многоуровневой иерархической радиоэлектронной защиты, безопасности связи и информации инфотелекоммуникационных сетей.
Эл. адрес: lipatnikovanl@mail.ru

**МАКСИМЕНКО
Владимир
Александрович**



Доцент Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А., старший научный сотрудник научно-образовательного центра «Нелинейная динамика сложных систем».
В 2012 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Физика открытых нелинейных систем».
В 2015 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук.
Является автором более 50 научных публикаций.
Область научных интересов — анализ устойчивости динамических режимов, реализующихся в пространственно-распределенных системах различной природы, и др.
Эл. адрес: maximenkovl@gmail.com

**МАЛЫШЕВ
Богдан
Юрьевич**

Старший оператор научной роты Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург. В 2013 году окончил Северо-Кавказский федеральный университет по специальности «Информационная безопасность». Является автором десяти научных публикаций и одной программы для ЭВМ. Область научных интересов — компьютерная безопасность, информационная безопасность, способы контроля уязвимостей и управления безопасностью информационно-вычислительных, информационно-телекоммуникационных и распределенных информационных сетей.
Эл. адрес: bogdan160596@bk.ru

**МИХАЙЛОВ
Владимир
Валентинович**

Профессор кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1957 году окончил Ленинградский электротехнический институт по специальности «Математические и счетно-решающие приборы и устройства». В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 190 научных публикаций. Область научных интересов — компьютерное моделирование в области экологии и робототехники, разработка систем автоматизации моделирования.
Эл. адрес: mwwcari@gmail.com

**МЫСЛИВЫЙ
Александр
Александрович**

Заместитель начальника отдела морской робототехники Главного научно-исследовательского испытательного центра робототехники МО РФ, Москва. В 2008 году окончил Санкт-Петербургский военно-морской институт по специальности «Гидрография, навигационное обеспечение судоходства». В 2016 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 20 научных публикаций. Область научных интересов — морская робототехника, комплексная обработка разнородной информации, поиск и обнаружение объектов по различным физическим полям, системный анализ.
Эл. адрес: aam-07@mail.ru

**МАРТЫНОВА
Любовь
Александровна**

Старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник научно-исследовательского центра «Системы освещения обстановки» АО «Концерн «ЦНИИ «Электронприбор», Санкт-Петербург. В 1985 году окончила Ленинградский кораблестроительный институт по специальности «Прикладная математика». В 2013 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 90 научных публикаций. Область научных интересов — системный анализ, математическое моделирование, оценка эффективности, обработка разнородной информации.
Эл. адрес: martynowa999@bk.ru

**МУРОМЦЕВ
Дмитрий
Юрьевич**

Проректор по научно-инновационной деятельности, профессор кафедры конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем Тамбовского государственного технического университета. В 1996 году окончил Тамбовский государственный технический университет по специальности «Автоматизация технологических процессов и производств». В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 190 научных публикаций и десяти патентов на изобретения. Область научных интересов — анализ и синтез сложных систем на множестве состояний функционирования, энерго- и ресурсосбережение и др.
Эл. адрес: crems@crems.jesby.tstu.ru

**НЕНАШЕВ
Вадим
Александрович**

Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 2012 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника». В 2017 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 22 научных публикаций. Область научных интересов — компьютерное моделирование, системы навигации и радиолокации, статистический анализ, электродинамика.
Эл. адрес: granat89@mail.ru

**ПЕРЕВАРЮХА
Андрей
Юрьевич**



Старший научный сотрудник лаборатории прикладной информатики Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

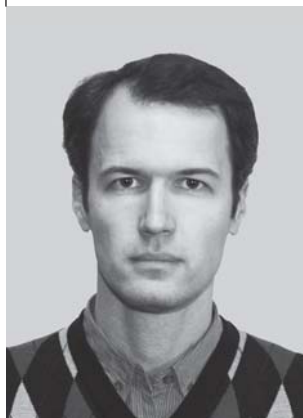
В 2002 году окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 50 научных публикаций.

Область научных интересов — моделирование нелинейных явлений в биологических процессах, гибридные системы, сценарное моделирование в теории управления.

Эл. адрес: temp_elf@mail.ru

**ПОНОМАРЕВ
Андрей
Васильевич**



Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2003 году окончил Тюменский государственный нефтегазовый университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 38 научных публикаций.

Область научных интересов — крауд-вычисления и краудсорсинг, рекомендующие системы, машинное обучение, системы поддержки принятия решений.

Эл. адрес: ponomarev@ias.spb.su

**ПУТИН
Евгений
Олегович**



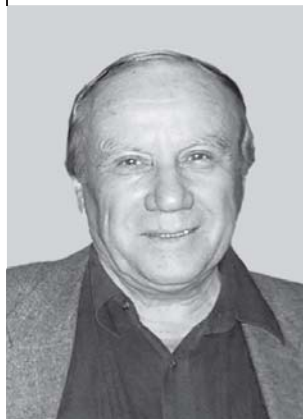
Аспирант кафедры компьютерных технологий университета ИТМО, Санкт-Петербург.

В 2014 году окончил математикомеханический факультет Санкт-Петербургского государственного университета по специальности «Математик-программист». Является автором более десяти научных публикаций.

Область научных интересов — машинное обучение, искусственные нейронные сети, биоинформатика, хемоинформатика.

Эл. адрес: putin.evgeny@gmail.com

**РЕШЕТНИКОВ
Юрий
Степанович**



Профессор, ведущий научный сотрудник Института проблем экологии и эволюции им. А. Н. Северцова РАН, Москва.

В 1960 году окончил Московский государственный университет по специальности «Ихтиология».

В 1980 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора биологических наук. Является автором 344 научных публикаций, включая 13 книг и монографий.

Область научных интересов — экология и систематика лососеобразных рыб, трансформации пресноводных экосистем, роль видов-интродуцентов в экосистемах, применение математических методов в биологии.

Эл. адрес: ysreshetnikov@gmail.com

**РУННОВА
Анастасия
Евгеньевна**



Докторант, доцент кафедры автоматизации, управления, механики Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А., старший научный сотрудник Научно-образовательного центра «Нелинейная динамика сложных систем».

В 2005 году окончила Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Физика».

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

**СЕРГЕЕВ
Александр
Михайлович**



Старший преподаватель кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2004 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

Является автором 32 научных публикаций.

Область научных интересов — численные методы, теория вычислительных процессов, проектирование специализированных процессоров.

Эл. адрес: asklab@mail.ru

**ТРОФИМОВ
Андрей
Николаевич**



Доцент кафедры инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1976 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления».

В 1982 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 41 научной публикации и шести патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория передачи дискретных сообщений, теория информации, теория кодирования.

Эл. адрес:
andrei.trofimov@vu.spb.ru

**ТЮРИН
Илья
Вячеславович**



Доцент кафедры конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем Тамбовского государственного технического университета.

В 2001 году окончил Тамбовский государственный технический университет по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — проблемы теории управления техническими системами, возобновляемые источники и системы прямого преобразования энергии, энерго- и ресурсосберегающие, экологически чистые химико-технологические процессы, моделирование технических систем.

Эл. адрес: tyrinilja@yandex.ru

**ТЮРЛИКОВ
Андрей
Михайлович**



Профессор, директор Института информационных систем и защиты информации, заведующий кафедрой инфокоммуникационных систем Санкт-Петербургского университета аэрокосмического приборостроения.

В 1980 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Информационные системы управления».

В 1981 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 80 научных публикаций.

Область научных интересов — многообонентные системы связи, системы дистанционного обучения, протоколы передачи данных в реальном масштабе времени, алгоритмы сжатия видеoinформации.

Эл. адрес: turlikov@vu.spb.ru

**ХАРЧЕНКО
Александр
Андреевич**



Аспирант кафедры автоматизации, управления, мехатроники Саратовского государственного технического университета им. Гагарина Ю. А.

В 2014 году окончил Саратовский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского по специальности «Радиофизика и электроника».

Является автором пяти научных публикаций и программы для ЭВМ, имеющей государственную регистрацию.

Область научных интересов — нелинейная динамика, сложные сети, математическое моделирование.

Эл. адрес: ainadil@mail.ru

**ШАЛЫТО
Анатолий
Абрамович**



Заведующий кафедрой технологий программирования Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики, ученый секретарь НПО «Аврора».

В 1971 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 250 научных публикаций, трех монографий и 70 изобретений.

Область научных интересов — системы логического управления, автоматное программирование.

Эл. адрес: shalyto@mail.ifmo.ru

**ШАМКИН
Валерий
Николаевич**



Профессор кафедры конструирования радиоэлектронных и микропроцессорных систем Тамбовского государственного технического университета, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1972 году окончил Тамбовский институт химического машиностроения по специальности «Автоматизация и комплексная механизация химико-технологических процессов».

В 1997 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 160 научных публикаций и трех авторских свидетельств.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимизация режимов и управление сложными технологическими процессами, дестабилизационная оптимизация и др.

Эл. адрес: shamkin-v@mail.ru

ШЕВЧЕНКО
Александр
Александрович



Младший научный сотрудник Военной академии связи им. Маршала Советского Союза С. М. Буденного, Санкт-Петербург.

В 2015 году окончил Рязанский государственный радиотехнический университет по специальности «Компьютерная безопасность».

Является автором 17 научных публикаций, двух программ для ЭВМ, зарегистрированных в ФИПС, и одного патента на изобретение.

Область научных интересов — компьютерная безопасность, информационная безопасность, способы контроля уязвимостей и управления безопасностью информационно-вычислительных, информационно-телекоммуникационных и распределенных информационных сетей.

Эл. адрес:
alex_pavel1991@mail.ru

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

Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 6000 рублей, для подписчиков стран СНГ — 6600 рублей, включая НДС 18%, таможенные и почтовые расходы.

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

«Роспечать»: № 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, 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, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: 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,

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>

«BTL» (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).