

ISSN 1684-8853 (print); ISSN 2541-8610 (online)

# ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

**2(105)/2020**

2(105)/2020

PEER REVIEWED JOURNAL

# INFORMATSIONNO- UPRAVLIAIUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

**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  
Dr. Sc., 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, Innopolis, 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

A. Myllari  
PhD, Professor, Grenada, West Indies

Y. Podoplyokin  
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, Russia

K. Samouylov  
Dr. Sc., Professor, Moscow, Russia

J. Seberry  
PhD, Professor, Wollongong, Australia

A. Shalyto  
Dr. Sc., Professor, Saint-Petersburg, 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. Sutikho  
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. Umnitsina**Layout and composition:** Y. Umnitsina**Contact information**The Editorial and Publishing Center, SUAI  
67, B. Morskaia, 190000, St. Petersburg, Russia  
Website: <http://i-us.ru/en>, e-mail: [i-us.spb@gmail.com](mailto:i-us.spb@gmail.com)  
Tel.: +7 - 812 494 70 02**THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS****Balonin N. A., Sergeev M. B., Vostricov A. A.** Prime Fermat numbers and maximum determinant matrix conjecture 2**INFORMATION PROCESSING AND CONTROL****Gorbunova M. V., Ometov A. Y., Komarov M. M., Bezzateev S. V.** Survey of distributed ledger technology integration challenges 10**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Geidarov P. Sh.** Algorithm for calculating synapse weights of the first layer of a neural network on the base of metric recognition methods. Part 1 20**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Shepeta A. P., Nenashev V. A.** Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars 31**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM****Aleshkin A. P., Vladimirov V. V., Nevzorov V. I., Savochkin P. V.** Method for increasing the resolution and accuracy of radar angular measurements based on sequential spatio-temporal processing of received signals 37**Demyanov V. V., Khalimanov D. S., Fedorov M. E., Imarova O. B.** Evaluating the quality of WAAS availability control algorithm under geomagnetic storm conditions 46**SYSTEM ANALYSIS****Smirnov A. V., Levashova T. V., Ponomarev A. V.** Decision support based on human-machine collective intelligence: state-of-the-art and conceptual model 60**CONTROL IN MEDICAL AND BIOLOGICAL SYSTEMS****Kirillov A. N., Danilova I. V.** Utility function in the foraging problem with imperfect information 71**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS** 78

2(105)/2020

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,  
д-р 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. Кристоделу,  
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  
А. А. Мюллери,  
д-р наук, профессор, Гренада, Вест-Индия  
Ю. Ф. Подоплёкин,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
К. Е. Самуйлов,  
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ  
Д. Себерри,  
д-р наук, проф., Волонгонг, Австралия  
А. В. Смирнов,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
Т. Сутиркоу,  
д-р наук, доцент, Джокьякарта, Индонезия  
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. Хищенко,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, РФ  
А. Е. Храмов,  
д-р физ.-мат. наук, Иннополис, РФ  
А. А. Шальто,  
д-р техн. наук, проф., Санкт-Петербург, 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  
З. 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****Balotin N. A., Sergeev M. B., Vostricov A. A.** Prime Fermat numbers and maximum determinant matrix conjecture 2**ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ****Горбунова М. В., Омётов А. Я., Комаров М. М., Беззатеев С. В.** Обзор проблем внедрения технологии распределенного реестра 10**ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ****Гейдаров П. Ш.** Алгоритм вычисления значений весов синапсов первого слоя нейронной сети на основе метрических методов распознавания. Часть 1 20**МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ****Shepeta A. P., Nenashev V. A.** Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars 31**ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ****Алёшкин А. П., Владимиров В. В., Невзоров В. И., Савочкин П. В.** Метод повышения разрешающей способности и точности радиолокационных угловых измерений на основе последовательной пространственно-временной обработки принимаемых сигналов 37**Демьянов В. В., Халиманов Д. С., Федоров М. Э., Имарова О. Б.** Оценка качества алгоритма контроля доступности WAAS в условиях умеренной геомагнитной бури 46**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ****Смирнов А. В., Левашова Т. В., Пономарев А. В.** Поддержка принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта: современное состояние и концептуальная модель 60**УПРАВЛЕНИЕ В МЕДИЦИНЕ И БИОЛОГИИ****Kirillov A. N., Danilova I. V.** Utility function in the foraging problem with imperfect information 71**СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ** 78

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 02.03.20. Подписано в печать 20.04.20. Формат 60×84<sup>1/8</sup>.  
Гарнитура SchoolBookC. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 9,7. Уч.-изд. л. 13,2. Тираж 1000 экз (1-й завод 50 экз.). Заказ № 91.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диалогитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.  
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

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, 2020

# Prime Fermat numbers and maximum determinant matrix conjecture

N. A. Balonin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0001-7338-4920](https://orcid.org/0000-0001-7338-4920), [korbendfs@mail.ru](mailto:korbendfs@mail.ru)

M. B. Sergeev<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0002-3845-9277](https://orcid.org/0000-0002-3845-9277)

A. A. Vostricov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-8513-368](https://orcid.org/0000-0002-8513-368)

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

**Purpose:** Solution to the problem of optimizing the determinants of matrices with a modulus of entries  $< 1$ . Developing a theory of such matrices based on preliminary research results. **Methods:** Extreme solutions (in terms of the determinant) are found by minimizing the absolute values of orthogonal matrix elements, and their subsequent classification. **Results:** Matrices of orders equal to prime Fermat numbers have been found. They are special, as their absolute determinant maximums can be reached on a simple structure. We provide a precise evaluation of the determinant maximum for these matrices and formulate a conjecture about it. We discuss the close relation between the solutions of extremal problems with the limitation on the matrix column orthogonality and without it. It has been shown that relative maximums of orthogonality-limited matrix determinants correspond to absolute maximums of orthogonality-unlimited matrix determinants. We also discuss the ways to build extremal matrix families for the orders equal to Mersenne numbers. **Practical relevance:** Maximum determinant matrices are used extensively in the problems of error-free coding, compression and masking of video information. Programs for maximum determinant matrix search and a library of constructed matrices are used in the mathematical network "mathscinet.ru" along with executable online algorithms.

**Keywords** – determinant, determinant maximum, quasi-orthogonal matrices, Hadamard matrices, Mersenne matrices, Fermat matrices, Cretan matrices.

For citation: Balonin N. A., Sergeev M. B., Vostricov A. A. Prime Fermat numbers and maximum determinant matrix conjecture. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-2-9

## Introduction

Determinant optimization of matrices with modulus of entries  $\leq 1$  is a very difficult problem [1–4] without an universal algorithm for its solution. The first computer experiments were started in 1962 [5]; the further evolution of this subject has been discussed in [6–9] with algorithmic backgrounds [10–13], specific orders [14, 15] and websites [16, 17].

There are methods based on the interrelation between optimal solutions for various matrix classes [18]. For example, the determinant optimization method for orthogonal column matrices proposed in our paper [19] allows us to find, in particular, non-orthogonal matrices with an absolute determinant maximum (D-optimal matrices or D-matrices, in short) [20–23]. The key point here is that local and absolute extremums of determinants for these matrix types are interrelated [24].

Our vast experience in matrix determinant optimization allows us to make certain conclusions which lead us to a conjecture about maximum determinant matrices of orders equal to prime Fermat numbers.

## Maximum determinant and relative maximum on the structure

The common and well known fact of the maximum determinant problem theory consists in the

statement, that D-matrices have to have  $\{1, -1\}$  entries. Much less known orthogonal by string (columns) matrices, order  $n$ , having maximal value of determinant.

Let  $\mathbf{M}$  be a matrix with modulus of entries  $\leq 1$  and  $M$  be a class of such matrices.

**Theorem 1** (Hadamard inequality [25]). Determinant of  $\mathbf{M}$  is bounded by  $n^{n/2}$  following the inequality

$$\det(\mathbf{M}) \leq \left( \prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^n m_{ij}^2 \right)^{1/2} \leq n^{n/2}.$$

Hadamard matrices belong to the class of square quasi-orthogonal matrices defined by equality  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T = \omega\mathbf{I}$ , modulus of entries  $\leq 1$ ,  $\mathbf{I}$  identity matrix, pure orthogonal matrices satisfy  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T = \mathbf{I}$ . For all quasi-orthogonal matrices we can establish following theorem.

**Theorem 2.** Determinant of quasi-orthogonal matrix  $|\det(\mathbf{M})| = \omega^{n/2}$ .

The prove follows directly from definition:  $\det(\mathbf{M}\mathbf{M}^T) = \det(\mathbf{M})^2$ ,  $\det(\omega\mathbf{I}) = \omega^n$ , so value of determinant is bounded by shown power of coefficient  $\omega$ .

For Hadamard matrices  $\mathbf{H}$ ,  $\omega = n$ , for conference matrices (C-matrices)  $\mathbf{C}\mathbf{C}^T = (n-1)\mathbf{I}$ ,  $\det(\mathbf{C}) = (n-1)^{n/2}$ . Hadamard matrices, can exists for orders 1, 2,  $4t$  (due conjecture of Hadamard they exist for every  $4t$ ). Let us note, that matrices of maximum determi-

nant, taken for even orders  $4t + 2$ , can exceed value  $(n - 1)^{n/2}$ , it is a price for the strings (columns) pair wise orthogonal property  $\mathbf{C}\mathbf{C}^T = (n - 1)\mathbf{I}$ .

So we can name conference matrices as matrices of local maximum determinant, i. e. relative (non absolute) maximum achieved on class  $M$  for square equality  $\mathbf{C}\mathbf{C}^T - (n - 1)\mathbf{I} = \mathbf{0}$ .

*Definition 1.* Define the subclass of matrices

$$C_0 = \{\mathbf{M} \mid \mathbf{M} = \{M_{ij}\}, i, j = 1, \dots, n; \\ \text{for } i \neq j \mid M_{ij} \mid \leq 1, M_{ii} = 0\}.$$

For the class of matrices defined above, we state the following simple statement based on Hadamard approach. Let

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & M_{12} & \dots & M_{1n} \\ M_{21} & 0 & \dots & M_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{n1} & M_{n2} & \dots & 0 \end{pmatrix},$$

where  $\mathbf{M} \in C_0$ . Then the determinant of  $\mathbf{M}$  is maximized when  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T$  is a *scaled* identity matrix  $(n - 1)\mathbf{I}$ , and the bound for the maximum value of determinant is  $(n - 1)^{n/2}$ , i. e. conference matrices play a role of Hadamard matrices for orders  $4t + 2$  where  $\max_{\mathbf{M} \in C_0} |\mathbf{M}| = |\mathbf{C}|$ . In the difference to Hadamard

matrices, conference matrices can exists for orders 1, 2,  $4t$  and for orders  $4t + 2$  (if  $4t + 1$  is a sum two squares  $a^2 + b^2$ ). There is no conference matrices of orders 22, 34, 58, 70, 78, 94 (sequence A000952 of OEIS). Conference matrices with orders 66, 86 are unknown today.

**Example.** Suppose

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0 & M_{12} & M_{13} \\ M_{21} & 0 & M_{23} \\ M_{31} & M_{32} & 0 \end{pmatrix},$$

where  $M_{12}, M_{13}$ , and so on are real numbers such that  $|M_{ij}| \leq 1$  for all  $i \neq j$ . Thus  $\mathbf{M} \in C_0$ , and  $|\det(\mathbf{M})| = |M_{13}M_{21}M_{32} + M_{31}M_{12}M_{23}| \leq |M_{13}M_{21}M_{32}| + |M_{31}M_{12}M_{23}| \leq 2$ . For any matrix of order 3 fixed structure gives estimation  $(n - 1)^{n/2} = 2\sqrt{2}$ , so there is no conference matrix of order 3 (and any other odd order). With it, if conference matrix exists, for every  $n = 4t + 2$  it gives maximum determinant on the fixed structure, the same as Hadamard matrix — the structure of resolvable for all orders matrix is a non trivial subject of research (two negacirculant matrix, two border and two circulant matrix and so on).

If for Hadamard matrices the fixed structure is not defined, for conference matrices, historically, it was taken the diagonal structure  $C_0$ . Due conjec-

ture of Seberry there are skew Hadamard matrices  $(\mathbf{H} + \mathbf{H}^T = 2\mathbf{I})$  for every  $n = 4t$ , conference matrices follows them on orders  $4t$  due  $\mathbf{C} = \mathbf{H} - \mathbf{I}$  for Hadamard matrices with positive diagonal. Maximum of determinant for the fixed structure, as we see, belongs to the conference matrices. We can try to generalize class  $C_0$  by class of any quasi-orthogonal matrices (with no 0), but this estimation is enough for our aims to comment conference matrix property to be matrix of relative maximum determinant.

The following question of theory of matrices consists in the search of odd order matrices including matrices of local maximum determinant (having no fixed structure, but being not absolute maximum) defined by the square equality  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T - \omega\mathbf{I} = \mathbf{0}$ .

For the latest task we can prepare an optimization procedure, that starts from some beginning  $\mathbf{M}_0$  and tries to make determinant bigger for every new step, giving a chain of matrices  $\mathbf{M}_k$ :  $\det(\mathbf{M}_k) > \det(\mathbf{M}_{k-1})$ . To achieve this result we take in consideration so called  $m$ -norm of quasi-orthogonal matrix (it is not usual norm used for matrices).

*Definition 2.*  $m$ -norm of orthogonal matrix  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{Q}\mathbf{Q}^T = \mathbf{I}$ ,  $\mathbf{Q} = \{Q_{ij}\}$ , is  $m = \max_{i,j} |Q_{ij}|$ .

Quasi-orthogonal matrices  $\mathbf{H}$ ,  $\mathbf{C}$  and other ones defined by  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T = \omega\mathbf{I}$ , modulus of entries  $\leq 1$ , could be found by the corresponding orthogonal matrices divided by  $m$ -norm, so the maximum of their entries becoming be equal 1.

*Definition 3.*  $m$ -norm of quasi-orthogonal matrix  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T = \omega\mathbf{I}$ , is  $m$ -norm of corresponding orthogonal matrix  $\mathbf{Q} = m\mathbf{M}$ .

**Theorem 3.** Let be constructed a chain of  $\mathbf{Q}_k$ ,  $|\mathbf{Q}_k| = 1$ ,  $m_k \leq m_{k-1}$  (their  $m$ -norms), so it follows  $|\mathbf{M}_k| \rightarrow \max_{\mathbf{M}\mathbf{M}^T - \omega\mathbf{I} = \mathbf{0}} \dots$ .

**Lemma 1.** Let  $\mathbf{M}$  be quasi-orthogonal matrix, order  $n$ , with  $m$ -norma  $m$ , then  $|\mathbf{M}| = \frac{1}{m^n}$ .

It follows from  $|\mathbf{Q}| = m^n |\mathbf{M}| = 1$ . The tasks of determinant optimization, it is *maxmin*-task, when we minimize the maximal entry of orthogonal matrix  $\mathbf{Q}_k$ :  $m_k \leq m_{k-1}$ .

To realize this process, due Lemma 1, we choose initial condition  $\mathbf{M}_0$  with  $m$ -norm  $m_0$ . Let us bound modulus of entries of corresponding matrix  $\mathbf{Q}_0$  by value  $pm_0$ , where  $p \leq 1$ . Due this action matrix will lose property to be pair wise strings (columns) orthogonal, but we can restore it by a standard Gramm — Schmidt procedure giving us the next matrix  $\mathbf{Q}_1$  saving general property  $m_1 \leq m_0$  for enough little shift  $\delta$ ,  $p = 1 - \delta$ . As it is seen, this algorithm leads to the extreme point satisfying the equality  $\mathbf{M}\mathbf{M}^T - \omega\mathbf{I} = \mathbf{0}$ .

For the quasi-orthogonal matrices of low order, 2 or 3, we can build determinant as a function of

one or two arguments, the latest one drawn on the Fig. 1.

For the quasi-orthogonal matrices of bigger orders algorithm based on the theorem 3 gives an effective multi-parametric optimization returning Hadamard or conference matrices which were build historically through the very different approach. Hadamard observed it as solution of square equation  $\mathbf{H}\mathbf{H}^T - n\mathbf{I} = \mathbf{0}$ . This approach is good, but it brings no guaranty that integer solution exists for all orders equal to  $4t$ .

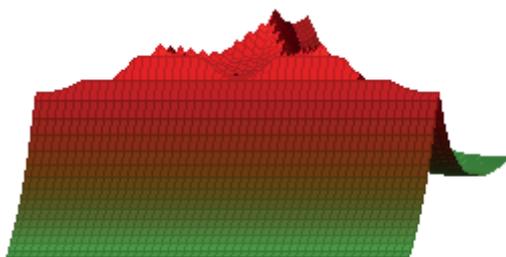
The second idea, that Hadamard matrices have biggest determinant *was forgotten* as a practical approach to calculate matrices due computations that were impossible for his time (but not today). This idea is interesting with many points of view as a bridge between solutions in integer and real numbers: theorem 3 makes Hadamard matrices a part of iteration process with clean prospective accordingly his famous conjecture by means of not combinatorial mathematics.

Theorem style review of determinant bounds known for odd orders well done by the work [26] having numerous details. Main problem of these functional bounds, they go through rational and irrational points, while rational matrices have rational determinant. So it gives some sharp bounds for narrow classes of observed matrices. Remember, that theory of maximum determinant matrices with 1, -1 entries cannot resolve just order 22 to our time. "Barba" matrices exist as a fact of abstract theory for many "resolved" points. It means, they are described by bound partially. Algorithm (to build matrices, if it works) has combinatorial character and cannot be used effectively for big orders.

We take other matrices for irrational values of bound. In such case these theorems lose their sense and cannot be used to describe the result given by "special points".

There are rare orders equal to prime Fermat numbers (today known five ones).

In different to previous case there is algorithm that doesn't work outside described area. But for given points it gives result no difference how big is the size of matrix — the latest prime Fermat numbers are very big. Matrix, order 17, can be con-



■ Fig. 1. Extremal points of determinant

structed on the base of so called regular Hadamard matrix, order 16, adding the border. The same step is impossible for other regular structures, for example, it doesn't work with order 64.

The tiny details of numerical procedure from theorem 3 are discussed in [18]. Naturally, we have the global (absolute) and local maximum with given square bound. Algorithm was realized and maximum determinant quasi-orthogonal matrices were classified in the set of papers [18, 24]. Their property consists in the number of entry values ( $\{1, -1\}$  observed for even orders  $4t$ , and  $\{0, 1, -1\}$  observed for  $2t$ ) for odd orders it arises and gives a set of values  $\{a, b, c, \dots\}$ .

The local maximum determinant matrices appeared to be preferable due their simple structure and low number of entries  $\{1, -b\}$ . As a matter of fact, Hadamard matrices have these extreme structures as circulant or two-circulant blocks. It prolongates the other way to construct them. Non orthogonal extreme matrices of odd orders have two entries  $\{1, -1\}$ . The correspondence between Hadamard matrices and local maximum determinant matrices is continued on this case by change  $-b$  on  $-1$ .

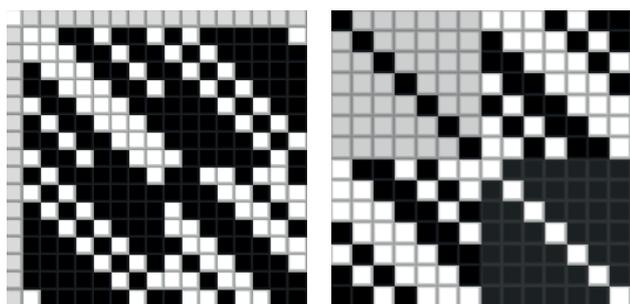
### Numerical sequences and number theory

Hadamard was the first one to consider a numerical sequence with a determinant maximum [25]. He showed that for a set of matrices with entries  $\{1, -1\}$  the determinant is maximum, for example, in  $\mathbf{H}$  matrices (Hadamard matrices) of orders 1, 2 and  $n = 4t$ ,  $t$  an integer, for which  $\mathbf{H}^T\mathbf{H} = n\mathbf{I}$ ,  $\mathbf{I} = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$ .

Columns (and rows) of  $\{1, -1\}$  matrices which have a maximal determinant are strictly orthogonal; such matrices are called Hadamard matrices. Thereby, the absolute maximum determinants of matrices with orthogonal columns and those of  $\mathbf{D}$ -matrices are the same. This statement is not true for other orders, but the difference of absolute maximum determinant for matrices of the two above-mentioned sets is very small. The absolute maximum determinant on the class of non-orthogonal matrices is related to the local extremum (not the absolute one) on the class of quasi-orthogonal matrices.

Let us consider, for example, suboptimal (without an absolute determinant maximum on their set) quasi-orthogonal matrices of orders 17 and 14 shown on Fig. 2. The variety of matrix entry values is depicted by shades of gray.

Rounding of the entries of these matrices to integers  $\{1, -1\}$  produces matrices which are not orthogonal by columns, but *strictly optimal* by determinants. The rule, demonstrated on the pictures, is a general one. The determinant maximums of matrices which



■ Fig. 2. Suboptimal quasi-orthogonal matrices of orders 17 and 14

are non-orthogonal or orthogonal by columns (quasi-orthogonal) usually correspond to each other.

The structures of optimal matrices are the same, and the entry values described by parametric dependencies allow us to obtain matrices of both types. Maximum determinant matrices can be obtained by *rounding*. It gives entries 1 and -1.

However, there is a shift in strict optimums: the absolute determinant maximum in non-orthogonal matrices corresponds to a local optimum on the quasi-orthogonal matrix class which is not the biggest one. The opposite is also true. Extreme quasi-orthogonal matrices with a small number of entries are called *Cretan* (see more precise definitions in [24, 27]). The interrelation of extremal problems allows us to use the same numerical method to find both Cretan and maximum determinant matrices [20–23]. However, this brings up a question: on which orders should we seek for a family of matrices extreme by their determinants?

Apart from Sylvester orders  $n = 2^k$ ,  $k$  an integer, Mersenne numbers  $n = 2^k - 1$  embedded in a sequence of numbers  $4t - 1$  are known. Fermat numbers are embedded in a  $4u^2 + 1$  sequence which, in turn, is embedded in a  $4t + 1$  sequence.

Quasi-orthogonal matrices of odd orders  $n = 2^k - 1$  and  $n = 2^{2^k} + 1$  which have a *local maximum* of determinant are called Mersenne and Fermat matrices [28, 29] respectively. The definition of Mersenne matrices can be expanded to orders  $4t - 1$ . The definition of Fermat matrices can be expanded to “quadratic” orders  $4u^2 + 1$ . These families are discussed more specifically in [18, 24, 27].

Orders of Mersenne and Fermat [18, 28] matrices with entry values rounded to integer (rounded matrices, for short) are neighboring with the orders of Hadamard matrices which have absolute determinant maximums. Determinants of rounded Mersenne matrices of small orders are maximal only for a few first prime numbers of their sequence.

This sequence of extreme matrices is regressing by the relative (with reference to the global maxi-

imum) values of the determinant. Rounded Fermat matrices of orders equal to *the first three* Fermat prime numbers are different, having strictly maximal determinants. Fermat prime numbers are a rapidly increasing sequence; therefore checking the matrices of all orders  $n = 2^{2^k} + 1$  is numerically impossible. However, their difference from the first matrices with Mersenne prime numbers as orders is obvious. It allows us to assume that a sequence of Fermat matrices is not regressing, and its determinant is always a global maximum.

The two mentioned sets of matrices neighboring with Hadamard matrices are similar, but not identical in relation to the determinant maximums. Let us discuss some important details.

### Guido Barba’s inequality

The odd orders for which the upper formally attainable bound of determinants of maximum determinant matrices is known, are obtained from the Guido Barba’s inequality [1, 26].

**Theorem 4.** It states that matrices  $\mathbf{A}$  of orders  $n$  with modulus of entries  $\leq 1$  satisfy the inequality:  $|\det(\mathbf{A})|^2 \leq \det((n - 1)\mathbf{I} + \mathbf{J}) = (n - 1)^{n-1}(2n - 1)$ , where  $\mathbf{I} = \text{diag}(1, 1, \dots, 1)$ , and  $\mathbf{J}$  is a unity matrix. The maximum can be attained on orders for which  $2n - 1$  is a square.

This necessary condition for extreme solutions follows the fact that optimal matrix entries are integers 1 and -1. Note that the Barba’s bound is attainable for orders  $n = a^2 + b^2$ ,  $b = a + 1$  [1] nested in the same sequence  $4t + 1$  that the Fermat number sequence is embedded.

For Fermat numbers different from 5,  $2n - 1$  is not a square, which means that the Barba’s bound is not attainable. It is an optimistic determinant estimation, certainly not pragmatic, because it is irrational.

The non-attainability of the bound is not critical.

The orders of matrices described by certainly attainable integer values of the bound are 5, 13, 25, 41, 61, 85, 113..., and the structures of every second one of these matrices of orders 13, 41, 85, ... are significantly more complex than those of the others. There is no algorithm to construct these matrices: the existence of matrices for the orders we have listed is theoretically possible, but not all of them are known [1, 5, 17].

Matrices of orders equal to Mersenne numbers and Fermat matrices of prime orders  $F_k = 3, 5, 17, 257, 65\ 537\dots$  have an advantage over all other matrices, because they have an algorithm for their construction, which is a modified Sylvester algorithm [28, 29] producing matrices of a local determinant maximum [18, 24] and, as we believe, maximum

determinant matrices for orders equal to prime Fermat numbers.

At the same time, an irrational Mersenne matrix, after its irrational elements are rounded to integer values, becomes equal to the  $\{1, -1\}$ -core of a normalized Hadamard matrix, and the core of a Fermat matrix after rounding its irrational elements to  $\{1, -1\}$  becomes equal to a regular Hadamard matrix of order  $4u^2$ . Thus, matrices of non-strict determinant optimums of orders equal to Mersenne numbers are findable and can be used for indirect finding of Hadamard matrices strictly optimal by their determinants.

### Maximum determinant matrix conjecture

Based on the preliminary study, we identified that:

- skew-symmetric circulant Mersenne matrices correspond to prime Mersenne numbers [27, 28];
- prime numbers and the symmetry types of circulant optimal and sub-optimal structures are synonyms of a certain hyperquality of such different mathematical objects as numbers and matrices.

The first person (if not the legendary Pythagoras) who noticed the correlation between objects from different areas of mathematics was Karl Friedrich Gauss. In 1796, he discovered a relation between prime numbers and geometric figures, after he inscribed a regular heptadecagon into a circle.

Later, Gauss formulated a generic case about the relation between the number of sides of a regular polygon inscribed in a circle, and the Fermat prime numbers.

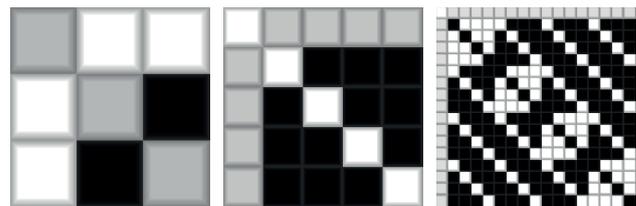
The peculiarity of Fermat prime numbers allows us to formulate a conjecture about the relation between matrix orders and the maximums of their determinants.

*Generalised Gauss conjecture.* Quasi-orthogonal local maximum determinant matrices [24, 27] of orders equal to prime Fermat prime numbers  $F_k = 3, 5, 17, 257, 65\ 537, \dots$  and only they for all matrices of orders within a sequence which nests Fermat numbers, when rounded to  $\{1, -1\}$ , give global maximum determinant matrices.

First three Fermat matrices  $\mathbf{F} = \begin{pmatrix} a & s^T \\ s & \mathbf{H} \end{pmatrix}$  of or-

ders 3, 5 and 17 are based on regular Hadamard matrices  $\mathbf{H}$  with entries changed to  $\{a, -b\}$  to get  $F$  orthogonal by rows (columns) [18, 24], the latter of which is shown on Fig. 3, can be rounded to  $\{a = 1, b = 1, \text{ entries of } s \text{ are } 1\}$  and checked to validate the conjecture. It was noted earlier that  $2n - 1$  is not a square for Fermat numbers different from 5.

The Barba's bound  $B = (n - 1)^{(n-1)/2}(2n - 1)^{1/2}$  is an irrational and unattainable number for Fermat matrices rounded by entries (integer). However, this is just an optimistic upper-bound estimate of



■ Fig. 3. Quasi-orthogonal Fermat matrices

the determinant, an abstract bound deduced in the work [1] which may or may not be attained by an integer matrix.

In case this optimistic irrational bound  $B$  is unattainable, the pragmatic estimate differs from it by an irrational scale multiplier, multiplying by which makes the real bound integer-valued and attainable. Since we know the Fermat matrix structure, and the irrational multiplier of the bound can be found, the determinant for a Fermat matrix of order  $n = F_k$  should be estimated as  $F_{k-1}/(2F_k - 1)^{1/2} \times B$ .

As noted above,  $F_{k-1}/(2F_k - 1)^{1/2}$  is an irrational number, in the general case.

It gives a relative (as compared to the bound  $B$ ) determinant value described by the following formulae:  $|\det(\mathbf{A})| = (n - 1)^{(n-1)/2}(2n - 1)^{1/2}F_{k-1}/(2n - 1)^{1/2} = (n - 1)^{(n-1)/2}F_{k-1}$ ,  $n = F_k$  the Fermat number. This is an estimate of the attainable value of an integer matrix determinant.

The first Fermat number  $F_0 = 3$  is a starting one, without a preliminary Fermat number, but this matrix, like the matrix of order 5, is known. In this matrix, the  $-1$  entries which are different from 1 are placed on the diagonal.

For order  $F_1 = 5$ , we have an integer determinant correction value equal to 1.

This is an exception: the Fermat matrix determinant attains the Barba's bound and we have  $F_0/(2F_1 - 1)^{1/2} = 3/9^{1/2} = 1$ . The optimal matrix structure matches the starting one (for order 3), so these are two diagonal structures with a simple form.

The first matrix which is different from them is a Fermat matrix of order 17.

For  $F_2 = 17$ , we have  $2F_2 - 1 = 33$ , which is not a square. Its relative (in reference to the Barba's bound) determinant equals  $F_1/(2F_2 - 1)^{1/2} = 5/33^{1/2} = 0.8704\dots$  This irrational number is a scale multiplier which is a correction to the unattainable Barba's bound  $B = 16^8 \times 33^{1/2}$ .

Their product is an integer  $5/33^{1/2} \times B = 5 \times 16^8 = 21\ 474\ 836\ 480$ . This is the determinant for the Fermat matrix of order 17. This estimation is the same as  $327\ 680 \times 2^{16}$  stated on the website [15].

Fermat matrices can be found for orders into which Fermat numbers are nested, like 37, 65, etc. According to the same resource [15], the determinant of a determinant maximum matrix of order

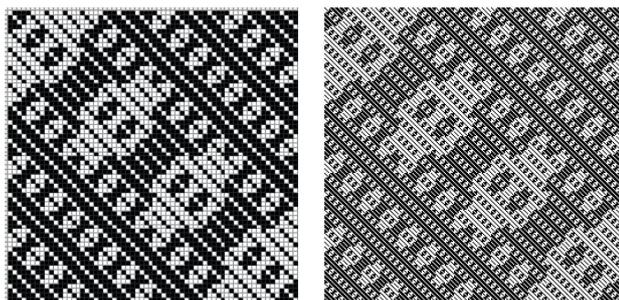
37 is equal to  $72 \times 9^{17} \times 2^{36}$ . The determinant of a determinant maximum matrix of order 65 is estimated as  $148 \times 16^{31} \times 2^{64}$ .

The determinant of the Cretan matrix of order 37 given in [30] and rounded by its entries is approximately equal to  $7.22 \times 10^{28}$ , being less than the estimate  $8.25 \times 10^{28}$  for the integer matrix in the table [17]. For the order 65 (Fig. 4 illustrates it and the next order 257), the determinant of a rounded Cretan matrix is  $5.65 \times 10^{58}$ , whereas the table [15] gives the value of  $5.81 \times 10^{58}$  for an integer matrix of the same order.

The data above confirm the conjecture: a determinant maximum can be attained only for matrices of orders equal to prime Fermat numbers. On orders equal to prime and composite numbers of a sequence, which nests the Fermat sequence (without them), the statement is not true. An interesting analogy is noticeable here: according to the conjecture, and the Gauss's theorem, regular polygons with 37 and 65 angles cannot be completed with just a ruler and a compass.

We believe that the similarity between hyper objects of mathematics and the conditions of the Gauss's theorem can apply, among others, to determinant maximum matrices.

Extremal matrices of orders 257 and 65 537 are very difficult to calculate and check the values of their determinants (to match with determinants of Fermat matrices) due to the large number of possible permutations. However, we have calculated the Fermat matrix of order 257 using a modified Sylvester algorithm [27–29]. The correspondence of symmetries to matrix orders was studied in [31, 32]. The symmetric matrix image is shown in Fig. 4.



■ Fig. 4. Image of Fermat matrices of orders 65 and 257

## References

1. Barba G. Intorno al teorema di Hadamard sui determinanti a valore Massimo. *Giorn. Mat. Battaglini*, 1933, vol. 71, pp. 70–86 (In Italian).
2. Ehlich H. Determinantenabschätzungen für binäre Matrizen. *Math. Z.*, 1964, vol. 83, pp. 123–132 (In German).

According to our conjecture, the Fermat matrix of order 257 has a relative (in reference to the Barba's bound) determinant value  $F_2/(2F_3 - 1)^{1/2} = 0.7505...$  This irrational number corresponds to the integer value of  $|\det(\mathbf{A})| = (n - 1)^{(n-1)/2} F_{k-1} = 256^{128} \times 17$  (approximately  $0.31 \times 10^{310}$ ). This estimation is absent in the table on the website [17] and should be considered new.

## Conclusion

Fermat matrices differ from the matrices of orders where the Barba's bound is attainable, because we know an algorithm of finite complexity for their calculation. Hence, for a rounded Fermat matrix of order 65 537, for instance, you can predict a precise value of its relative determinant 0.7099 (absolute value is  $65\ 536^{32768} \times 257$ ), and build its matrix image. It will be close to the one depicted in Fig. 2, but with significantly more fractal details.

Quasi-orthogonal Fermat matrices tend to Hadamard matrices with a rise in order, and the values of their entries tend to values 1 and  $-1$ . The determinants of rounded Fermat matrices of known prime orders do not go below 0.7 (in reference to the Barba's estimation). These facts allow us to consider the matrices of orders equal to prime Fermat numbers a family of maximum determinant matrices.

## Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the great help of Professor Jennifer Seberry with the translation and discussion of the content of this paper. The authors also wish to sincerely thank Tamara Balonina for converting this paper into a printable format.

## Financial support

This research received funding from the Ministry of Education and Science of Russian Federation according to the project part of the state funding assignment No 2.2200.2017/4.6.

3. Wojtas W. On Hadamard's inequality for the determinants of order non-divisible by 4. *Colloq. Math.*, 1964, vol. 12, pp. 73–83.
4. Osborn J. H. *The Hadamard maximal determinant problem*. Honours thesis. University of Melbourne, 2002. 144 pp. Available at: <http://maths-people.anu.edu.au/~osborn/publications/pubsall.html> (accessed 5 April 2020).

5. Baumert L. D. Golomb S. W., Hall M. Jr. Discovery of an Hadamard matrix of order 92. *Bull. Amer. Math. Soc.*, 1962, vol. 68, pp. 237–238.
6. Brouwer A. E. An infinite series of symmetric designs. *Math. Centrum Amsterdam Report ZW*, 1983, iss. 202/83, 5 p.
7. Cohn J. H. E. On determinants with elements  $\pm 1$ , II. *Bull. London Math. Soc.*, 1989, vol. 21, iss. 1, pp. 36–42. <https://doi.org/10.1112/blms/21.1.36>
8. Seberry J., Xia T., Koukouvinos C., Mitrouli M. The maximal determinant and subdeterminants of  $\pm 1$  matrices. *Linear Algebra and its Applications; Special Issue on the Combinatorial Matrix Theory Conference*, 2003, vol. 373, pp. 297–310. doi:10.1016/S0024-3795(03)00584-6
9. Koukouvinos C., Mitrouli M., Seberry J. Bounds on the maximum determinant for  $(1, -1)$  matrices. *Bull. Inst. Combin. Appl.*, 2000, vol. 29, pp. 39–48.
10. Koukouvinos C., Mitrouli M., Seberry J. An algorithm to find formulae and values of minors of Hadamard matrices. *Linear Algebra Appl.*, 2001, vol. 330 pp. 129–147.
11. Koukouvinos C., Mitrouli M., Seberry J. An algorithm to find formulae and values of minors of Hadamard matrices: II. *Linear Algebra Appl.*, 2003, vol. 371, pp. 111–124.
12. Brent R. P. Finding many D-optimal designs by randomized decomposition and switching. *The Australasian Journal of Combinatorics*, 2013, vol. 55, pp. 15–30.
13. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. Compression of periodic complementary sequences and applications. *Des. Codes Cryptogr.*, 2015, vol. 74, pp. 365–377.
14. Orrick W. P. The maximal  $\{-1, 1\}$ -determinant of order 15. *Metrika*, 2005, vol. 62(2), pp. 195–219.
15. Orrick W. P., Solomon B. Large determinant sign matrices of order  $4k + 1$ . *Discrete Math.*, 2007, vol. 307, pp. 226–236.
16. Seberry J. *The Hadamard Matrices*. Available at: <http://www.uow.edu.au/~jennie> (accessed 16 April 2016).
17. Orrick W. P., Solomon B. *The Hadamard Maximal Determinant Problem*. Available at: <http://indiana.edu/~maxdet> (accessed 16 April 2016).
18. Balonin N. A., Sergeev M. B. Quasi-orthogonal local maximum determinant matrices. *Applied Mathematical Sciences*, 2015, vol. 9, no. 6, pp. 285–293. doi:10.12988/ams.2015.4111000
19. Balonin N. A., Sergeev M. B. Initial approximation matrices in search for generalized weighted matrices of global or local maximum determinant, *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 6, pp. 2–9 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.6.2
20. Kharaghani H. and Orrick W. P. *D-optimal matrices*. In: *Handbook of Combinatorial Designs* (Discrete Mathematics and its Applications). 2nd ed. C. J. Colbourn, J. H. Dinitz (eds). Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL, 2007. Pp. 296–298.
21. Brent R. P., Orrick W. P., Osborn J. H., Zimmermann P. *Maximal Determinants and Saturated D-optimal Designs of Orders 19 and 37 (preprint)*. Available at: <http://arxiv.org/abs/1112.4160> (accessed 5 April 2020).
22. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. New results on D-optimal designs. *J. Combin. Designs*, 2012, vol. 20, pp. 278–289.
23. Djokovic D. Z., Kotsireas I. S. *D-optimal matrices of orders 118, 138, 150, 154 and 174*. In: *Algebraic Design Theory and Hadamard Matrices* (Springer Proceedings in Mathematics & Statistics). Lethbridge, Alberta, Canada, 2014. Pp. 71–282.
24. Balonin N. A., Seberry J. Remarks on extremal and maximum determinant matrices with real entries  $\leq 1$ . *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 5, pp. 2–4.
25. Hadamard J. Résolution d’une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
26. Neubauer M. G., Radcliffe A. J. The maximum determinant of  $\pm 1$  matrices. *Linear Algebra and its Applications*, 1997, vol. 257, pp. 289–306.
27. Balonin N. A., Sergeev M. B. Mersenne and Hadamard matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2016, no. 1, pp. 92–94 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2016.1.2
28. Sergeev A. M. Generalized Mersenne matrices and Balonin’s conjecture. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2014, vol. 48, no. 4, pp. 214–220. doi:10.3103/S0146411614040063
29. Balonin N., Sergeev M. Expansion of the orthogonal basis in video compression. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications*, 2014, vol. 262, pp. 468–474. doi:10.3233/978-1-61499-405-3-468
30. Balonin N. A., Seberry Jennifer, Sergeev M. B. Three level Cretan matrices of order 37. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 2, pp. 2–3. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.2.2
31. Balonin N. A., Djokovic D. Z. Symmetry of two circulant Hadamard matrices and periodic Golay pairs. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 3, pp. 2–16 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2015.3.2
32. Balonin N. A., Djokovic D. Z. Negaperiodic Golay pairs and Hadamard matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 5, pp. 2–17. doi:10.15217/issn1684-8853.2015.5.2

УДК 519.61:511-33

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-2-9

**Простые числа Ферма и гипотеза о матрицах максимального детерминанта**Н. А. Балонин<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-7338-4920](https://orcid.org/0000-0001-7338-4920), [korbendfs@mail.ru](mailto:korbendfs@mail.ru)М. Б. Сергеев<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-3845-9277](https://orcid.org/0000-0002-3845-9277)А. А. Востриков<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-8513-368](https://orcid.org/0000-0002-8513-368)<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Цель:** решение задачи оптимизации определителей матриц с модулем элементов  $\leq 1$ , разработка теории таких матриц на основе предварительных результатов исследования. **Методы:** экстремальные (по определителю матрицы) решения устанавливаются путем минимизации абсолютных значений элементов ортогональных матриц с последующей классификацией. **Результаты:** матрицы порядков, равных простым числам Ферма, являются особыми, так как их абсолютные максимумы детерминантов могут быть достигнуты на простой структуре. Дана точная оценка максимума детерминанта для этих матриц и сформулирована соответствующая гипотеза. Проанализирована тесная связь между решениями экстремальных задач с ограничением на ортогональность столбцов матриц и без него. Показано, что относительные максимумы определителей ортогональных матриц соответствуют абсолютным максимумам определителей матриц, не ограниченных ортогональностью. Рассмотрены способы построения экстремальных матричных семейств для порядков, равных числам Мерсенна. **Практическая значимость:** матрицы максимального детерминанта широко используются в задачах помехозащищенного кодирования, сжатия и маскирования видеoinформации. Программы для поиска матриц максимальной детерминанты и библиотеки построенных матриц используются в математической сети «[mathscinet.ru](http://mathscinet.ru)» вместе с исполняемыми онлайн-алгоритмами.

**Ключевые слова** — определитель, максимальный определитель, квазиортогональные матрицы, матрицы Адамара, матрицы Мерсенна, матрицы Ферма, критские матрицы.

**Для цитирования:** Balonin N. A., Sergeev M. B., Vostricov A. A. Prime Fermat numbers and maximum determinant matrix conjecture. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-2-9

**For citation:** Balonin N. A., Sergeev M. B., Vostricov A. A. Prime Fermat numbers and maximum determinant matrix conjecture. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 2–9. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-2-9

## Обзор проблем внедрения технологии распределенного реестра

М. В. Горбунова<sup>а</sup>, магистрант, [orcid.org/0000-0003-2186-1064](https://orcid.org/0000-0003-2186-1064), [mvgorbunova@edu.hse.ru](mailto:mvgorbunova@edu.hse.ru)  
А. Я. Омётов<sup>б</sup>, научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-3412-1639](https://orcid.org/0000-0003-3412-1639), [aleksandr.ometov@tuni.fi](mailto:aleksandr.ometov@tuni.fi)  
М. М. Комаров<sup>а</sup>, канд. техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-7075-0016](https://orcid.org/0000-0001-7075-0016), [mkomarov@hse.ru](mailto:mkomarov@hse.ru)  
С. В. Беззатеев<sup>в</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-0924-6221](https://orcid.org/0000-0002-0924-6221), [bsv@aanet.ru](mailto:bsv@aanet.ru)  
<sup>а</sup>Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Мясницкая ул., 20, Москва, 101000, РФ

<sup>б</sup>Университет Тампере, Коркеакоулункату 10, Тампере, 33720, Финляндия

<sup>в</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** в современном мире в различных сферах деятельности появляются новые проблемы, решение которых достигается использованием технологии распределенного реестра. Переход к данной технологии обусловлен тем, что централизованные системы уже не могут гарантировать требуемый уровень доступности и надежности, а распределенные общедоступные системы все еще находятся в ранней фазе развития. **Цель:** анализ применимости технологии распределенного реестра в таких отраслях, как экономика, энергетика, финансы, логистика, торговля и интернет вещей. **Результаты:** проведен систематический обзор исследований в области технологии распределенного реестра. Выявлены основные проблемы интеграции технологии в существующие отрасли: отсутствие единой системы для хранения данных, обеспечение надлежащего уровня конфиденциальности информации, интеграция в существующие системы компетенций, сложность взаимодействия распределенных систем с маломощными узлами интернета вещей, отсутствие надлежащих инструментов управления распределенными системами и, без сомнения, масштабируемость сети. Предложены потенциальные пути и технологии, применимые для решения данных проблем.

**Ключевые слова** – распределенный реестр, технология распределенного реестра, блокчейн, интернет вещей.

**Для цитирования:** Горбунова М. В., Омётов А. Я., Комаров М. М., Беззатеев С. В. Обзор проблем внедрения технологии распределенного реестра. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 10–19. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-10-19

**For citation:** Gorbunova M. V., Ometov A. Y., Komarov M. M., Bezzateev S. V. Survey of distributed ledger technology integration challenges. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 10–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-10-19

### Введение

С каждым годом количество новых сервисов и устройств на рынке растет экспоненциально [1]. Все больше функций, привычно ранее выполняемых человеком, он переносит на различные устройства с целью облегчить жизнь и более эффективно использовать время. При этом устройства не только становятся с каждым годом более энерго- и вычислительно мощными, но и получают возможность более эффективно обрабатывать информацию, а также самостоятельно принимать решения. Однако централизованная координация непрерывно растущего числа устройств уже сейчас становится проблематичной [2]. Для обеспечения эффективного взаимодействия сложно масштабируемых систем была предложена технология распределенного реестра.

Технология распределенного реестра (Distributed Ledger Technology — DLT) — это база данных активов, которая может быть распределена по сети, в разных географических зонах или ор-

ганизациях [3]. Используя разнообразные методы, DLT позволяет решать ряд сложных задач в различных отраслях, обеспечивая дополнительный защищенный уровень абстракции для прямого взаимодействия между разнородными системами. Основной компонентой DLT является технология блокчейн, которая, в свою очередь, строится на технологии результата исполнения функций свертки (хеш-цепочек и хеш-деревьев). Главная особенность технологии блокчейн в том, что каждый последующий блок основан на предыдущих, что обеспечивает неизменность всей цепочки блоков. В данной работе приводится сравнительный анализ существующих систем распределенного реестра и значительное внимание уделяется соответствующим проблемам эксплуатации DLT.

В рамках этого обзора рассмотрены перспективы применения DLT в различных сферах деятельности и особенности применения этой технологии, описываются предпосылки возникновения и предлагаются пути решения выявленных проблем.

## Сферы использования DLT

В настоящее время потенциал применения технологии DLT прослеживается практически во всех сферах жизни общества, начиная со здравоохранения и заканчивая сложными информационными системами. В данном разделе обсуждаются наиболее перспективные направления развития этой технологии.

### Интернет вещей

Самой популярной отраслью применения технологии распределенного реестра является интернет вещей (Internet of Things — IoT). Множество проектов были сосредоточены на этой комбинации для решения задач умного города, интеллектуальных сетей, Интернета и децентрализованных приложений, большинство из которых основано на технологии блокчейн. Работа [4] рассматривает взаимодействие технологий IoT и DLT. В этой статье основное внимание уделяется новым и более широким техническим проблемам, связанным с решениями безопасности и работы серверной платформы на основе DLT для устройств и приложений IoT. В работе [5] также рассматриваются методы взаимодействия интернета вещей и распределенного реестра. Авторы сосредоточились на аспектах связи, представляя архитектуру распределенных доверительных сетей на основе DLT, и предложили новую классификацию для упрощения синхронизации DLT в классических сетях. Исследование показало, что беспроводные системы являются серьезной проблемой стабильного функционирования протоколов синхронизации.

Технологии распределенного реестра на основе ориентированного ациклического графа (Directed Acyclic Graph — DAG) также могут применяться в ряде приложений в области IoT [6]. Распределенный реестр должен служить неизменной и необратимой записью транзакций, однако структура DAG является более сложным математическим объектом, чем его аналоги в блокчейне (а именно, позволяет ветвление дерева хешей), и, как следствие, обеспечение целостности данных становится более сложной задачей в противовес скорости работы такой системы.

Интернет вещей также часто связывают с понятием искусственного интеллекта (Artificial Intelligence — AI). Вопрос о возможности сделать AI безопасным для человека в контексте распределенных систем обсуждается в работе [7]. На данный момент не существует никаких доказательств, что полный переход на AI-системы будет приносить пользу людям, а не вредить им или, в худшем случае, не приводить к летальным исходам. В исследовании предлагается ряд компонентов, которые необходимы и достаточны

для обеспечения различных сценариев работы AI без вреда человеку. DLT является неотъемлемой частью этого предложения, например, смарт-контракты необходимы для решения проблемы развития AI, которое будет происходить слишком быстро для обеспечения оперативного вмешательства человека.

### Здравоохранение

Одна из основных проблем медицинской индустрии — отсутствие единой системы для хранения данных [8]. В настоящее время для решения данной задачи применяются облачные централизованные хранилища, которые являются индивидуальными для разных сетей клиник, однако такая тенденция пока не распространяется на систему здравоохранения в целом. Это приводит к тому, что отсутствуют полная история болезни, список поставленных когда-либо диагнозов, сданных анализов, нет возможности отслеживать тенденции в показателях пациента и производить полноценную аналитику.

Существует ряд других проблем, которые рассматривают исследовательские группы по всему миру. В работе [9] предлагается распределенная система обмена данными о здоровье пациентов. Данные генерируются двумя типами устройств IoT — носимыми устройствами и стационарными датчиками. Механизм совместного использования данных обеспечивается с помощью распределенного реестра, основанного на системе под названием Tangle, которая представляет собой DAG. Для обеспечения надежной аутентификации применяется протокол потокового шифрования с маскированием (Masked Authenticated Messaging — MAM). Для обеспечения целостности данных используется дерево хешей Меркла.

Следующий проблемный аспект сферы медицинского обслуживания — это необходимость обеспечивать надежную конфиденциальность данных [10], в частности для защиты врачебной тайны. В большинстве случаев пациент не может иметь полное представление о несанкционированной обработке и передаче его медицинских данных.

В исследовании [11] также представлена система, которая позволяет осуществлять детальный персонифицированный контроль доступа третьей стороны к электронным медицинским картам пациентов, позволяющий однозначно подтвердить факт такого обращения. В ходе исследования был разработан прототип данной системы DLT, в котором приводятся записи о факте обработки информации с использованием смарт-контрактов, разработанных блокчейн-платформой на языке Solidity. На момент написания этого обзора в разработанной авторами [11] системе соответствующие данные были приведены в со-

вместимый с Ethereum байт-код и размещены в реестре.

### Образование

Применение смарт-контракта Solidity позволяет заносить в DLT разнообразные данные, в том числе и профессиональные компетенции, что рассмотрено в работе [12]. В этой статье предложена процедура разработки реестра профессиональных компетенций населения и представлен алгоритм расчета ключевых компонентов индекса образования на основе Ethereum. Кроме того, разработана балльная модель для расчета этих параметров и представлена схема источника смарт-контракта Solidity, который реализует предложенный алгоритм.

Технология блокчейн позволяет создать децентрализованную среду, в которой транзакции и данные не контролируются какой-либо сторонней организацией. Основываясь на данной технологии и системе перевода и накопления кредитов (European Credit Transfer and Accumulation System — ECTS), в работе [13] предлагается создать глобальную кредитную платформу высшего образования под названием EduCTX. На основе одноранговой сети EduCTX будет обрабатывать, контролировать собственные аналогичные ECTS токены, получаемые студентами за пройденные курсы, и управлять. Университеты в данном случае выступают в роли партнеров сети.

Блокчейн можно использовать и в совокупности с другими операционными средами. В работе [14] предложена платформа TEduChain для сбора средств и управления ими студентами, получающими высшее образование. Субъектами платформы являются студенты и спонсоры. Предлагаемая платформа состоит из двух различных операционных сред: традиционной структуры, управляемой реляционной базой данных, и блокчейн-структуры на основе распределенного реестра.

### Цепочки поставок

Популярной нишей DLT является отрасль формирования и отслеживания поставок продуктов питания [15]. Разработанная система позволяет предоставить защищенную с точки зрения конфиденциальности и целостности запись транзакций и связанных метаданных (происхождение, контракты, этапы процесса, изменения среды, микробиологические записи и т. п.) для последующей обработки. Способность отслеживать маршрут движения продуктов питания юридически обязательна для всех участников данной цепочки. Международные стандарты отслеживания пищевых продуктов устанавливаются с помощью совместной программы Продовольственной и сельскохозяйственной организации ООН и Всемирной

организации здравоохранения, а принципы возможного слежения за поставками пищевых продуктов изложены в документе о системах контроля и сертификации импорта и экспорта пищевых продуктов САС/GL 60–2006.

В работе [16] предлагается создать новый протокол под названием «Биометрический блокчейн» (Biometric Blockchain — BBC), в котором биометрические характеристики отдельных лиц явно включены в протокол BBC для однозначной идентификации пользователей системы. Такой протокол может, в частности, удовлетворить растущие потребности в обеспечении логистики продуктов питания, что особенно актуально после недавнего инцидента с неправильно маркированными продуктами питания, который привел к гибели пассажира в самолете [16]. Преимущества использования BBC в логистике продуктов питания очевидны: система позволяет не только определить, являются ли данные или этикетки подлинными, но также четко указать, кто несет ответственность.

### Лицензирование

Следующей сферой деятельности, в которой используются DLT, является лицензирование. В частности, в работе [17] рассматриваются самые современные приложения на основе технологии блокчейн, которые поддерживают лицензирование и распространение интеллектуальной собственности. Сравняются как нетехнические, так и технические критерии приложений. Нетехнические критерии используют для оценки диапазона функций, которые предоставляют приложения, в то время как технические критерии помогают изучить технологию для реализации приложений. Авторами также проанализированы и классифицированы восемь различных платформ в соответствии с выбранными критериями.

В работе [18] большое внимание уделяется мерам обеспечения технической защиты (Trusted Platform Module — TPM), информации об управлении правами (Remote Method Invocation — RMI) и управлению цифровыми правами (Digital Rights Management — DRM) при разработке структуры блокчейн. Кроме того, в рамках работы выделены характеристики технологии блокчейн, которые относятся к авторскому праву, рассмотрены случаи ее использования для частного заказа и разработан интерфейс с правовой защитой DRM.

### Финансы

Технология распределенного реестра может быть внедрена не только в области IoT, здравоохранения и образования, но и в самые крупные отрасли экономики государства, такие как

финансы. В 2018 г. произошел беспрецедентный сдвиг в сторону потенциального принятия инфраструктуры DLT и сделаны первые шаги в сторону признания криптовалют как нового класса активов, управляющих капиталом и инвесторами. Многие авторитетные финансовые посредники, в том числе Fidelity Investments, Ameritrade, JPMorgan Chase и Intercontinental Exchange, осознали, что они не должны оставаться равнодушными к революции DLT XXI века и ее последствиям для всей экономики.

Например, в работе [19] показано, что DLT влияет на традиционную финансовую индустрию, а также рассмотрен ряд возможных путей трансформации финансовых услуг экосистемой DLT. Принятие новой инфраструктуры, основанной на DLT, будет происходить по трем основным направлениям:

- 1) через обслуживание существующей и потенциальной клиентской базы как на розничном, так и на институциональном уровне;
- 2) через улучшение внутренних и внутриотраслевых процессов, которые остаются медленными, дорогими и подверженными ошибкам;
- 3) путем перевода как ликвидных, так и неликвидных активов к виртуальным токенам, создания новых финансовых продуктов и расширения рынка.

В целом вышеуказанные изменения откроют новые возможности для создания богатства в финансовой индустрии.

Авторы работы [20] рассматривают использование DLT для поддержания инфраструктуры рынка ценных бумаг, что обещает решить серьезные проблемы фрагментации и нарушения прав собственности, которые также препятствуют прозрачности рынка.

### Энергетика

К концу 2016 г. около 25 % выработки электроэнергии во всем мире происходило из возобновляемых источников энергии, причем основными источниками энергии были энергия ветра, биоэнергетика и солнечная энергия. Существующие системы могут автоматически регулировать поглощение энергии, интеллектуально реагируя на внешние сигналы. В данном случае DLT может быть использован для передачи данных в реальном времени между множеством участников сети в целях более эффективного использования ресурсов. Предлагаемая система основана на двух ключевых концепциях: управлении передачей электроэнергии и пиринговых сетях (Peer-to-Peer — P2P) посредством DLT. В рамках работы [21] дана оценка потенциала DLT для транзитного обмена энергией на локальных рынках, описана новая инфраструктура управления, основанная на DLT, и предложен новый протокол единой

согласия, который не требует дополнительных энергозатрат.

В работе [22] также освещаются различные концепции и технологии для транзитного обмена электроэнергией с учетом DLT. Авторы заявляют, что традиционные централизованные энергетические системы уже не являются жизнеспособными. С одной стороны, одноранговые энергетические транзакции на основе DLT и установка соответствующих контроллеров на местных энергетических рынках представляют собой, по мнению авторов, наиболее вероятный шаг эволюции будущих интеллектуальных сетей. Данное утверждение подтверждается приведенными пилотными проектами. В рамках этой работы предложена и описана разработанная и реализованная инфраструктура транзакционного управления на основе технологии блокчейн и смарт-контрактов.

Концепция паутины вещей (Web of Things — WoT) является новой вехой концепции IoT, направленной на преодоление барьеров между ограниченными сетевыми средами. В WoT решена проблема совместимости путем установления взаимодействия на уровне приложения. Работа [23] расширяет видение WoT в области децентрализованных интеллектуальных сетей для создания цельной, гибкой и автономной, технически и экономически взаимосвязанной системы, представленной на интегрированной бизнес-платформе распределенных энергетических ресурсов HEILA. В частности, эта работа посвящена системе управления микросетями и демонстрирует ее архитектуру в срезе шаблонов проектирования WoT.

### Основные проблемы внедрения DLT

С любой технологической революцией появляются проблемы адаптации уже сформировавшихся систем к новым процессам. Внедрение DLT также несет в себе ряд потенциальных сложностей, рассмотренных ниже.

#### Масштабируемость

В последние годы многие типы распределенных приложений становятся все более масштабными. Эта тенденция в первую очередь обусловлена количеством пользователей, получающих доступ к таким приложениям. В то время как базовые приложения с тысячами пользователей легко масштабируются, такие приложения, как Facebook, Twitter и eBay, имеют миллионы и сотни миллионов пользователей, а функциональность приложений также обеспечивает высокую степень взаимодействия между ними. Соответственно, такие распределенные системы

требуют высокого уровня масштабируемости. В исследовании [24] рассматриваются практические последствия обнаружения услуг в системах с большим их количеством. В ходе исследования было выявлено, что сервисы могут появляться и исчезать динамически в любое время, что негативно влияет на общее состояние системы.

Существуют и другие подходы решения проблемы масштабируемости, один из которых предложен в статье [25]. Разработчики сталкиваются с необходимостью нахождения компромисса между характеристиками DLT (например, доступностью и согласованностью), поскольку следование требованиям одной характеристики может препятствовать соблюдению других. Таким образом, если одна архитектура DLT может идеально подходить для конкретного варианта использования, ее применение для других сценариев может оказаться пагубным, что стимулирует появление разнообразных конструкций DLT (например, Ethereum, IOTA или Tezos). В статье были выявлены существующие особенности межблокчейновой интеграции (Cross Chain Technology — CCT) и представлены ее основные характеристики. Затем эти характеристики были приведены к единой системе, что позволяет легко и всесторонне их сравнивать. CCT может помочь расширить функциональность приложений, основанных на дизайне DLT (например, Hyperledger Fabric), осуществляя платежи, например, через Ethereum.

В следующем исследовании [26] продолжен анализ проблематики поиска компромиссов между характеристиками DLT. Подобные компромиссы препятствуют созданию универсального DLT-проекта, отвечающего требованиям всех приложений DLT. В работе представлен всеобъемлющий, синтезированный из литературы по DLT, набор из 49 характеристик DLT, которые авторы сочли актуальными для рассмотрения при разработке жизнеспособных приложений на DLT. Кроме того, проведен углубленный анализ зависимостей и полученных компромиссов между характеристиками DLT. Наконец, в шесть архетипов были объединены 26 идентифицированных компромиссов и объяснено их значение для приложений DLT.

Использование DLT может также стать эффективным способом решения проблем высоконагруженных систем. Например, правительство может вести реестр для хранения информации о предприятиях, включая их номер и название. Однако централизованная служба, поддерживающая реестр, является единственной точкой отказа для всей системы. В работе [27] представлен онлайн инструмент для генерации и развертывания реестров на основе смарт-контрактов с возможностью удобного доступа с использованием передачи состояния представления.

Еще один путь для решения вопроса масштабируемости — это виртуализация элементов системы [28]. В частности, в предложенной виртуализации для DLT (vDLT) основные ресурсы (например, аппаратные средства, вычисления, хранилище, сеть и т. д.) абстрагированы. Предоставляя логическое представление ресурсов, vDLT может значительно повысить производительность, облегчить изменения системы, а также упростить управление и настройку DLT. В этой статье также описаны несколько вариантов работы vDLT, включая vDLT на основе DAG и vDLT на основе блокчейна, механизмы побочных каналов в vDLT, а также отделение управления от трафика.

### Дизайн DLT

Помимо масштабируемости, дизайн DLT также играет важную роль в выполнении тех или иных функций системой. Для каждой отрасли могут использоваться различные подходы к дизайну системы. Например, работа [29] предлагает использовать архитектуру R3 Corda, доступ к коду которой не является свободным. Система была спроектирована с сетевой архитектурой, отличной от существующих систем блокчейна. В ней узел может работать на личном мобильном устройстве пользователя. Это позволяет пользователям хранить свои данные и управлять ими напрямую, а также обмениваться данными с авторизованными участниками сети. Основной же проблемой при выборе дизайна DLT, по мнению авторов, является необходимость структурного сравнения конструкций.

В статье [30] подбираются и вводятся характеристики DLT для глубокого сравнения соответствующих элементов реестра. Кроме того, предлагается процесс сравнительного анализа, который позволяет структурировать проекты DLT в соответствии с требованиями приложения.

Несмотря на отсутствие примеров практического применения сравнительных характеристик DLT, авторы работы [31] утверждают, что дизайн DLT должен быть настроен на специфические контекстные требования. Успешная конфигурация DLT предполагает глубокое понимание характеристик DLT и их взаимозависимостей. В этом исследовании рассматриваются 37 характеристик DLT, которые разделены на шесть групп (максимальное использование, максимальная гибкость разработки, максимальная производительность, максимальная анонимность, максимальная безопасность, максимальная институционализация).

### Доверительное управление

Технология распределенного реестра и интернет вещей всегда идут в совокупности с понятием

доверительного управления. Авторы работы [32] предлагают полностью децентрализованную архитектуру системы межмашинного взаимодействия (Machine-to-Machine — M2M), в которой услуги M2M могут быть быстро и гибко адаптированы для конкретных требований приложения. Децентрализованный характер предоставления услуг исключает единую точку отказа и повышает эффективность путем распределения ресурсов между участниками, что было уже упомянуто в других исследованиях.

В работе [33] также рассматривается использование технологии блокчейн в качестве инструмента обеспечения доверительного управления. Авторы предлагают применить теорию неформального управления как к техническому проектированию, так и к разработке ряда систем DLT, включая криптовалюты и корпоративные приложения, что приведет к применению также и в киберфизических системах (Cyber-Physical Systems — CPS). Из-за использования автономно действующих CPS возникают новые проблемы, связанные, с одной стороны, с необходимостью гибкости, функциональной совместимости, согласованности, с другой — с требованием обеспе-

чения надежности систем при взаимодействии между собой.

В исследовании [34] предлагается техническая концепция для внедрения систем производства на основании DLT и методе GAIA. Метод GAIA — это метод разработки на основе агентов, тесно связанный с объектно-ориентированными методами разработки. GAIA берет свое начало в представлении многоагентной системы (Multi-Agent System — MAS) как вычислительной системы, состоящей из узлов с различными ролями. Он нацелен на разработку MAS и фокусируется на безопасности и надежности сред CPS. В качестве варианта DLT авторами рекомендуется структура блокчейна с механизмом согласования, базированным на задаче византийских генералов.

### Заключение

Проведенный обзор публикаций, посвященных современным технологиям распределенного реестра и различным областям его использования, позволил представить аналитический обобщающий результат в виде сводной таблицы.

- Основные проблемы и потенциальные пути их решения
- Main DLT integration challenges and potential solutions

Отрасль	Описание проблематики	Приложения	Потенциальные пути решения
Интернет вещей	Взаимодействие IoT и DLT требует обеспечения высокого уровня защищенности информации	DAG, IOTA, Tangle, MCMC IOTA, блокчейн, смарт-контракты	Особенные алгоритмы и протоколы Анализ негативных последствий и исправление сценариев
	Необходимость управлять безопасностью сценариев развития AI в контексте IoT		
	Отсутствие инструментов доверительного управления при взаимодействии разнородных систем	GAIA, UML, блокчейн с механизмом PBFT	Техническая концепция на основе DLT
Здравоохранение	Отсутствие единой системы для хранения данных между разными медицинскими учреждениями	DAG, IOTA, Tangle, MAM, дерево хешей Меркла, Solidity, Ethereum, смарт-контракты	Распределенная система обмена данными о здоровье пациентов Система с записями о предложениях, об участниках, которые предоставили свои данные или отклонили предложение
	Необходимость обеспечивать высокий уровень конфиденциальности информации		
	Невозможность отслеживать движение персональной информации пациентом		
Образование	Отсутствие единой системы компетенций, информации о местах обучения и образовательных возможностях соискателей	Solidity, Ethereum, блокчейн	Децентрализованная система кредитования высшего образования Система аттестации Реестр профессиональных компетенций населения
	Отсутствие единой системы аттестации		
	Отсутствие возможности спонсирования студентов		

■ Окончание таблицы

■ End of the table

Отрасль	Описание проблематики	Приложения	Потенциальные пути решения
Цепочки поставок	Отсутствие способности отслеживать поставки продуктов питания, их происхождение и перемещение	Протоколы единодушного согласия, ВВС	Система для отслеживания и опознавания личности
	Отсутствие информации о звене цепи поставок, невозможность определить ответственного за некорректный или ложный ввод данных		
Лицензирование	Отсутствие возможности лицензирования цифровых активов	Блокчейн, RMI, DRM	Приложение для лицензирования и интерфейс цифровой защиты
Финансы	Сложность отслеживания нарушения прав собственности	Все методы DLT, токенизация	Трансформация инфраструктуры финансовых услуг
	Агрегированность и непрозрачность рынка ценных бумаг		
Энергетика	Необходимость ухода от использования «сброса» электроэнергии при перегрузке сети	P2P, протоколы единодушного согласия	Распределенная система электроэнергии Разработка инфраструктуры транзакционного управления Разработка интегрированной бизнес-платформы распределенных энергетических ресурсов
	Отсутствие гибкого инструмента регулирования нагрузок на электросетях		
	Сложность обеспечения совместимости между разнородными устройствами и системами	Смарт-контракты, HEILA, WoT	
Распределенные приложения	Глобальная проблема масштабируемости системы с большим числом узлов и высокой нагрузкой на сети	Все методы DLT, DAG, vDLT	Создание приложений, где обмен данными основывается на принципах распределенного реестра
Разные отрасли	Необходимость подбора корректного дизайна DLT согласно требуемому функционалу	R3 Corda	Сравнение характеристик DLT путем их выделения и составления групп

Кроме того, для выявленных основных проблем в каждой отрасли предложены возможные способы их решения, что поможет в дальнейшем сосредоточиться на их устранении.

### Финансовая поддержка

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-41-06301).

### Литература

- Lee J., Oh S., Jang J. W. A. Work in progress: Context based encryption scheme for Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 56, pp. 271–275. doi:10.1016/j.procs.2015.07.208
- Mäkitalo N., et al. Safe, secure executions at the network Edge: coordinating Cloud, Edge, and Fog Computing. *IEEE Software*, 2017, vol. 35, no. 1, pp. 30–37. doi:10.1109/MS.2017.4541037
- Lamberti R., et al. An open multimodal mobility platform based on Distributed Ledger Technology. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 18th International Conference NEW2AN 2018, and 11th Conference, RuSMART 2018*, Saint-Petersburg, Russia, August 26–28, 2019, Springer, 2019, pp. 41–52. doi:10.1007/978-3-030-30859-9\_4
- Azaria A., et al. Medrec: Using blockchain for medical data access and permission management. *Proceedings of 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD)*, IEEE, 2016, pp. 25–30. doi:10.1109/OBD.2016.11
- Zheng X., et al. Accelerating Health data sharing: A solution based on the Internet of Things and Distributed Ledger Technologies. *Journal of Medical Internet Research*, 2019, vol. 21, no. 6, p. 13583. doi:10.2196/13583
- Dubovitskaya A., et al. Secure and trustable electronic medical records sharing using blockchain. *AMIA Annual Symposium Proceedings*, 2017, vol. 2017, p. 650.

7. **Cunningham J., Ainsworth J.** Enabling patient control of personal electronic health records through Distributed Ledger Technology. *Stud. Health. Technol. Inform.*, 2018, vol. 245, pp. 45–48. doi:10.3233/978-1-61499-830-3-45
8. **Novikov S., et al.** Digital registry of professional competences of the population drawing on distributed registries and smart contracts technologies. *Information Systems and Technologies in Business*, 2019, no. 4 (46), pp. 43–53. doi:10.17323/1998-0663.2018.4.43.53
9. **Turkanović M., et al.** EduCTX: A blockchain-based higher education credit platform. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 5112–5127. doi:10.1109/ACCESS.2018.2789929
10. **Rashid M. A., et al.** TEduChain: A platform for crowdsourcing tertiary education fund using blockchain technology. *arXiv preprint arXiv:1901.06327*, 2019.
11. **Pearson S., et al.** Are distributed ledger technologies the panacea for food traceability? *Global Food Security*, 2019, vol. 20, pp. 145–149. doi:10.1016/j.gfs.2019.02.002
12. **Xu B., Agbele T., Jiang R.** Biometric blockchain: A better solution for the security and trust of food logistics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 646, no. 1, p. 012009. doi:10.1088/1757-899x/646/1/012009
13. **Schoenhals A., et al.** Overview of licensing platforms based on distributed ledger technology. *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2019, pp. 4675–4684. doi:10.24251/hicss.2019.564
14. **Bodó B., Gervais D., Quintais J. P.** Blockchain and smart contracts: the missing link in copyright licensing? *International Journal of Law and Information Technology*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 311–336. doi:10.1093/ijlit/eay014
15. **Suayb S., et al.** Advancements in distributed ledger technology for Internet of Things. *IoT Journal: Elsevier*, 2019, vol. 9, pp. 1–3. doi:10.1016/j.iot.2019.100114
16. **Danzi P., et al.** Communication aspects of the integration of wireless IoT devices with distributed ledger technology. *IEEE Network*, 2020, vol. 32, no. 1, pp. 47–53. doi:10.1109/MNET.001.1900180
17. **Cullen A., et al.** Distributed ledger technology for IoT: Parasite chain attacks. *arXiv preprint arXiv:1904.00996*, 2019.
18. **Carlson K. W.** Safe Artificial General Intelligence via Distributed Ledger Technology. *Big Data and Cognitive Computing*, 2019, vol. 3, no. 40, pp. 1–24. doi:10.3390/bdcc3030040
19. **Mazur M.** Brawl at the gates: How distributed ledger technology is transforming the financial services sector. *SSRN 3400649*, 2019. <https://ssrn.com/abstract=3400649> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3400649> (дата обращения: 19.01.2020).
20. **Donald D. C., Miraz M. H.** Multilateral transparency for securities markets through DLT. *The Chinese University of Hong Kong Faculty of Law Research Paper*, 2019, no. 5. <https://ssrn.com/abstract=3352293> (дата обращения: 19.01.2020).
21. **Siano P., et al.** A survey and evaluation of the potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Systems Journal*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 97–153. doi:10.1109/JSYST.2019.2903172
22. **Cali U., Çakir O.** Energy policy instruments for Distributed Ledger Technology empowered Peer-to-Peer local energy markets. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 82888–82900. doi:10.1109/ACCESS.2019.2923906
23. **Mashlakov A., et al.** Uniform Web of Things based access to distributed energy resources via metadata registry, *Proceedings of 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, 2019, pp. 1–5.
24. **Braubach L., Jander K., Pokahr A.** A novel distributed registry approach for efficient and resilient service discovery in megascale distributed systems. *Computer Science & Information Systems*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 751–774. doi:10.2298/CSIS180131030B
25. **Kannengießer N., et al.** Bridges between islands: Cross-chain technology for Distributed Ledger Technology. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2020, pp. 5298–5307. doi:10.24251/HICSS.2020.652
26. **Kannengießer N., et al.** Mind the gap: Trade-offs between Distributed Ledger Technology characteristics. *arXiv preprint arXiv:1906.00861*, 2019.
27. **Tran A. B., et al.** Regerator: a registry generator for blockchain. *CAiSE-Forum-DC*, 2017, pp. 81–88.
28. **Yu F. R., et al.** Virtualization for Distributed Ledger Technology (vDLT). *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 25019–25028. doi:10.1109/ACCESS.2018.2829141
29. **Moon J., Kim D.** Design of a personal-led health data management framework based on distributed ledger. *The Journal of Society for e-Business Studies*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 73–86. doi:10.2196/13665
30. **Grße F., et al.** Do not be fooled: Toward a holistic comparison of Distributed Ledger Technology designs. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2020, pp. 6297–6306. doi:10.24251/HICSS.2020.770
31. **Kannengießer N., et al.** What does not fit can be made to fit! Trade-offs in Distributed Ledger Technology designs. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2019, pp. 7069–7078. doi:10.24251/HICSS.2019.848
32. **Shala B., et al.** Distributed Ledger Technology for trust management optimisation in M2M. *Mobile Communication Technologies and Applications*, IEEE, 2019, pp. 93–98.
33. **Howell B. E., Potgieter P. H., Sadowski B. M.** Governance of blockchain and distributed ledger technology projects. *SSRN 3365519*, 2019. <http://dx.doi.org/>

10.2139/ssrn.3365519 (дата обращения: 19.01.2020).  
doi:10.2139/ssrn.3365519

34. Lebioda A., Lachenmaier J., Burkhardt D. Control of cyber-physical production systems: A concept to in-

crease the trustworthiness within multi-agent systems with distributed ledger technology. *Proc. of the 23rd Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS)*, 2019, pp. 56–62.

UDC 004.75

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-10-19

### Survey of distributed ledger technology integration challenges

M. V. Gorbunova<sup>a</sup>, Master Student, orcid.org/0000-0003-2186-1064, mvgorbunova@edu.hse.ru

A. Y. Ometov<sup>b</sup>, Postdoctoral Research Fellow, orcid.org/0000-0003-3412-1639, aleksandr.ometov@tuni.fi

M. M. Komarov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-7075-0016, mkomarov@hse.ru

S. V. Bezzateev<sup>c</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0002-0924-6221, bsv@aanet.ru

<sup>a</sup>National Research University «Higher School of Economics», 20, Myasnitkaya St., 101000, Moscow, Russian Federation

<sup>b</sup>Tampere University, Korkeakoulunkatu 10, Tampere, 33720, Finland

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

**Introduction:** Distributed ledger technology (DLT) is one of the most significant fields covering various aspects of modern ICT systems. Centralized systems of today can no longer guarantee the required level of availability and reliability, while broadly available distributed ones are still in the infancy. **Purpose:** Analysis of the applicability of DLT to various industries such as economics, energy, finance, logistics, and the Internet of Things. **Results:** The article outlines the main challenges of the DLT technology integration, such as the lack of a unified system for data storage, the need to ensure an appropriate level of data confidentiality, integration into the existing competency systems, the issues of a distributed system interaction with resource-constrained IoT devices, the lack of proper management tools for distributed systems, and network scalability. The main contribution of this paper is a systematic overview of the integration challenges followed by potential solutions and future perspectives.

**Keywords** — distributed ledger, distributed ledger technology, blockchain, Internet of Things.

**For citation:** Gorbunova M. V., Ometov A. Y., Komarov M. M., Bezzateev S. V. Survey of distributed ledger technology integration challenges. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 10–19 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-10-19

### References

- Lee J., Oh S., Jang J. W. A. Work in progress: Context based encryption scheme for Internet of Things. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 56, pp. 271–275. doi:10.1016/j.procs.2015.07.208
- Mäkitalo N., et al. Safe, secure executions at the network Edge: coordinating Cloud, Edge, and Fog Computing. *IEEE Software*, 2017, vol. 35, no. 1, pp. 30–37. doi:10.1109/MS.2017.4541037
- Lamberti R., et al. An open multimodal mobility platform based on Distributed Ledger Technology. *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 18th International Conference NEW2AN 2018, and 11th Conference, RuSMART 2018, Saint-Petersburg, Russia, August 26–28, 2019*, Springer, 2019, pp. 41–52. doi:10.1007/978-3-030-30859-9\_4
- Azaria A., et al. Medrec: Using blockchain for medical data access and permission management. *Proceedings of 2nd International Conference on Open and Big Data (OBD)*, IEEE, 2016, pp. 25–30. doi:10.1109/OBD.2016.11
- Zheng X., et al. Accelerating Health data sharing: A solution based on the Internet of Things and Distributed Ledger Technologies. *Journal of Medical Internet Research*, 2019, vol. 21, no. 6, p. 13583. doi:10.2196/13583
- Dubovitskaya A., et al. Secure and trustable electronic medical records sharing using blockchain. *AMIA Annual Symposium Proceedings*, 2017, vol. 2017, p. 650.
- Cunningham J., Ainsworth J. Enabling patient control of personal electronic health records through Distributed Ledger Technology. *Stud. Health. Technol. Inform.*, 2018, vol. 245, pp. 45–48. doi:10.3233/978-1-61499-830-3-45
- Novikov S., et al. Digital registry of professional competences of the population drawing on distributed registries and smart contracts technologies. *Information Systems and Technologies in Business*, 2019, no. 4 (46), pp. 43–53. doi:10.17323/1998-0663.2018.4.43.53
- Turkanović M., et al. EduCTX: A blockchain-based higher education credit platform. *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 5112–5127. doi:10.1109/ACCESS.2018.2789929
- Rashid M. A., et al. TEduChain: A platform for crowdsourcing tertiary education fund using blockchain technology. *arXiv preprint arXiv:1901.06327*, 2019.
- Pearson S., et al. Are distributed ledger technologies the panacea for food traceability? *Global Food Security*, 2019, vol. 20, pp. 145–149. doi:10.1016/j.gfs.2019.02.002
- Xu B., Agbele T., Jiang R. Biometric blockchain: A better solution for the security and trust of food logistics. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, vol. 646, no. 1, p. 012009. doi:10.1088/1757-899x/646/1/012009
- Schoenhals A., et al. Overview of licensing platforms based on distributed ledger technology. *Proceedings of the 52nd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2019, pp. 4675–4684. doi:10.24251/hicss.2019.564
- Bodó B., Gervais D., Quintais J. P. Blockchain and smart contracts: the missing link in copyright licensing? *International Journal of Law and Information Technology*, 2018, vol. 26, no. 4, pp. 311–336. doi:10.1093/ijlit/eay014
- Suayb S., et al. Advancements in distributed ledger technology for Internet of Things. *IoT Journal: Elsevier*, 2019, vol. 9, pp. 1–3. doi:10.1016/j.iot.2019.100114
- Danzi P., et al. Communication aspects of the integration of wireless IoT devices with distributed ledger technology. *IEEE Network*, 2020, vol. 32, no. 1, pp. 47–53. doi:10.1109/MNET.001.1900180
- Cullen A., et al. Distributed ledger technology for IoT: Parasite chain attacks. *arXiv preprint arXiv:1904.00996*, 2019.
- Carlson K. W. Safe Artificial General Intelligence via Distributed Ledger Technology. *Big Data and Cognitive Com-*

- puting, 2019, vol. 3, no. 40, pp. 1–24. doi:10.3390/bdcc3030040
19. Mazur M. Brawl at the gates: How distributed ledger technology is transforming the financial services sector. *SSRN Electronic Journal* 3400649, 2019. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3400649> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3400649> (accessed 19 March 2020).
  20. Donald D. C., Miraz M. H. Multilateral transparency for securities markets through DLT. *The Chinese University of Hong Kong Faculty of Law Research Paper*, 2019, no. 5. Available at: <https://ssrn.com/abstract=3352293> (accessed 19 March 2020).
  21. Siano P., et al. A survey and evaluation of the potentials of Distributed Ledger Technology for Peer-to-Peer transactive energy exchanges in local energy markets. *IEEE Systems Journal*, 2019, vol. 25, no. 1, pp. 97–153. doi:10.1109/JSYST.2019.2903172
  22. Cali U., Çakir O. Energy policy instruments for Distributed Ledger Technology empowered Peer-to-Peer local energy markets. *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 82888–82900. doi:10.1109/ACCESS.2019.2923906
  23. Mashlakov A., et al. Uniform Web of Things based access to distributed energy resources via metadata registry. *Proceedings of 25th International Conference on Electricity Distribution (CIRED)*, 2019, pp. 1–5.
  24. Braubach L., Jander K., Pokahr A. A novel distributed registry approach for efficient and resilient service discovery in megascale distributed systems. *Computer Science & Information Systems*, 2018, vol. 15, no. 3, pp. 751–774. doi:10.2298/CSIS180131030B
  25. Kannengießer N., et al. Bridges between islands: Cross-chain technology for Distributed Ledger Technology. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2020, pp. 5298–5307. doi:10.24251/HICSS.2020.652
  26. Kannengießer N., et al. Mind the gap: Trade-offs between Distributed Ledger Technology characteristics. *arXiv preprint arXiv:1906.00861*, 2019.
  27. Tran A. B., et al. Regerator: a registry generator for blockchain. *CAiSE-Forum-DC*, 2017, pp. 81–88.
  28. Yu F. R., et al. Virtualization for Distributed Ledger Technology (vDLT). *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 25019–25028. doi:10.1109/ACCESS.2018.2829141
  29. Moon J., Kim D. Design of a personal-led health data management framework based on distributed ledger. *The Journal of Society for e-Business Studies*, 2019, vol. 24, no. 3, pp. 73–86. doi:10.2196/13665
  30. Gräbe F., et al. Do not be fooled: Toward a holistic comparison of Distributed Ledger Technology designs. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2020, pp. 6297–6306. doi:10.24251/HICSS.2020.770
  31. Kannengießer N., et al. What does not fit can be made to fit! Trade-offs in Distributed Ledger Technology designs. *Proceedings of 53rd Hawaii International Conference on System Sciences*, 2019, pp. 7069–7078. doi:10.24251/HICSS.2019.848
  32. Shala B., et al. Distributed Ledger Technology for trust management optimisation in M2M. *Mobile Communication Technologies and Applications*, IEEE, 2019, pp. 93–98.
  33. Howell B. E., Potgieter P. H., Sadowski B. M. Governance of blockchain and distributed ledger technology projects. *SSRN Electronic Journal* 3365519, 2019. Available at: <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3365519> (accessed 19 March 2020). doi:10.2139/ssrn.3365519
  34. Lebioda A., Lachenmaier J., Burkhardt D. Control of cyber-physical production systems: A concept to increase the trustworthiness within multi-agent systems with distributed ledger technology. *Proc. of the 23rd Pacific Asia Conference on Information Systems (PACIS)*, 2019, pp. 56–62.

## 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, что снижает 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>

УДК 007.519.7

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-20-30

# Алгоритм вычисления значений весов синапсов первого слоя нейронной сети на основе метрических методов распознавания. Часть 1

П. Ш. Гейдаров<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-3881-0629](https://orcid.org/0000-0002-3881-0629), [plbaku2010@gmail.com](mailto:plbaku2010@gmail.com)

<sup>а</sup>Институт систем управления Национальной академии наук Азербайджана, Бахтияр Вагабзаде ул., 9, Баку, Az 1141, Азербайджан

**Введение:** метрические методы распознавания позволяют предварительно и строго определять структуры нейронных сетей прямого распространения, а именно количество нейронов, слоев и связей на основе начальных параметров задачи распознавания. Они также дают возможность на основе метрических выражений близости аналитически вычислять веса синапсов нейронов сети. Процедура настройки для данных сетей включает в себя последовательное аналитическое вычисление значения каждого веса синапса в таблице весов для нейронов нулевого или первого слоя, что позволяет уже на начальном этапе без применения алгоритмов обучения получить работоспособную нейронную сеть прямого распространения. Затем нейронные сети прямого распространения могут дообучаться известными алгоритмами обучения, что в целом ускоряет процедуры их создания и обучения. **Цель:** определить, сколько времени требует процесс вычисления значений весов и, соответственно, насколько является оправданным предварительное вычисление значений весов нейронной сети прямого распространения. **Результаты:** предложен и реализован алгоритм автоматизированного вычисления всех значений таблиц весов синапсов для нулевого и первого слоя применительно к задаче распознавания черно-белых однотонных изображений символов. Описание предлагаемого алгоритма приведено в программной среде Builder C++. Рассмотрена возможность оптимизировать процесс вычисления весов синапсов в целях ускорения всего алгоритма. Выполнена оценка затрачиваемого времени на вычисление этих весов для разных конфигураций нейронных сетей на основе метрических методов распознавания. Приведены примеры создания таблиц весов синапсов согласно рассмотренному алгоритму. Результаты вычисления таблиц показывают, что на процедуру аналитического вычисления весов нейронной сети потрачены считанные секунды, минуты, что никак не сравнимо со временем, необходимым для обучения нейронной сети. **Практическая значимость:** аналитическое вычисление значений весов нейронной сети позволяет существенно ускорить процедуру создания и обучения нейронной сети прямого распространения. На основе предложенного алгоритма может быть также реализован и алгоритм вычисления трехмерных таблиц весов для более сложных, черно-белых и цветных полутоновых, изображений.

**Ключевые слова** – нейронные сети, весовые и пороговые значения, нейрокомпьютер, алгоритмы обучения, программирование нейронных сетей.

Для цитирования: Гейдаров П. Ш. Алгоритм вычисления значений весов синапсов первого слоя нейронной сети на основе метрических методов распознавания. Ч. 1. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 20–30. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-20-30

For citation: Geidarov P. Sh. Algorithm for calculating synapse weights of the first layer of a neural network on the base of metric recognition methods. Part 1. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-20-30

## Введение

Искусственные нейронные сети (НС) широко используются в различных задачах [1–24]. Известно, что реализация классических архитектур НС [25] является непрозрачной, трудоемкой, а зачастую и непредсказуемой на практике работой. Процедуры обучения НС требуют наличия значительных по объему обучающих выборок по решаемой задаче. Из-за возможных проблем, возникающих в процессе обучения, таких как попадание в локальный минимум, паралич сети, может потребоваться повторное обучение с другими настройками алгоритмов обучения и с другими параметрами структуры сети. Выбор структуры классических НС также реализуется в большей степени на основе неточных рекомендаций, сформированных на эмпирических данных. Поэтому

создание новых архитектур НС, позволяющих быстро и понятно строить НС для решения различных задач, остается актуальной целью.

В работах [26, 27] рассмотрены архитектуры НС, реализующие метрическими методами распознавания [28]. Показано, что, в отличие от классических подходов, для рассматриваемых НС количество нейронов, связей и слоев определяется строгими выражениями и значениями исходя из начальных условий задачи, таких как количество используемых эталонов и распознаваемых образов. Весовые значения связей для этих сетей вычисляются аналитически на основе используемых выражений, определяющих меру близости объектов к образу. Такой подход позволяет получить работающую НС без использования классических алгоритмов обучения и без наличия обучающих выборок, что дает возможность

ускорить процедуру создания НС по сравнению с классическими решениями, для которых значения весов синапсов настраиваются длительными алгоритмами обучения. При этом для предлагаемых сетей могут дополнительно быть применены классические алгоритмы обучения НС в целях дообучения [27]. Таким образом, предлагаемые сети объединяют преимущества метрических методов распознавания и классических НС.

Напомним, что в качестве метрической меры близости могут использоваться различные формулы, среди которых и такие, как разность квадратов евклидовых расстояний:

$$w_{c,r}^{(1)} = d_1^2 - d_2^2 = \left( (c_1 - c_p)^2 + (r_1 - r_p)^2 \right) - \left( (c_2 - c_p)^2 + (r_2 - r_p)^2 \right), \quad (1)$$

где  $(c_1, r_1)$  и  $(c_2, r_2)$  являются координатами точек (или ячеек таблицы весов) до ближайшей точки (или ячейки) изображения эталона с координатами  $(c_p, r_p)$ , как показано на рис. 1. Могут также использоваться и другие, более простые или сложные, выражения, например, выражение, определяющее среднеквадратичную разность значений, выполняемую только по оси Y:

$$w_{c,r}^1 = (r_1 - r_p)^2 - (r_2 - r_p)^2. \quad (2)$$

Выражение (2) может использоваться, например, для задачи распознавания кривых.

Еще один пример характеристики близости представляет выражение

$$w_{c,r}^{(2)} = \frac{M}{1 + d_1^2} + \frac{M}{1 + d_2^2} = \frac{M}{1 + \left( (c_1 - c_p)^2 + (r_1 - r_p)^2 \right)} +$$

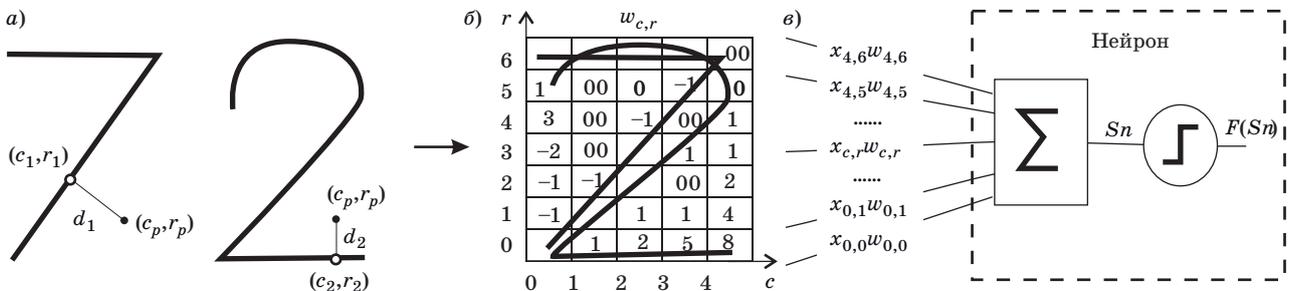
$$+ \frac{M}{1 + \left( (c_2 - c_p)^2 + (r_2 - r_p)^2 \right)}, \quad (3)$$

где  $M$  — выбранная постоянная величина. Полученные при помощи выражений (1)–(3) таблицы весов синапсов свойственны для архитектур НС без нулевого слоя (рис. 2). В этом случае понадобится  $N(N - 1)$  таких таблиц [26], определяемых отдельно для каждого нейрона первого слоя, где  $N$  — количество используемых эталонов.

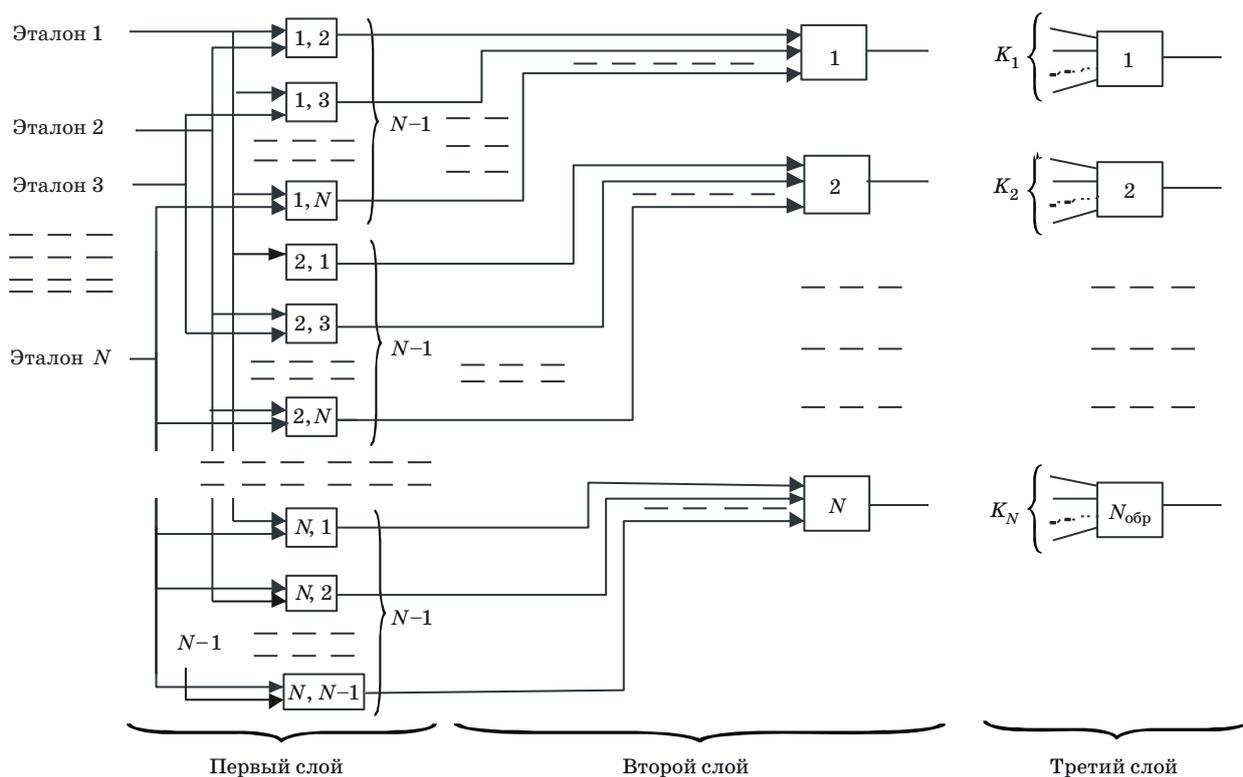
Нейронная сеть с добавленным нулевым слоем, в котором количество вычисляемых таблиц весов синапсов уменьшается до количества используемых эталонов  $N$ , представлена на рис. 3. В этом случае в качестве выражений вычисления значения весов синапсов используются те, которые составляют одно из слагаемых значений в выражениях (1)–(3), например, для (1) это будет

$$w_{c,r}^{(0)} = d_1^2 = \left( (c_1 - c_p)^2 + (r_1 - r_p)^2 \right). \quad (4)$$

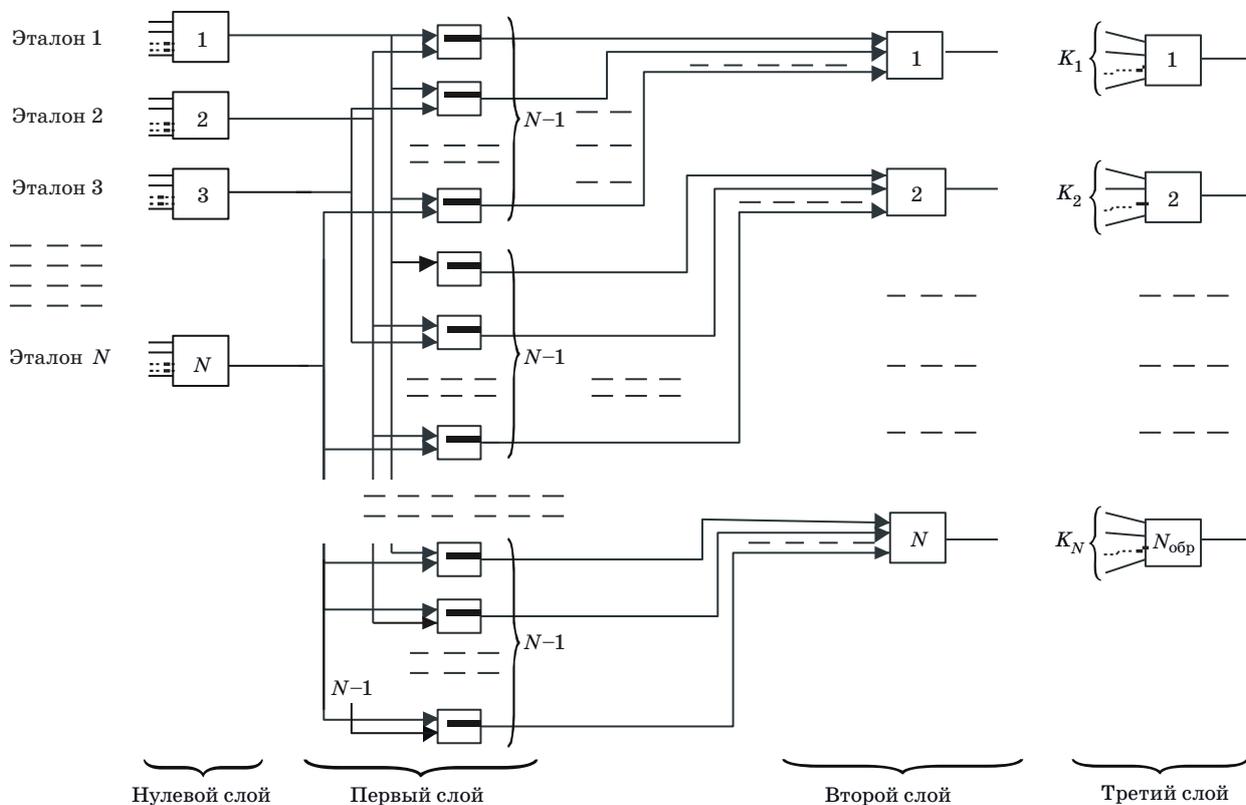
Для НС на основе метрических методов распознавания процедура вычисления значений весов синапсов нулевого или первого слоя выполняется последовательно для каждой ячейки таблицы весов, что требует определенного времени. При этом при создании НС на основе метрических методов распознавания наибольшее время занимают вычисления значений таблиц весов синапсов нулевого или первого слоя нейронов. И понятно, что остается открытым вопрос: «Сколько времени занимает процесс вычисления значений весов, и, соответственно, насколько является оправданным предварительное вычисление значений весов НС?», — на который автор ищет ответ. При этом, если в предыдущих работах [26, 27] приводятся аналитические выражения вычисления значений весов нулевого и первого слоя, то в данной работе ставится цель разработать и описать



■ **Рис. 1.** Расстояния  $d_1$  и  $d_2$  для точки  $(c_p, r_p)$  (а); таблица весов для эталонов «2» и «7» (б); нейрон с пороговой функцией активации (в)  
 ■ **Fig. 1.** Distances  $d_1$  и  $d_2$  for point  $(c_p, r_p)$  (а); table of weights for standards «2» and «7» (б); neuron with threshold activation function (в)



■ **Рис. 2.** Общая схема НС на основе метрического метода распознавания без нулевого слоя  
 ■ **Fig. 2.** A general diagram of a neural network based on the metric recognition method without a zero layer



■ **Рис. 3.** Общая схема НС на основе метрического метода распознавания с нулевым слоем  
 ■ **Fig. 3.** A general diagram of a neural network based on the metric recognition method with a zero layer

полный автоматизированный алгоритм вычисления значений всех весов нулевого и первого слоя, а также оценить время вычисления таблиц весов для разных конфигураций НС.

### Алгоритм и программа вычисления таблиц весов

Вычисление таблицы весов синапсов реализовано в программном модуле с использованием объектно-ориентированной среды Boland C++. Основная часть программного кода реализована в четырех функциях, названных как

```
void __fastcall serch_point();
int __fastcall scan();
voidk __fastcall NaytiMin(int x, int y);
void __fastcall Izmeneniye_XO_YO();
```

Функция *serch\_point()* выполняет просмотр ячеек таблицы, при каждой найденной новой ячейке выполняет вызов функции *scan()*, которая проверяет, является ли ячейка активной или не активной. Здесь в качестве понятия активности понимается наличие в данной ячейке части изображения эталона. А в качестве текущей ячейки понимается ячейка таблицы весов, для которой вычисляется весовое значение синапса. Если ячейка активна, то в функцию *serch\_point()* возвращается значение 1, в противном случае возвращается 0. Функция *NaytiMin* получает координаты активной ячейки из функции *serch\_point()* и определяет значение веса синапса для

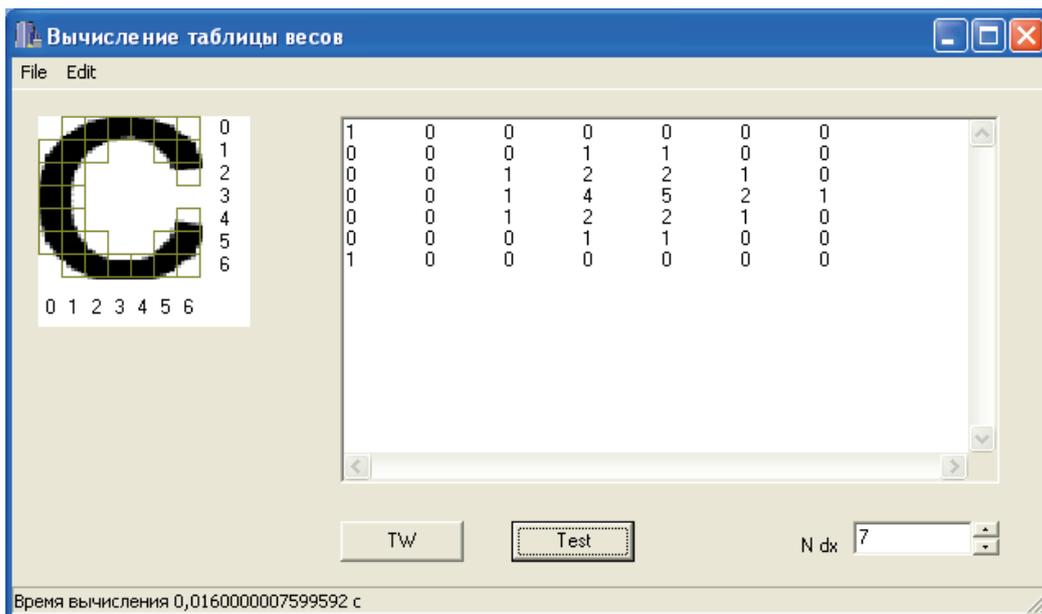
текущей ячейки. В функции *Izmeneniye\_XO\_YO* последовательно меняется текущая ячейка и определяются значения весов синапсов для всех ячеек таблицы весов нейрона нулевого или первого слоя.

Для вычисления таблицы весов выбранного изображения (рис. 4) предварительно выбирается размерность таблицы весов — количество колонок и строк (текстовое поле *N dx*). На основе этого значения определяется высота (*dy*) и ширина (*dx*) ячейки таблицы весов в пикселях путем деления ширины изображения в пикселях на выбранное количество строк в текстовом поле *N dx*:

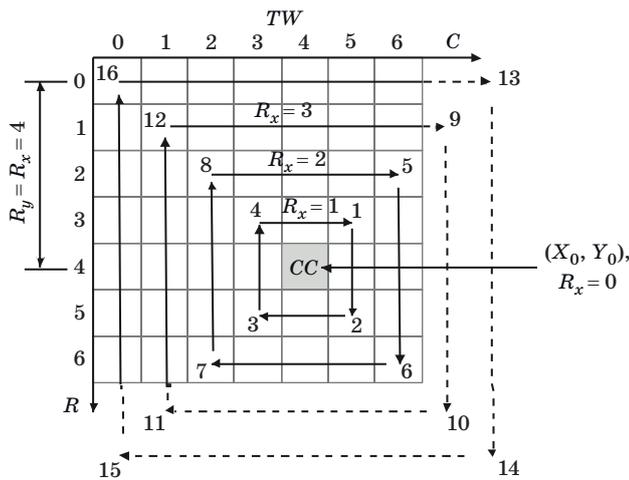
$$dx = pBitmap \rightarrow Width / StrToInt(Edit1 \rightarrow Text);$$

В данной реализации значения *dx* и *dy* принимаются равными (*dx = dy*).

Процедура просмотра ячеек таблицы весов *TW* относительно текущей ячейки [на рис. 5 текущая ячейка *CC* с координатами (4, 4)] выполняется в функции *serch\_point()* и выглядит следующим образом. Сначала проверяется текущая ячейка. Далее выполняется просмотр ближайших ячеек таблицы весов, располагаемых вокруг текущей ячейки. Движение происходит по замкнутому контуру. Контур движения в таблице представляет из себя квадрат. Сама процедура просмотра одного контура реализована в четырех последовательных циклах, где на каждом цикле выполняется просмотр ячеек по одной стороне квадрата: первый цикл — правая сторона квадрата, выполняется движение сверху вниз из точки 1 в точку 2; второй цикл — нижняя сторона квадрата,



■ Рис. 4. Программный модуль вычисления таблицы весов синапсов нулевого слоя  
 ■ Fig. 4. Software module for calculating the table of synapse weights of the zero layer



■ **Рис. 5.** Поиск по контурам активной ячейки относительно текущей ячейки *CC* в таблице весов *TW*

■ **Fig. 5.** Search the contours of the active cell relative to the current cell (*CC*) in the weight table (*TW*)

движение справа налево из точки 2 в точку 3; третий цикл — левая сторона квадрата, движение снизу вверх из точки 3 в точку 4; четвертый цикл — верхняя сторона квадрата, движение слева направо из точки 4 в точку 1. Ниже приведен листинг четырех циклов, в которых реализуется движение по квадратному контуру:

```

M1: x = X0 + Rx;
for (y = Y0 - Ry; y < Y0 + Ry; y++) // Цикл 1
{.....}
y = Y0 + Ry;
for (x = X0 + Rx; x > X0 - Rx; x--) // Цикл 2
{.....}
x = X0 - Rx;
for (y = Y0 + Ry; y > Y0 - Ry; y--) // Цикл 3
{.....}
y = Y0 - Ry;
for (x = X0 - Rx; x < X0 + Rx; x++) // Цикл 4
{.....}
    
```

Здесь  $X_0, Y_0$  — координаты текущей ячейки (на рис. 5  $X_0 = 4, Y_0 = 4$ );  $R_x, R_y$  — радиус контура по оси  $X$  и  $Y$  соответственно относительно текущей ячейки. Начальные значения  $R_x, R_y$  принимаются равными единице. После просмотра одного контура выполняется увеличение значений  $R_x$  и  $R_y$  на единицу, после чего повторяется просмотр ячеек по замкнутому контуру, только теперь уже с новыми значениями  $R_x = R_y$  (см. рис. 5). Таким образом, создается еще один цикл, который реализуется меткой *M1* и командой перехода *goto*:

```

Rx = Ry = Ry + 1;
goto M1;
    
```

Процесс выполняется до тех пор, пока значения  $R_x$  и  $R_y$  не выйдут за пределы всех сторон изображения, что проверяется следующим условием:

```

if ((X0 + Rx)*dx > W + dx && (X0 - Rx)*dx < -dx && (Y0 + Ry)*dx > H + dx && (Y0 - Ry)*dx < -dx) return;
    
```

где  $W$  и  $H$  — ширина и высота изображения, определяемые строками

```

W = pBitmap->Width;
H = pBitmap->Height;
    
```

Для случаев, когда по ходу движения по квадратному контуру происходит выход за пределы выбранной размерности таблицы весов (но происходит это не со всех сторон изображения; на рис. 5 контуры с точками 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16), ячейки, оказавшиеся за пределами таблицы весов синапсов, пропускаются в циклах при помощи следующей строки:

```

if (X1 < -dx || Y1 < -dx || X1 >= W + dx || Y1 >= H + dx) continue;
    
```

где  $X1, Y1$  — значения координат изображения в пикселях, полученные от перебираемых в циклах координат ячеек таблиц весов  $x, y$  следующим образом:

```

Y1 = y*dx; X1 = x*dx;
    
```

Для каждой ячейки таблицы весов синапсов, встречаемой на пути движения вдоль замкнутого контура, выполняется проверка активности данной ячейки таблицы в функции *scan*. Функция *scan*, используя координаты выбранной ячейки в изображении  $X1, Y1$ , посредством двух встроенных циклов и метода *ScanLine* объекта изображения *pBitmap* сканирует все пиксели в данной ячейке, значение которых не выше 50, на наличие затемненных участков:

```

for (x = X1 + 2; x < X2 - 1; x++)
for (y = Y1 + 2; y < Y2 - 1; y++)
{
ptr = (Byte *)pBitmap->ScanLine[y];
pt = ptr[x];
if (ptr[x] < 50) return 1;
}
return 0;
    
```

Здесь если  $X1, Y1$  — координаты левого верхнего угла ячейки, то  $X2, Y2$  — координаты правого нижнего угла ячейки, которые определяются как

```

X2 = X1 + dx; Y2 = Y1 + dx;
    
```

Сканирование выполняется последовательно для всех пикселей выбранной ячейки таблицы весов. Активность пикселя определяется, если его значение меньше 50, что соответствует затемненным оттенкам черно-белого изображения, где тональность пикселя измеряется в диапазоне от 0 до 256. При выполнении условия затемненности пикселей в ячейке таблицы процесс прерывается, и функция *scan* возвращает значение 1 в функцию *serch\_point*, что соответствует активности ячейки. Если после сканирования всей ячейки не определяются активные пиксели, то функция *scan* возвращает значение 0, что соответствует неактивности данной ячейки. В листинге строки необходимы также строки, исключающие выход процедуры сканирования за пределы изображения:

```
if (y <= 0 || y >= pBitmap->Height) continue;
if (x <= 0 || x >= pBitmap->Width) continue;
```

Функция *serch\_point* получает выходное значение функции *scan*, и если оно активно, вызывает функцию *NaytiMin*:

```
Aktiv = scan();
if(Aktiv == 1) NaytiMin(x, y);
```

В функции *NaytiMin* касательно найденной активной ячейки с координатами *x* и *y* выполняется вычисление значения веса синапса для текущей ячейки с использованием выбранного метрического выражения близости, например квадрата евклидова расстояния между ячейками:

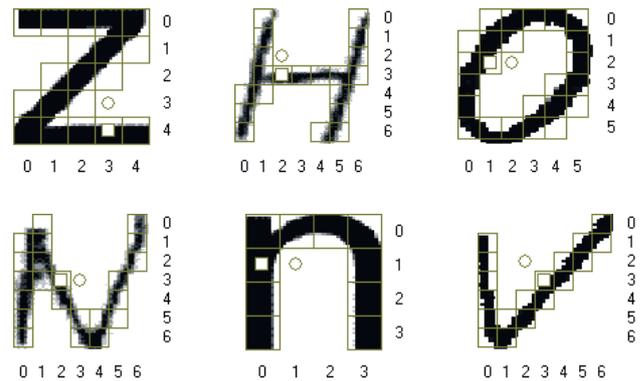
$$W = \text{pow}(x - X0, 2) + \text{pow}(y - Y0, 2),$$

которое далее сравнивается с предыдущим определенным минимальным значением веса синапса *minW* для данной текущей ячейки. При этом, если новое значение веса *W* меньше предыдущего минимального значения, то данное полученное значение *W* запоминается как минимальное:

```
if(W < minW) minW = W;
```

Таким образом, в функции *serch\_point* при просмотре всех контуров относительно текущей ячейки с координатами (*X0*, *Y0*) (на рис. 6 отмечена кружком) определяется минимальное значение веса синапса активной ячейки (на рис. 6 ближайшая активная ячейка отмечена белым квадратом), которое и принимается за значение веса синапса текущей ячейки (*X0*, *Y0*) таблицы весов.

Если в качестве меры близости используются формулы, которые выражают зависимость от всех активных ячеек изображения, то в этом случае при просмотре ячеек таблицы должно определяться уже не минимальное, а суммарное значе-



■ **Рис. 6.** Результаты определения ближайшей активной ячейки (отмечена белым квадратом) относительно текущей ячейки (отмечена белым кругом)

■ **Fig. 6.** Results of determining the nearest active cell (marked with a white square) relative to the current cell (marked with a white circle)

ние веса синапса, которое формируется в текущей ячейке (*X0*, *Y0*) под влиянием каждой активной ячейки изображения и вычисляется по ходу выявления активных ячеек.

В итоге, таким образом, вычисляется значение веса синапса для одной ячейки таблицы весов синапсов. Для вычисления значений весов синапсов всех остальных ячеек таблицы весов выполняется последовательное изменение номера текущей ячейки (*X0*, *Y0*), которое реализуется в двух встроенных циклах функции *Izmeneniye\_X0\_Y0()*, от ячейки (0, 0) до ячейки (*Nx*, *Ny*). После каждого изменения текущей ячейки в цикле запускается функция *serch\_point*, которая определяет значение веса синапса для этой выбранной текущей ячейки:

```
for (Y0 = 0; Y0 < Ny; Y0++)
{
for (X0 = 0; X0 < Nx; X0++)
{
serch_point();
if(X0 == 0) str = IntToStr(minW);
else str = str + «\t» + IntToStr(minW);
}
Form1->RichEdit1->Lines->Add(str); str = «»;
}
```

Здесь *Nx*, *Ny* — количество строк и столбцов таблицы весов (значение текстового поля *N dx* на рис. 4). Таким образом, вычисляется таблица весов, значения которых выводятся на экран при помощи текстового элемента *RichEdit*.

### Ускорение работы алгоритма

В приведенном выше алгоритме в функции *Izmeneniye\_X0\_Y0* выполняется перебор всех

ячеек таблицы выбранной размерности. Как выше показано, для текущей ячейки таблицы выполняется поиск активных ячеек по контурам также путем перебора всех ячеек таблицы весов. При этом время вычисления таблиц весов может быть значительно меньше, в случае если в предложенном алгоритме исключить рассмотрение ненужных контуров и, соответственно, ненужных ячеек таблиц весов. В частности, если сама текущая ячейка с координатами таблицы  $(X0, Y0)$  является активной, то нет необходимости просматривать все остальные ячейки. Программа в этом случае при помощи следующего кода вычисляет значение веса синапса для текущей ячейки и прерывает просмотр всех остальных контуров и ячеек изображения:

```
X1 = X0*dx; Y1 = Y0*dy;
if (X1 <-dx || Y1 <-dy || X1 >= W + dx || Y1 >=
= H + dy) goto M1;
Aktiv = scan();
if(Aktiv == 1) { NaytiMin(X0, Y0); return;}
```

Эта проверка реализуется до начала четырех циклов, выполняющих поиск активной ячейки по контурам таблицы весов. Кроме того, если минимальное значение веса синапса определяется на каком-то контуре, то нет также необходимости рассматривать все последующие контуры и, соответственно, ячейки таблицы в этих контурах. В этом случае требуется определить минимально достаточное количество просматриваемых контуров  $x$ , необходимых для просмотра последующих контуров (рис. 7). Поскольку максимальное удаление активной ячейки  $AC$  при текущем значении  $R_x$  от центра квадрата (текущей ячейки  $CC$ ) будет в вершинах квадрата, и если при этом для вычисления значения веса синапса используется метрическая мера квадрата евклидова расстояния, то для выявления значения  $x$  необходимо решить следующее неравенство:

$$(R_x + x)^2 < R_x^2 + R_x^2, \quad (5)$$

$$2R_x x + x^2 < R_x^2, \quad (6)$$

$$x^2 + 2R_x x - R_x^2 < 0. \quad (7)$$

Для решения неравенства определяем корни квадратного уравнения

$$x^2 + 2R_x x - R_x^2 = 0, \quad (8)$$

для чего определяем дискриминантное значение  $D$  и значения  $x_1, x_2$ :

$$D = \pm \sqrt{4R_x^2 - 4(-R_x^2)} = \pm \sqrt{8R_x^2} = \pm 2R_x \sqrt{2}; \quad (9)$$

$$x_1 = (-2R_x \sqrt{2} - 2R_x) / 2 = -R_x (\sqrt{2} + 1); \quad (10)$$

$$x_2 = (2R_x \sqrt{2} - 2R_x) / 2 = R_x (\sqrt{2} - 1). \quad (11)$$

Решением неравенств (5) и (7) является множество значений

$$-R_x (\sqrt{2} + 1) < x < R_x (\sqrt{2} - 1), \quad (12)$$

а максимальное необходимое значение

$$x_{\max} = R_x (\sqrt{2} - 1). \quad (13)$$

Отсюда определяем необходимое максимальное значение  $R'_x$  (см. рис. 7), которое может быть не больше  $R_x \sqrt{2}$ , что следует из выражения

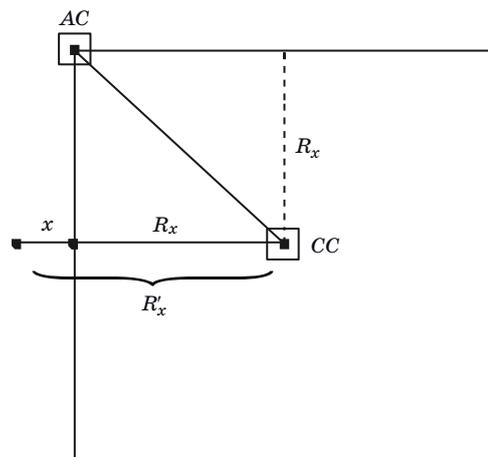
$$\begin{aligned} R'_x < x + R_x &= R_x (\sqrt{2} - 1) + R_x = \\ &= R_x \sqrt{2} \approx R_x \times 1,414. \end{aligned} \quad (14)$$

Поскольку значение  $\sqrt{2} < 1,5 = 3/2$ , то для упрощения вычисления можно определить условие проверки как

$$R'_x < 3R_x / 2. \quad (15)$$

При этом для исключения рассмотрения ненужных контуров необходимо запоминать текущее значение  $R_x$  при определении каждого нового минимального значения веса синапса  $\min W$  в процессе рассмотрения активных ячеек таблицы весов, что выполняется в функции *NaytiMin* с помощью следующего условия:

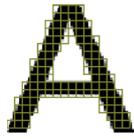
```
if(W < minW) {minW = W; RxMin = Rx;}
```



■ **Рис. 7.** Определение минимально достаточного количества просматриваемых контуров  $x$  после выявления активной ячейки  $AC$

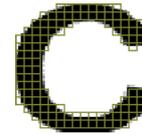
■ **Fig. 7.** Determination of  $x$  — the minimum sufficient number of contours viewed, after identifying the active cell  $AC$

а)



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	29	20	13	8	4	1	0	0	0	0	1	4	8	13	20	29
1	26	17	10	5	2	1	0	0	0	0	1	2	5	10	17	26
2	25	16	9	4	1	0	0	0	0	0	0	1	4	8	13	20
3	20	13	8	4	1	0	0	0	0	0	0	1	2	5	10	17
4	17	10	5	2	1	0	0	0	1	0	0	0	1	4	8	13
5	13	8	4	1	0	0	0	1	2	1	0	0	1	4	8	13
6	10	5	2	1	0	0	1	2	4	1	0	0	1	2	5	10
7	9	4	1	0	0	0	1	4	4	1	0	0	0	1	4	8
8	8	4	1	0	0	0	1	4	4	1	0	0	0	1	2	5
9	5	2	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	4
10	4	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2
11	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
12	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1
13	1	0	0	0	1	4	4	4	4	4	4	1	0	0	0	1
14	1	0	0	1	2	5	9	9	9	9	5	2	1	0	0	0
15	0	0	0	1	4	8	13	16	16	13	8	5	2	1	0	0

б)



	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0	8	5	2	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	4
1	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
2	2	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
3	1	0	0	0	0	0	1	2	4	4	2	1	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	1	2	5	8	8	5	2	1	0	0	0
5	0	0	0	0	1	4	5	8	13	13	8	5	2	1	0	1
6	0	0	0	1	2	5	10	13	18	18	13	8	5	2	1	2
7	0	0	0	1	4	8	13	20	25	25	18	13	8	5	4	5
8	0	0	0	1	4	9	16	25	34	32	25	18	13	10	9	9
9	0	0	0	1	4	8	13	20	25	25	18	13	8	5	4	4
10	0	0	0	1	2	5	10	13	16	16	13	8	5	2	1	1
11	0	0	0	0	1	4	5	8	9	9	8	5	2	1	0	0
12	0	0	0	0	1	1	2	4	4	4	2	1	0	0	0	0
13	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
14	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
15	5	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2

■ **Рис. 8.** Таблицы весов для печатных символов «А» (а) и «С» (б) с размерностью 16×16 для нейронов нулевого слоя  
 ■ **Fig. 8.** Tables of scales for printed characters “A” (a) and “C” (b) with a dimension of 16×16 for neurons of the zero layer

а в функции *serch\_point* после увеличения значения  $R_x$  выполняется проверка условия

$R_x = R_y = R_y + 1;$   
*if*( $R_x > R_{xMin} * 3/2$ ) *return*;

Если это условие выполняется, то выполняется выход из функции *serch\_point*, а в функции *Izmeneniye\_X0\_Y0* выполняется выбор следующей текущей ячейки.

Нужно сказать, что если используется другая метрическая мера близости, то выражение (5) будет иным, и, соответственно, значения  $x$  будут определяться по-иному.

На рис. 8, а и б приведены таблицы весов для эталонных печатных символов «А» и «С» с размерностью 16 строк на 16 столбцов. Данные таблицы соответствуют таблицам весов синапсов нейронов нулевого слоя. Из рисунка можно также видеть, что активные ячейки таблиц имеют значения весов, равные 0. Данные таблицы весов были вычислены с использованием метрической меры близости — квадрата евклидова расстояния. Если используются другие меры близости, то значения весов в таблицах будут другими.

Окончание следует

### Литература

1. Азаров И. С., Петровский А. А. Формирование персональной модели голоса диктора с универсальным фонетическим пространством признаков на основе искусственной нейронной сети. *Труды СПИИРАН*, 2014, № 5, с. 12–15. <https://doi.org/10.15622/sp.36.8>
2. Будко Р. Ю., Старченко И. Б. Создание классификатора мимических движений на основе анализа электромиограммы. *Труды СПИИРАН*, 2016, № 3 (46), с. 76–89. <https://doi.org/10.15622/sp.46.7>
3. Осипов В. Ю., Никифоров В. В. Возможности рекуррентных нейронных сетей с управляемыми элементами по восстановлению потоков кадров. *Информационно-управляющие системы*, 2019, № 5, с. 10–17. [doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-10-17](https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-10-17)
4. Ле Т. Ч. Сравнение нейронной сети СМАС и многослойной нейронной сети в задаче обнаружения DoS-атак. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2016, № 7, с. 65–69.
5. Катасев А. С., Катасева Д. В., Кирпичников А. П. Распознавание рукописных символов на базе искусственной нейронной сети. *Вестник технологического университета*, 2018, т. 18, № 11, с. 173–176.
6. Дрокин И. С. Об одном алгоритме последовательной инициализации весов глубоких нейронных сетей и обучении ансамбля нейронных сетей. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Прикладная математика. Информатика. Процессы управления*, 2016, № 4, с. 66–74.
7. Лещенко Ю. Е. Ассоциативно-вербальные сети и искусственные нейронные сети как метод моделирования ментального лексикона индивида. *Глобальный научный потенциал*, 2014, № 10 (43), с. 154–156.

8. Гафуров Д. О., Гафуров О. М., Конторович В. А. Интерпретация данных геофизических исследований Талаканского нефтегазоконденсатного месторождения обучаемыми нейронными сетями, прогноз строения Осинского горизонта. *Технологии сейсмо-разведки*, 2014, № 4, с. 85–92.
9. Владимирова Д. Б., Кокшарова А. А. Прогнозирование финансовых рынков искусственными нейронными сетями. *Наука и бизнес: пути развития*, 2014, № 3 (33), с. 42–46.
10. Синчук О. Н., Бойко С. Н. Нейронные сети и управление процессом управления электроснабжением объектов от комбинированных электрических сетей. *Технічна електродинаміка*, 2014, № 5, с. 53–55.
11. Шведов В. А., Ильин Е. С. Распознавания дорожных знаков сверточными нейронными сетями различной структуры, с применением графических процессоров CUDA. *Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Шестой международной научно-практической конференции*, Иркутск, 30 сентября–03 октября 2015 г., 2015, т. 2, с. 282–286.
12. Туровский Я. А., Кургалин С. Д., Адаменко А. А. Сравнительный анализ программных пакетов для работы с искусственными нейронными сетями. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Системный анализ и информационные технологии*, 2016, № 1, с. 161–168.
13. Лукина А. С., Некрасов М. В., Пакман Д. Н. Обработка телеметрической информации космического аппарата нейронными сетями на основе теории фильтров Калмана. *Тенденции развития науки и образования*, 2016, № 13-1, с. 43–45.
14. Стасюк В. В. Прогнозирование чувствительности к удару взрывчатых веществ нейронными сетями с предварительной группировкой данных. *Фундаментальные исследования*, 2015, № 12–6, с. 1139–1143.
15. Хусайнов А. Т. Оценка прогнозируемости системы поддержания пластового давления нейронными сетями на нефтяных месторождениях. *Академический журнал Западной Сибири*, 2016, т. 12, № 3 (64), с. 48.
16. Бондарко В. М., Бондарко Д. В., Солнушкин С. Д., Чихман В. Н. Моделирование результатов психофизических экспериментов нейронными сетями. *Нейрокомпьютеры: разработка, применение*, 2018, № 5, с. 31–33.
17. Sedov V. A., Sedova N. A. Modelling collision avoidance actions in closest approach zones by means of neural networks. *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 104–111.
18. Peng Shi, Fanbiao Li, Ligang Wu. Neural network-based passive filtering for delayed neutral-type semi-Markovian jump systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017, vol. 28, iss. 9, pp. 2101–2114.
19. Chenggang Yan, Hongtao Xie, Dongbao Yang, Jian Yin, Yongdong Zhang, Qionghai Dai. Supervised hash coding with deep neural network for environment perception of intelligent vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 19, iss. 1, pp. 284–295.
20. Anusha N., Gregory K., Ronald S. F., Sergey Levine. Neural network dynamics for model-based deep reinforcement learning with model-free fine-tuning. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, Australia, 2018, pp. 156–162.
21. Wei He, Yuhao Chen, Zhao Yin. Adaptive neural network control of an uncertain robot with full-state constraints. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, vol. 46, iss. 3, pp. 620–629.
22. Song Han, Xingyu Liu, Huizi Mao, Jing Pu, Arda-van Pedram, Mark A. H., William J. Efficient inference engine on compressed deep neural network. *2016 ACM/IEEE 43rd Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, Seoul, South Korea, 2016, pp. 304–309.
23. William Chan, Navdeep Jaitly, Quoc Le, Oriol Vinyals. Listen, attend and spell: A neural network for large vocabulary conversational speech recognition. *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Shanghai, China, 2016, pp. 107–115.
24. Andre Esteva, Brett Kuperl, Roberto A. Novoa, Justin Ko, Susan M. Swetter, Helen M. Blau, Sebastian Thrun. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 2017, vol. 542, pp. 115–118.
25. Круглов В. В., Борисов В. В. *Искусственные нейронные сети. Теория и практика*. М., Горячая линия–Телеком, 2001. 328 с.
26. Geidarov P. Sh. Neural networks on the basis of the sample method. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, pp. 203–210. <https://doi.org/10.3103/S0146411609040063>
27. Гейдаров П. Ш. Алгоритм реализации метода ближайшего соседа в многослойном перцептроне. *Труды СПИИРАН*, 2017, т. 51, с. 123–151. <https://doi.org/10.15622/sp.51.6>
28. Биргер И. А. *Техническая диагностика*. М., Машиностроение, 1978. 240 с.

UDC 007.519.7

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-20-30

**Algorithm for calculating synapse weights of the first layer of a neural network on the base of metric recognition methods. Part 1**P. Sh. Geidarov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, orcid.org/0000-0002-3881-0629, plbaku2010@gmail.com<sup>a</sup>Azerbaijan National Academy of Sciences Institute of Control Systems, 9, Bahtijar Vagabzade St., Az 1141, Baku, Azerbaijan

**Introduction:** Metric recognition methods make it possible to preliminarily and strictly determine the structures of feed-forward neural networks, namely, the number of neurons, layers, and connections based on the initial parameters of the recognition problem. They also make it possible to analytically calculate the synapse weights of network neurons based on metric expressions. The setup procedure for these networks includes a sequential analytical calculation of the values of each synapse weight in the weight table for neurons of the zero or first layer, which allows us to obtain a working feed-forward neural network at the initial stage without the use of training algorithms. Then feed-forward neural networks can be trained by well-known learning algorithms, which generally speeds up the process of their creation and training. **Purpose:** To determine how much time the process of calculating the values of weights requires and, accordingly, how reasonable it is to preliminarily calculate the weights of a feed-forward neural network. **Results:** An algorithm is proposed and implemented for the automated calculation of all values of synapse weight tables for the zero and first layers as applied to the task of recognizing black-and-white monochrome symbol images. The proposed algorithm is described in the Builder C++ software environment. The possibility of optimizing the process of calculating the weights of synapses in order to accelerate the entire algorithm is considered. The time spent on calculating these weights for different configurations of neural networks based on metric recognition methods is estimated. Examples of creating and calculating synapse weight tables according to the considered algorithm are given. According to them, the analytical calculation of the weights of a neural network takes just seconds or minutes, being in no way comparable to the time necessary for training a neural network. **Practical relevance:** Analytical calculation of the weights of a neural network can significantly accelerate the process of creating and training a feed-forward neural network. Based on the proposed algorithm, we can implement one for calculating three-dimensional weight tables for more complex images, either black-and-white or color grayscale ones.

**Keywords** — neural networks, weight and threshold values, neurocomputer, learning algorithms, programming of neural networks.

**For citation:** Geidarov P. Sh. Algorithm for calculating synapse weights of the first layer of a neural network on the base of metric recognition methods. Part 1. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 20–30 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-20-30

**References**

- Azarov I. S., Petrovskij A. A. Training personal voice model of a speaker with unified phonetic space of features using artificial neural network. *SPIIRAS Proceedings*, 2014, no. 5, pp. 128–15 (In Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.36.8>
- Budko R. Yu., Starchenko I. B. Creation of the facial gestures classifier based on the electromyogram analysis. *SPIIRAS Proceedings*, 2016, no. 3 (46), pp. 76–89 (In Russian). <https://doi.org/10.15622/sp.46.7>
- Osipov V. Yu., Nikiforov V. V. Recurrent neural networks with controlled elements in restoring frame flows. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 5, pp. 10–17 (In Russian). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2019-5-10-17>
- Le T. Ch. The comparison of neural network CMAC and multilayer neural network in the task of detection of DoS attacks. *Neurokomputers*, 2016, no. 7, pp. 65–69 (In Russian).
- Katasev A. S., Kataseva D. V., Kirpichnikov A. P. Handwritten character recognition based on artificial neural network. *Vestnik tehnologicheskogo universiteta*, 2018, vol. 18, no. 11, pp. 173–176 (In Russian).
- Drokin I. S. About an algorithm for consistent weights initialization of deep neural networks and neural networks ensemble learning. *Vestnik of Saint Petersburg University Applied Mathematics. Computer Science. Control Processes*, 2016, no. 4, pp. 66–74 (In Russian).
- Leshhenko Ju. E. Associative-verbal networks and artificial neural networks as a method of mental lexicon modeling. *Global Scientific Potential*, 2014, no. 10 (43), pp. 154–156 (In Russian).
- Gafurov D. O., Gafurov O. M., Kontorovich V. A. Interpretation of data from geophysical studies of the Talakan oil and gas condensate field by trained neural networks, forecast of the structure of the Osinsky horizon. *Seismic Technologies*, 2014, no. 4, pp. 85–92 (In Russian).
- Vladimirova D. B., Koksharov A. A. Financial Markets Forecasting Using Artificial Neural Networks. *Science and Business: Ways of Development*, 2014, no. 3 (33), pp. 42–46 (In Russian).
- Sinchuk O. N., Bojko S. N. Neural networks and process control of power supply of objects from combined electric networks. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2014, no. 5, pp. 53–55 (In Russian).
- Shvedov V. A., Il'in E. S. Recognition of road signs by convolutional neural networks of various structures, using cuda GPUs. *Materialy Shestoy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona"* [Proc. 6<sup>th</sup> Int. Sump. "Transport infrastructure of the Siberian region"], 2015, vol. 2, pp. 282–286 (In Russian).
- Turovskij Ya. A., Kurgalin S. D., Adamenko A. A. Comparative analysis of software packages for working with artificial neural networks. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Sistemnyj analiz i informacionnye tekhnologii*, 2016, no. 1, pp. 161–168 (In Russian).
- Lukina A. S., Nekrasov M. V., Pakman D. N. Processing telemetric information of a spacecraft by neural networks based on the theory of Kalman filters. *Tendencii razvitiya nauki i obrazovaniya*, 2016, no. 13-1, pp. 43–45 (In Russian).
- Stasjuk V. V. Prediction of the explosives impact sensitivity by neural networks with preliminary grouping data. *Fundamental Research*, 2015, no. 12-6, pp. 1139–1143 (In Russian).
- Husainov A. T. Predictability assessment of a reservoir pressure maintenance system by neural networks in oil fields. *Academic Journal of West Siberia*, 2016, vol. 12, no. 3 (64), p. 48 (In Russian).
- Bondarko V. M., Bondarko D. V., Solnushkin S. D., Chihman V. N. Modeling the results of psychophysical experiments by neural networks. *Neurokomputers*, 2018, no. 5, pp. 31–33 (In Russian).
- Sedov V. A., Sedova N. A. Modelling collision avoidance actions in closest approach zones by means of neural networks. *Asia-Pacific Journal of Marine Science & Education*, 2014, vol. 4, no. 2, pp. 104–111.
- Peng Shi, Fanbiao Li, Ligang Wu. Neural network-based passive filtering for delayed neutral-type semi-Markovian jump systems. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2017, vol. 28, iss. 9, pp. 2101–2114.
- Chenggang Yan, Hongtao Xie, Dongbao Yang, Jian Yin, Yongdong Zhang, Qionghai Dai. Supervised hash coding with deep neural network for environment perception of intelligent vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2018, vol. 19, iss. 1, pp. 284–295.

20. Anusha Nagabandi, Gregory Kahn, Ronald S. Fearing, Sergey Levine. Neural network dynamics for model-based deep reinforcement learning with model-free fine-tuning. *2018 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, Brisbane, Australia, 2018, pp. 156–162.
21. Wei He, Yuhao Chen, Zhao Yin. Adaptive neural network control of an uncertain robot with full-state constraints. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 2016, vol. 46, iss. 3, pp. 620–629.
22. Song Han, Xingyu Liu, Huizi Mao, Jing Pu, Ardavan Pedram, Mark A. Horowitz, William J. Efficient inference engine on compressed deep neural network. *2016 ACM/IEEE 43rd Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA)*, Seoul, South Korea, 2016, pp. 304–309.
23. William Chan, Navdeep Jaitl, Quoc Le, Oriol Vinyals. Listen, attend and spell: A neural network for large vocabulary conversational speech recognition. *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Shanghai, China, 2016, pp. 107–115.
24. Andre Esteva, Brett Kuprel, Roberto A. Novoa, Justin Ko, Susan M. Swetter, Helen M. Blau, Sebastian Thrun. Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 2017, vol. 542, pp. 115–118.
25. Kruglov V. V., Borisov V. V. *Iskusstvennye neyronnye seti. Teoriya i praktika* [Artificial neural networks. Theory and practice]. Moscow, Goriachaia liniia-Telekom Publ., 2001. 328 p. (In Russian).
26. Geidarov P. Sh. Neural networks on the basis of the sample method. *Automatic Control and Computer Sciences*, 2009, vol. 43, pp. 203–210. <https://doi.org/10.3103/S0146411609040063>
27. Geidarov P. Sh. An algorithm implementing the method of the nearest neighbor in a multi-layer perceptron. *SPIIRAS Proceedings*, 2017, vol. 51, pp. 123–151 (In Russian).
28. Birger I. A. *Tekhnicheskaya diagnostika* [Technical diagnostics]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 240 p. (In Russian).

---

### УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

---

UDC 621.396.96

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-31-36

## Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars

A. P. Shepeta<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0003-0179-0166](https://orcid.org/0000-0003-0179-0166), [alex@shepeta.com](mailto:alex@shepeta.com)

V. A. Nenashev<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0001-5285-2051](https://orcid.org/0000-0001-5285-2051)

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

**Introduction:** The search for physical objects in a given area is often performed in automatic mode using small unmanned aerial vehicles equipped with radars. Airborne radar antennas, due to size restrictions, have a small aperture and, accordingly, a wide directional pattern, decreasing the accuracy of determining the angular coordinates of the objects. The increase in the angular coordinate estimation accuracy leads to the increase in the informativeness of such automatic search systems and, consequently, to the increase in the efficiency of their practical use. **Purpose:** Developing a technique for calculating the parameters of a two-position radar system consisting of two small airborne radars placed on small unmanned aerial vehicles, in order to increase the accuracy of determining the angular coordinates of radiocontrast physical objects. **Results:** An algorithm is proposed for integrating the data about the coordinates of physical objects detected in the joint coverage area of a two-position system of small airborne radars. It allows you, depending on the observation conditions, to increase the accuracy of determining the azimuthal coordinates by an order of magnitude or more. The aircraft trajectories are calculated on which the accuracy grows, and those on which there is almost no gain in accuracy. **Practical relevance:** Such two-position airborne small radars can be used in automated systems in order to detect physical object such as people in disaster areas, as well as in systems of collecting and processing data from sensors used for monitoring the state of the environment or man-made objects.

**Keywords** – two-position system, airborne radars, coordinate measurement, accuracy characteristics, small aerial vehicles, antenna aperture, directional pattern, integration.

**For citation:** Shepeta A. P., Nenashev V. A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 31–36. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-31-36

### Introduction

Recently much attention has been paid to the use of unmanned aerial vehicles (UAV) in various spheres of human activity, such as ecological monitoring, geological exploration, cartography, sensor data reading, searching for people in disaster areas, etc. [1–11]. In all these cases, UAVs are used as a part of a more complex system for automated or automatic execution of the above tasks. The first-priority tasks are those of detecting physical objects, sensors or people in a given search area, determining their coordinates with a rather high accuracy [12–15].

The most common onboard equipment of such UAVs are small airborne radars (AR) which determine the range and azimuth of the detected objects in a polar coordinate system associated with the UAV. The peculiarity of small UAV onboard equipment is that the antenna systems of such AR have a small size and, hence, a wide directional pattern, which does not allow individual UAVs to achieve high accuracy in determining the direction to the detected object.

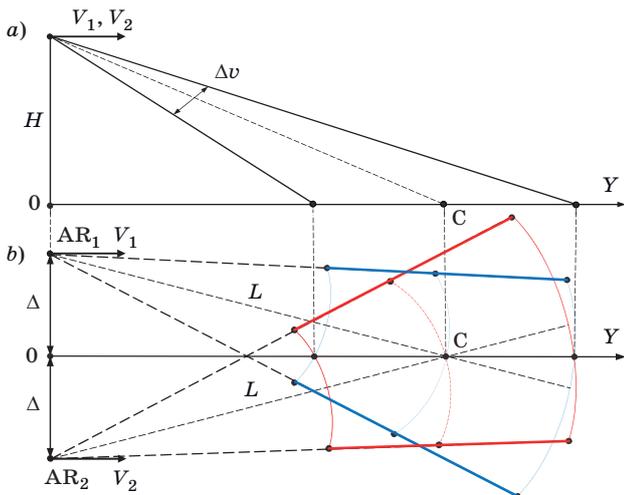
This drawback can be overcome by using the idea of a multistatic radar [16–18], having at least two split radio data sources. In particular, two-position systems [19–21] with two UAVs are the simplest and

most acceptable way of overcoming the limitations of a unistatic small AR. This article discusses the possibilities of a two-position AR complex in terms of improving the accuracy of determining the azimuth-range coordinates of physical objects detected in the joint coverage area of small UAVs combined in a two-position small radar system.

### Statement of the problem

Two small UAVs equipped with identical small radars which are united (during the data exchange) into a two-position radar system are flying at the same altitudes  $H$ , with the same speeds  $V$ , along parallel trajectories separated by the distance  $D = 2\Delta$ , searching for physical objects in their joint coverage area whose center is at the same distance  $L$  from each UAV. Fig. 1 illustrates the described situation.

The antennas are directed towards the center (C) of the joint coverage area. The antenna beam width at the half-power level is equal to  $\Delta\varphi$ . Let us assume that  $H/L \ll 1$ , because in practice this inequality is most often true, as UAVs usually fly at low altitudes. A simplification like this is not essential; all the conclusions are still valid without this restriction, but it allows us to reason in planimetric terms, significantly simplifying all the expressions below.



■ Fig. 1. Joint coverage area of a two-position small radar

A planimetric illustration with these limitations is shown in Fig. 2, demonstrating the range tracks of each AR. When each radar operates in a standalone mode, the coordinates of the detected physical object (PO) are estimated independently. In this case, the range to the object is determined by the number of the corresponding range track, and the azimuthal coordinate coincides with the direction of the maximum of the directional pattern [20].

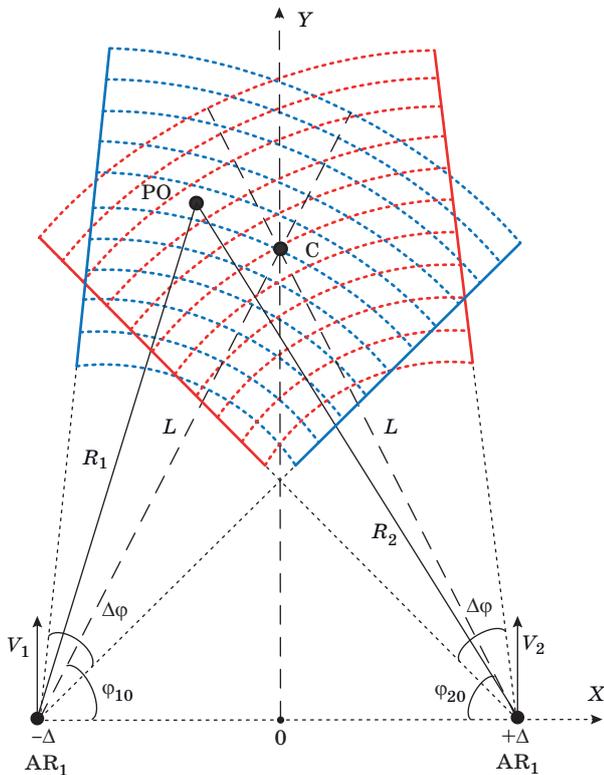
Thus, in the case of standalone operation of a radar, the accuracy of estimating the range to a radiocon-

trast object is determined mainly by the range track width, depending on the probe pulse duration. The accuracy of the azimuthal coordinate estimation is determined by the actual width of the directional pattern of the UAV antenna system [22–26]. Therefore, in the case of standalone operation, the range to the PO can be determined with the required accuracy (by changing the duration of the probe pulses), but the azimuthal coordinates are determined too roughly, with the actual accuracy equal to  $\Delta\varphi/2$ . Narrowing the width of the directional pattern is difficult, firstly, due to the size limitations on a UAV antenna, and secondly, due to the reduction of the search area size.

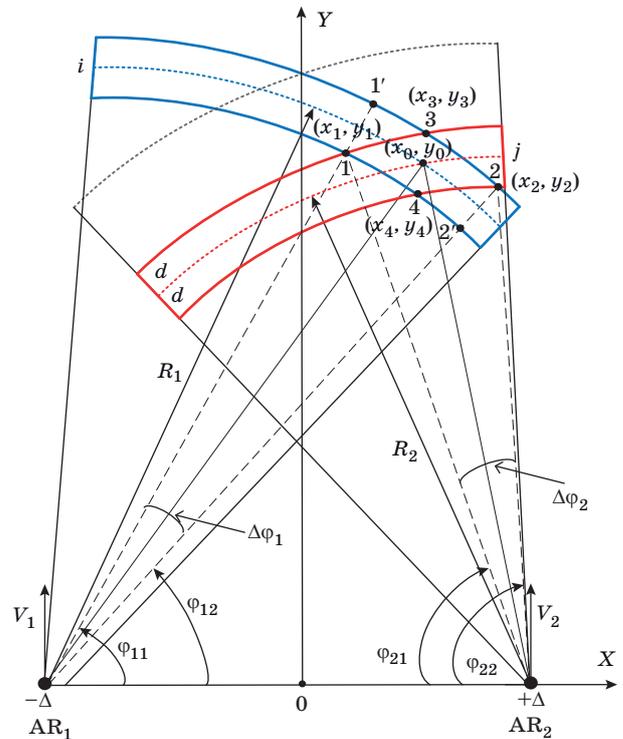
Combining two UAVs into a single two-position radar system in which the radars exchange data [20, 27–30] allows you to improve the accuracy of determining the azimuthal coordinates of a PO detected in the joint coverage area.

### Interval estimation of the detected object azimuth in a two-position system of small radars

In this subsection, we use the notation and formulas obtained in [20]. Let us assume that two  $AR_1$  and  $AR_2$  of a two-position system have detected, in their joint coverage area, a physical object at the distance  $R_1$  from  $AR_1$  and distance  $R_2$  from  $AR_2$ , as shown in Fig. 3.



■ Fig. 2. Resolution elements of a two-position small radar



■ Fig. 3. Interval estimation for the azimuth of the  $(i, j)$ -th resolution element

This physical object is located in the  $(i, j)$ -th resolution element of the system highlighted in Fig. 3, on the  $i$ -th track of the  $AR_1$  range and  $j$ -th track of the  $AR_2$  range. The figure shows the distances to the middle of the range tracks, each the size of  $d_0 = 2d = \tau_{im}c/2$ , as well as the coordinates of the center  $(x_0, y_0)$  and the boundary points of the resolution element  $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ . In [20], the coordinates of the boundary points of the resolution element are obtained:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{R_1^2 - R_2^2}{2D} = \frac{(R_1 - R_2)(R_1 + R_2)}{2D}, \\ y_0 = \frac{1}{2D} \sqrt{[D^2 - (R_1 - R_2)^2][ (R_1 + R_2)^2 - D^2 ]}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} x_1 = x_0 - \frac{d}{D}(R_1 + R_2), \\ y_1 = y_0 \sqrt{\left[1 + \frac{d_0}{D - (R_1 - R_2)}\right] \left[1 - \frac{d_0}{D + (R_1 - R_2)}\right]}; \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} x_2 = x_0 + \frac{d}{D}(R_1 + R_2), \\ y_2 = y_0 \sqrt{\left[1 - \frac{d_0}{D - (R_1 - R_2)}\right] \left[1 + \frac{d_0}{D + (R_1 - R_2)}\right]}. \end{cases} \quad (3)$$

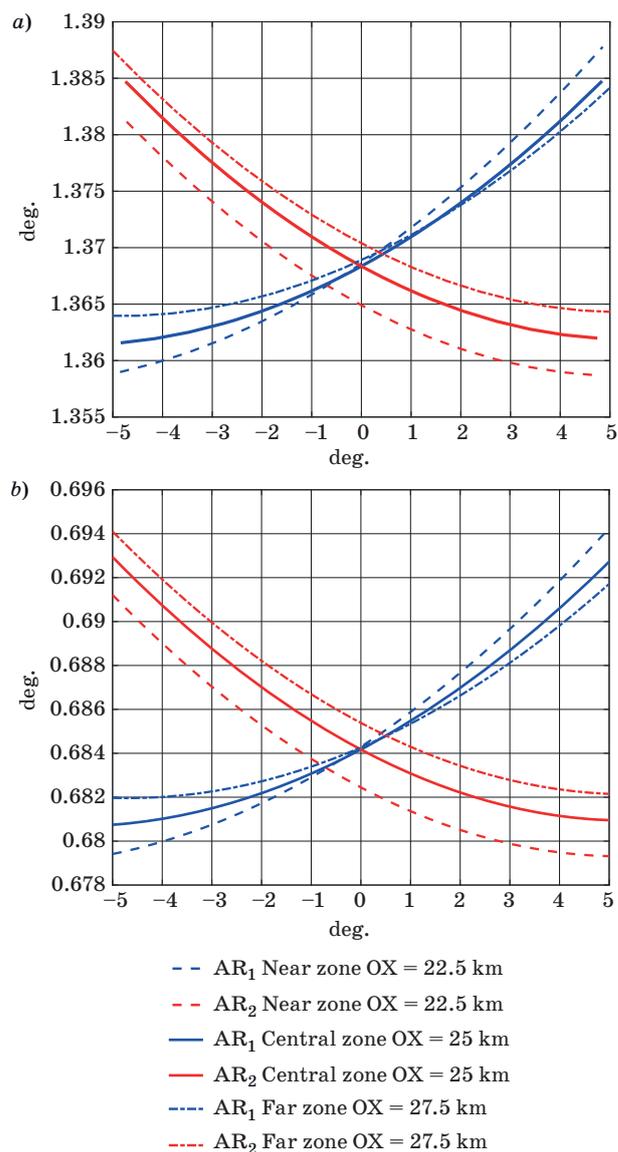
From expressions (2) and (3), we can directly derive the angular size of the  $(i, j)$ -th resolution element  $\Delta\varphi_1$  for  $AR_1$  and  $\Delta\varphi_2$  for  $AR_2$  [20]:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1 = \arctg(\operatorname{tg}(\varphi_{11} - \varphi_{21})) = \\ = \arctg \frac{y_1(\Delta + x_2) - y_2(\Delta + x_1)}{y_1 y_2 + (\Delta + x_1)(\Delta + x_2)}, \\ \Delta\varphi_2 = \arctg(\operatorname{tg}(\varphi_{22} - \varphi_{12})) = \\ = \arctg \frac{y_2(\Delta - x_1) - y_1(\Delta - x_2)}{y_1 y_2 + (\Delta - x_1)(\Delta - x_2)}. \end{cases} \quad (4)$$

Expressions (4) are what actually determines the angular resolution of this two-position system, because in the considered situation they actually are interval estimations of the azimuthal coordinates of the object detected in the  $(i, j)$ -th resolution element.

### Dependence of the resolution on the probe pulse duration and direction to the object

Figures 4, *a* and *b* show the dependences of resolutions  $\Delta\varphi_1$  and  $\Delta\varphi_2$  of a two-position system of small AR on the direction to the detected object, for two durations of the probe pulse and three range tracks: the central one passing through the center of the joint coverage area, the close one spaced away from the coverage area center by  $-2500$  meters, and the



■ Fig. 4. Dependence of two-position system resolution on the direction to the object for  $\Delta\varphi = 12.5^\circ$  and  $D = 5$  km: *a* —  $\tau_{im} = 0.4 \mu\text{s}$ ; *b* —  $\tau_{im} = 0.2 \mu\text{s}$

far one spaced away from the coverage area center by  $+2500$  meters.

The direction to the object is the direction to the center of the resolution element where the object was detected, i. e. the direction to the point  $(x_0, y_0)$  calculated with relation to the maximum of the directional pattern of the antenna system of  $AR_1$  or  $AR_2$ , respectively. This direction for the resolution elements of the joint coverage area is calculated using the expressions (1).

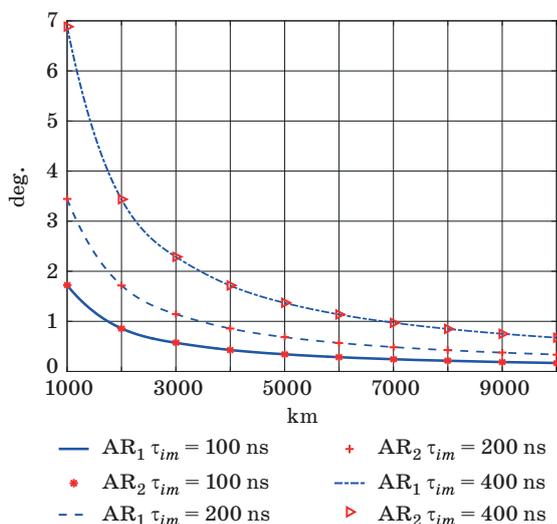
It follows from the above dependences that, within the joint coverage area, the resolution along the azimuthal coordinate is practically independent of the direction to the resolution element, but rather strongly depends on the probe pulse duration.

### The dependence of the resolution on the distance between the aircraft

To estimate the resolution depending on the distance  $D$  between the AR, let us consider the case when the distance to the center of the coverage zone on the  $OX$  axis remains constant and equal to 25 km, and the distance  $D$  increases from 1 to 10 km.

Figure 5 shows the dependences of the resolution of elements located in the middle of the coverage zone on the distance between the aircraft on which the radars are placed.

It follows from these curves that the distance between the radars of a two-position system plays a significant role in increasing the system resolu-



■ Fig. 5. Dependence of two-position system resolution on the distance between the radars and the probe pulse duration  $\tau_{im}$

tion in angular coordinates. When the distance is equal to zero, the curves approach  $\Delta\varphi$ , the width of the directional pattern. This is perfectly consistent with the physical representation, as in this case our location becomes unistatic.

### Conclusion

In order to increase the efficiency of using UAVs equipped with small radar systems for automatic or automated detection of physical objects in a given area, it is important to improve the accuracy of determining the coordinates of the detected objects. The azimuthal coordinates are especially difficult to determine. We can make it easier by using multistatic small radars, the simplest of which are two-position airborne ones.

The article provides analytical expressions and curves which can help you choose the best probe pulse duration and the optimal aircraft flight trajectory, increasing the resolution by an order of magnitude or more compared to a single-radar system with the same equipment.

The obtained characteristics of a two-position radar system make it possible to choose the appropriate parameters of small AR systems and UAV flight paths which provide a preset accuracy for the coordinates of detected objects when solving problems related to rapid search for people in a disaster area, or search for sensors during environmental monitoring and assessment of the state of man-made objects.

### Financial support

The reported study was funded by a grant of Russian Science Foundation (project No. 19-79-00303).

### References

- Richard Klemm, Ulrich Nickel, Christoph Gierull, Pierfrancesco Lombardo, Hugh Griffiths and Wolfgang Koch (Eds.). *Novel Radar Techniques and Applications*. Vol. 1. *Real Aperture Array Radar, Imaging Radar, and Passive and Multistatic Radar*. SciTech Publishing, 2017. 952 p.
- Sorokin A. V., and Shepeta D. A. Time-frequency approach to anti-collision signal processing for RFID SAW tags. *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, 2019, pp. 1–4.
- Sorokin A. V., Shepeta A. P., Nenashev V. A., Wattimena G. M. Comparative characteristics of anti-collision processing of radio signal from identification tags on surface acoustic waves. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 1, pp. 48–56. doi:10.31799/1684-8853-2019-1-48-56
- Wattimena M. G., Nenashev V. A., Sentsov A. A., Shepeta A. P. On-board unlimited aircraft complex of environmental monitoring. *2018 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, 2018, pp. 1–5. doi:10.1109/WECONF.2018.8604382
- Toro G. F., Tsourdos A. *UAV sensors for environmental monitoring*. Belgrade, MDPI, 2018. 661 p.
- Yang R., Li H., Zhang P., Tan L., Gao X., Kang X. *High-Resolution Microwave Imaging*. Springer, 2018. 552 p.
- Radiolokacionnye sistemy aviacionno-kosmicheskogo monitoringa zemnoj poverhnosti i vozdušnogo prostranstva* [Radar systems for aerospace monitoring of the earth's surface and airspace]. V. S. Verba, B. G. Tatarskiy, A. R. Ilchuk, et al

- (Eds.). Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 576 p. (In Russian).
8. Kim H. G., Park J.-S., Lee D.-H. Potential of unmanned aerial sampling for monitoring insect populations in rice fields. *Florida Entomologist*, 2018, vol. 101, pp. 330–334.
  9. Chen K.-S. *Principles of Synthetic Aperture Radar Imaging. A System Simulation Approach*. CRC Press, 2016. 217 p.
  10. Kondratenkov G. S., Frolov A. Yu. Radio vision in the front viewing area of an airborne radar with a synthesized aperture of the antenna. *Radioengineering*, 2004, no. 1, pp. 47–49 (In Russian).
  11. Bhattacharyya S., Mukherjee A., Bhaumik H., Das S., Yoshida K. (eds.) *Recent Trends in Signal and Image Processing*. Singapore, Springer, 2019. 224 p.
  12. Aleshkin A. P., Vladimirov V. V., Nevzorov V. I., Savochkin P. V. Method for increasing the resolution and accuracy of radar angular measurements based on sequential spatio-temporal processing of received signals. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 37–45 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-37-45
  13. Lagovsky B. A. Superresolution, based on aperture synthesis with smart antennas. *Antennas*, 2013, no. 6 (193), pp. 9–16 (In Russian).
  14. Verba V. S. *Otsenivaniye dal'nosti i skorosti v radiolokatsionnykh sistemakh* [Estimation of range and speed in radar systems]. Part 3. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2010. 472 p. (In Russian).
  15. Verba V. S. *Obnaruzheniye nazemnykh ob'yektov. Radiolokatsionnyye sistemy obnaruzheniya i navedeniya vozdushnogo bazirovaniya* [Detection of ground objects. Radar-based airborne detection and guidance systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 360 p. (In Russian).
  16. Zaitsev D. V. *Mnogopozitsionnyye radiolokatsionnyye sistemy. Metody i algoritmy obrabotki informatsii v usloviyakh pomekh* [Multipoint radar systems. Methods and algorithms for information processing in terms of interference]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2007. 96 p. (In Russian).
  17. Podoplekin Y. F., Nenashev V. A., Shepeta A. P. *A method of synthesizing a front antenna aperture earth's surface except the blind zones in the front zone via rocker radar system*. The patent for the invention no. 2560082. The priority of the invention, the 01/09/2014.
  18. Khomyakov A. V., Filipchenkov V. I., Mamon Yu. I. Algorithms for joint trajectory processing in a multi-position radar complex. *Bulletin of Tula State University: Technical Sciences*, 2016, no. 2, pp. 305–314 (In Russian).
  19. Nenashev V. A., Sentsov A. A., and Shepeta A. P. Formation of radar image the Earth's surface in the front zone review two-position systems airborne radar. *2019 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, 2019, pp. 1–5.
  20. Nenashev V. A., Kryachko A. F., Shepeta A. P., Burylev D. A. Features of information processing in the onboard two-position small-sized radar based on UAVs. *SPIE Future Sensing Technologies*, Tokyo, Japan, 2019, pp. 111970X-1–111970X-7.
  21. Korzhavin G. A., Nenashev V. A., Shepeta A. P., Podoplekin Yu. F., Davinchuk A. G. (RF) *The method of location of targets in the front viewing areas of airborne radar stations of the on-off radar system*. The patent for the invention no. 2019108828. The priority of the invention, the 26/03/2019.
  22. Verba V. S. *Aviatsionnyye komplekсы radiolokatsionnogo dozora i navedeniya. Printsipy postroyeniya, problemy razrabotki i osobennosti funktsionirovaniya* [Aviation complexes of the radar watch and guidance. Principles of construction, problems of development and features of functioning]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2014. 528 p. (In Russian).
  23. Dudnik P. I., Kondratenkov G. S., Tatarsky B. G., Ilchuk A. R., Gerasimov A. A. *Aviatsionnyye radiolokatsionnyye komplekсы i sistemy* [Aviation radar systems and systems]. Moscow, VVIA im. prof. N. E. Zhukovskogo Publ., 2006. 1112 p. (In Russian).
  24. Kondratenkov G. S. *Aviatsionnyye sistemy radiovideniya* [Aviation systems radio vision]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 648 p. (In Russian).
  25. Sentsov A. A., Polyakov V. B., Dmitriev V. F. Registration of parameters of movement of the aircraft measuring point at parallel placement of mobile radar stations of a complex of external measurements. *Issues of Radio Electronics*, 2019, no. 2, pp. 20–25 (In Russian).
  26. Bakulev P. A. *Radiolokatsionnye sistemy* [Radar systems]. Moscow, Radiotekhnika Publ., 2015. 440 p. (In Russian).
  27. Fourati H. (ed.). *Multisensor Data Fusion: From Algorithms and Architectural Design to Applications*. CRC Press, 2016. 639 p. (Devices circuits and systems).
  28. Richard Klemm (ed.). *Novel Radar Techniques and Applications*. Vol. 2. *Waveform Diversity and Cognitive Radar, and Target Tracking and Data Fusion*. London, Scitech Publishing, 2017. 553 p.
  29. Parshutkin A. V., Levin D. V., Galandzovskiy A. V. Simulation model of radar data processing in a station network under signal-like interference. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2019, no. 6, pp. 22–31 (In Russian). doi:10.15217/issn1684-8853.2019.6.22
  30. Luchkov N. V. An analysis of radar data multiplexing, time and spatial bindings. *Automated Control Systems*, 2015, no. 1 (39), pp. 21–26 (In Russian).

УДК 621.396.96

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-31-36

**Точностные характеристики определения координат объектов в двухпозиционной системе малогабаритных бортовых РЛС**А. П. Шепета<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, orcid.org/0000-0003-0179-0166, alex@shepeta.comВ. А. Ненашев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, orcid.org/0000-0001-5285-2051<sup>а</sup>Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Б. Морская ул., 67, Санкт-Петербург, 190000, РФ

**Введение:** поиск физических объектов в заданном районе часто осуществляется в автоматическом режиме с помощью малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, оборудованных радиолокационными системами. В этом случае антенны бортовых РЛС в силу габаритных ограничений имеют малую апертуру и, соответственно, широкую диаграмму направленности, что снижает точность определения угловых координат обнаруженных объектов. Повышение точности оценки угловых координат приводит к улучшению информативности подобных автоматических систем поиска и, как следствие, к росту эффективности их практического использования. **Цель:** разработка методики расчета параметров двухпозиционной радиолокационной системы, состоящей из двух малогабаритных бортовых РЛС, расположенных на малых беспилотных летательных аппаратах, обеспечивающих повышение точности определения угловых координат радиоконтрастных физических объектов. **Результаты:** предложен алгоритм комплексирования данных о координатах физических объектов, обнаруженных в совместной зоне обзора двухпозиционной системы бортовых малогабаритных РЛС, позволяющий, в зависимости от условий наблюдения объектов, увеличить точность определения их азимутальных координат на порядок и более. Рассчитаны траектории летательных аппаратов, на которых достигается повышение точности, и траектории, при которых выигрыш в точности практически отсутствует. **Практическая значимость:** возможность применять подобные двухпозиционные бортовые малогабаритные РЛС в автоматизированных системах поиска и обнаружения физических объектов и людей в зонах бедствий, экологических катастроф, а также системах сбора и обработки данных информации с датчиков, используемых для мониторинга состояния окружающей среды и техногенных объектов.

**Ключевые слова** — двухпозиционная система, бортовые РЛС, измерение координат, характеристики точности, малогабаритные летательные аппараты, апертура антенны, диаграмма направленности, комплексирование.

**Для цитирования:** Shepeta A. P., Nenashev V. A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 31–36. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-31-36

**For citation:** Shepeta A. P., Nenashev V. A. Accuracy characteristics of object location in a two-position system of small onboard radars. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 31–36. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-31-36

## Метод повышения разрешающей способности и точности радиолокационных угловых измерений на основе последовательной пространственно-временной обработки принимаемых сигналов

А. П. Алёшкин<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0002-0532-1378](https://orcid.org/0000-0002-0532-1378), [a\\_aleshkin@mail.ru](mailto:a_aleshkin@mail.ru)

В. В. Владимиров<sup>а</sup>, научный сотрудник, [orcid.org/0000-0003-2984-9692](https://orcid.org/0000-0003-2984-9692)

В. И. Невзоров<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0002-7676-1530](https://orcid.org/0000-0002-7676-1530)

П. В. Савочкин<sup>а</sup>, канд. техн. наук, доцент, [orcid.org/0000-0003-1766-501X](https://orcid.org/0000-0003-1766-501X)

<sup>а</sup>Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Ждановская наб., 13, Санкт-Петербург, 197198, РФ

**Введение:** возрастание требований к точностным характеристикам определения местоположения объектов с помощью радиолокационных станций с учетом минимизации их конструктивных изменений приводит к необходимости применять специальные математические алгоритмы цифровой обработки сигналов. Применение таких алгоритмов позволяет обеспечить увеличение разрешающей способности радиолокационной станции, т. е. сверхразрешение, превосходящее релейское, без конструктивного изменения антенных систем. Существующие алгоритмы сверхразрешения требуют больших вычислительных затрат и длительного времени накопления сигнала. **Цель:** получение сверхразрешения по угловым координатам линейной антенной решетки за счет синтеза цифровой методики продольной плоской апертуры в реальном масштабе времени. **Методы:** формирование амплитудно-фазового распределения на элементах линейной решетки массива данных, на основе которого производится синтез продольной плоской апертуры за счет алгоритмов цифрового моделирования процессов «виртуального переизлучения» принятых сигналов. **Результаты:** на основе предложенного метода синтеза апертуры линейной антенной решетки в продольной плоскости разработан алгоритм, позволяющий произвести оценку увеличения угловой разрешающей способности линейной антенной решетки. Выполнено компьютерное моделирование полученной решетки и построена ее диаграмма направленности. Проанализированы зависимости углового разрешения от направления фазирования и от интервала синтеза при применении данного метода. Количественные оценки проведены путем сравнения полученного углового разрешения с потенциально возможным, определенным по критерию Релея. Разрешающая способность по угловым координатам при использовании данного метода увеличивается в 1,5 раза. Таким образом, предложенный метод позволяет повысить угловую разрешающую способность радиолокационной станции без существенных конструктивных изменений антенной решетки с использованием нетрудоемких алгоритмов. **Практическая значимость:** применение данного метода в радиолокационных станциях, работающих в коротковолновом диапазоне, где увеличение размеров антенной решетки является достаточно трудоемкой задачей, позволит повысить точность радиолокационных измерений.

**Ключевые слова** – антенная решетка, синтезирование апертуры, цифровая обработка сигналов, сверхразрешение по угловым координатам.

**Для цитирования:** Алёшкин А. П., Владимиров В. В., Невзоров В. И., Савочкин П. В. Метод повышения разрешающей способности и точности радиолокационных угловых измерений на основе последовательной пространственно-временной обработки принимаемых сигналов. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 37–45. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-37-45

**For citation:** Aleshkin A. P., Vladimirov V. V., Nevzorov V. I., Savochkin P. V. Method for increasing the resolution and accuracy of radar angular measurements based on sequential spatio-temporal processing of received signals. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 37–45 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-37-45

### Введение

В настоящее время с развитием средств цифровой обработки в радиолокационных системах (РЛС) все чаще в качестве антенных систем применяются цифровые антенные решетки (АР) [1–3]. Преобразование принятого сигнала в цифровую форму непосредственно на выходе элемента АР позволяет избавиться от протяженного фидерного тракта. Кроме того, цифровая обработка сигналов позволяет обеспечить РЛС принципиально новыми возможностями. Это достигается благодаря использованию специальных математических алгоритмов обработки сигналов, кото-

рые невозможно реализовать при аналоговой обработке [4–9].

Разрешающая способность АР по направлению в пространстве, как известно, определяется шириной  $2\theta_{0,5}$  ее диаграммы направленности (ДН), которая, в свою очередь, зависит от соотношения размеров решетки в плоскости, перпендикулярной направлению падения на решетку электромагнитных волн (ЭМВ) (поперечных размеров), и длины волны. Чем больше эти размеры, тем уже ДН АР и выше разрешающая способность. Увеличение поперечных размеров АР также приводит к увеличению ее коэффициента направленного действия и, следовательно, к уве-

личению энергетического потенциала радиолокационного канала и точности измерений.

При использовании традиционных методов обработки сигналов увеличение разрешающей способности по углу, при прочих равных условиях, достигается за счет увеличения физических размеров решетки, т. е. усложнения ее конструкции.

Вместе с тем из теории фазированных АР известно, что ширина ДН зависит не только от поперечных размеров решетки, но и от ее размеров в продольной плоскости, т. е. в плоскости падения на решетку принимаемой ЭМВ.

Алгоритмы цифровой обработки сигналов позволяют расширить возможности, увеличив разрешающую способность по углу без увеличения физических размеров линейной решетки за счет синтезирования апертуры, тем самым обеспечив так называемое сверхразрешение [10–14].

В настоящее время алгоритмы сверхразрешения делятся на два вида: спектральные и параметрические. Первым алгоритмом сверхразрешения радиосигналов принято считать метод Кейпона. Наиболее широко известен алгоритм MUSIC (Multiple Signal Classification), основанный на разделении пространства на сигнальное и шумовое подпространства [14–23]. В основе данных алгоритмов лежит теория оптимальной обработки сигналов на фоне шумов. Они позволяют повысить разрешающую способность, которую нельзя достигнуть, применяя формирование ДН методом Фурье.

Широко развивающиеся алгоритмы сверхразрешения имеют высокие потенциальные характеристики. Однако они требуют больших вычислительных мощностей, формируют нетрадиционные ДН АР, а функции оценок направлений на источники сигналов по заданным критериям (например, минимуму среднеквадратического отклонения или максимуму отношения сигнал/шум) очень критичны к амплитудно-фазовому распределению. Ошибки в амплитудно-фазовом распределении приводят к ухудшению разрешающей способности на порядок.

Кроме того, повышение разрешающей способности может быть обеспечено за счет синтезирования апертуры по принципам, реализуемым в РЛС с синтезированной апертурой [24–26]. Особенностью данных методов синтезирования является необходимость перемещать антенну в пространстве по четко заданной траектории.

### Постановка задачи

В данной работе рассмотрены возможности получения сверхразрешения по угловым координатам линейной АР за счет синтезирования циф-

ровыми методами плоской апертуры в продольной плоскости.

Основой такого синтезирования является принцип согласованной фильтрации пространственно-временных сигналов (распределенных в пространстве электромагнитных полей).

Рассмотрим суть этого принципа применительно к линейной эквидистантной АР, состоящей из  $n$  однотипных элементов с расстоянием  $d$  между ними,  $x_i$  — координата расположения  $i$ -го элемента. Пусть координата первого элемента совпадает с началом системы координат ( $x_1 = 0$ ). Длина решетки  $L = (n - 1)d$ . Отметим, что характеристика направленности отдельного элемента определяет только сектор сканирования и не влияет на разрешающую способность РЛС.

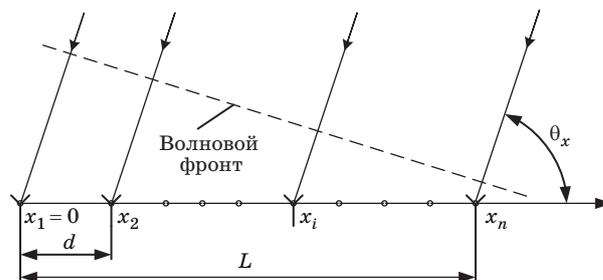
Пусть с некоторого направления  $\theta_x$  приходит отраженный от цели сигнал в виде плоской ЭМВ (рис. 1).

На интервале наблюдения в память вычислительной машины записываются комплексные амплитуды принимаемого сигнала с выхода каждого  $i$ -го элемента решетки. В итоге формируется массив данных о комплексных амплитудах сигналов  $S_i$ , принятых элементами АР, на пространственном интервале  $L$  в виде матрицы-строки  $\mathbf{A}$ :

$$\mathbf{A} = [\dot{S}_1(\theta_x) \dots \dot{S}_i(\theta_x) \dots \dot{S}_n(\theta_x)],$$

где  $\dot{S}_i(\theta_x) = S \exp j \left( \frac{2\pi}{\lambda} x_i \cos \theta_x + \psi_{S_0} \right)$  — комплексные амплитуды сигнала, принятого  $i$ -м элементом,  $\psi_{S_0}$  — начальная фаза принимаемого сигнала;  $\theta_x$  — угол между осью АР и направлением прихода сигнала.

Для формирования апертуры АР в продольной плоскости линейная решетка с помощью алгоритмов цифрового моделирования процессов ставится в режим «виртуального переизлучения» принятых сигналов. В результате рассчитывается структура комплексных амплитуд напряженности переизлучаемого поля  $\dot{E}_c(x, y, \theta_c)$  в плоскости, проходящей через ось АР и источник принимаемого сигнала (в соответствии с принци-



■ **Рис. 1.** Линейная эквидистантная АР  
 ■ **Fig. 1.** Linear equidistant antenna array

пом Гюйгенса — Кирхгофа как сумма полей отдельных элементов решетки):

$$\dot{E}_c(x, y, \theta_x) = E_c(x, y, \theta_x) \exp j(\psi_{E_c(x,y,\theta_x)}).$$

В память вычислительной машины заложены (рассчитанные заранее или рассчитываемые в процессе синтеза апертуры) данные о структурах комплексных амплитуд напряженности переизлученного поля для множества опорных сигналов, принятых с дискретных опорных направлений  $\theta_{xp0}$ :

$$\begin{aligned} \dot{E}_{xp0}(x, y, \theta_{xp0}) &= \\ &= E_{xp0}(x, y, \theta_{xp0}) \exp j(\psi_{E_c(x,y,\theta_{xp0})}). \end{aligned}$$

Далее производится сравнение переизлученного поля с массивом опорных полей путем вычисления величины их корреляции

$$\dot{f}(\theta_c - \theta_{xp0}) = \int_S \dot{E}_c(x, y, \theta_x) E_{xp0}^*(x, y, \theta_{xp0}) dx dy$$

и тем самым формируется функция, соответствующая ДН синтезированной плоской апертуры.

Для получения конкретных оценок результата синтеза апертуры предварительно рассмотрим процесс формирования переизлучаемого поля в ближней зоне решетки.

В этой зоне волновой процесс можно рассматривать как процесс распространения нерасходящейся плоской ЭМВ в области пространства, ограниченной размерами решетки в поперечной плоскости направлению распространения (рис. 2).

Для сокращения объема вычислений расчеты значений комплексных амплитуд переизлучаемых

полей производятся в дискретных значениях координат точек в плоскости синтеза с интервалами дискретизации  $\delta_x, \delta_y$  в области  $S$  пространства, занимаемого полями. В результате формируется массив данных о комплексных амплитудах полей в дискретных координатах этой области.

Таким образом, под синтезом апертуры в данном случае понимается весовая обработка массива данных, получаемая путем приема сигнала линейной АР; расчета цифровыми методами распределения поля на элементах виртуальной плоской АР, сформированной в плоскости, проходящей в направлении распространения ЭМВ и самой решетки. Причем данная решетка формируется в пределах ближней зоны антенны, где эквивалентные поверхности можно считать плоскими, т. е. в пределах так называемого прожекторного пучка, который формируется антеннами в ближней зоне.

### Реализация алгоритма

Пусть АР сфазирована в направлении  $\theta_{x0}$ , а принимает отраженный от цели сигнал в виде плоской ЭМВ с некоторого направления  $\theta_x$ . Определим фазовые сдвиги ЭМВ в  $q$ -й строке дискретной выборки относительно начала системы координат (см. рис. 2). Положение элемента синтезированной АР с координатами  $\{x_{i,q}, y_q\}$  зададим радиус-вектором

$$\mathbf{r}_{i,q} = \mathbf{i}_x x_{i,q} + \mathbf{i}_y y_q,$$

где  $x_{i,q} = (i-1)\delta_x - (q-1)\delta_y \operatorname{ctg} \theta_x = (i-1)\delta_x - \Delta x_q$ ;  
 $y_q = (q-1)\delta_y$ .

Волновой вектор

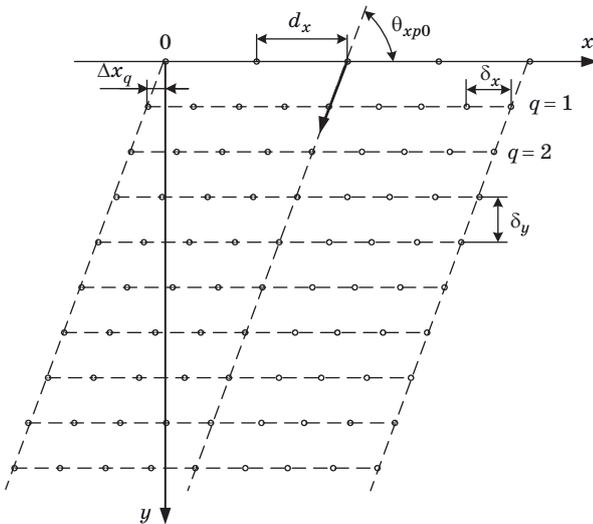
$$\mathbf{k} = \mathbf{i}_x \cos \theta_x + \mathbf{i}_y \sin \theta_x.$$

Фаза сигнала в  $\{x_{i,q}, y_q\}$ -элементе решетки будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \varphi(i, q) &= -\mathbf{k} \mathbf{r}_{i,q} = -\frac{2\pi}{\lambda} (x_{i,q} \cos \theta_x + y_q \sin \theta_x) = \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} \{ [(i-1)\delta_x - (q-1)\delta_y \operatorname{ctg} \theta_x] \cos \theta_x + (q-1)\delta_y \sin \theta_x \}. \end{aligned}$$

Аналогично можно записать выражение для фаз колебаний, «принятых» с опорных направлений:

$$\begin{aligned} \varphi_0(i, q) &= -\mathbf{k}_0 \mathbf{r}_{i,q} = -\frac{2\pi}{\lambda} (x_{i,q} \cos \theta_{x0} + y_q \sin \theta_{x0}) = \\ &= -\frac{2\pi}{\lambda} \{ [(i-1)\delta_x - (q-1)\delta_y \operatorname{ctg} \theta_{x0}] \cos \theta_{x0} + \\ &\quad + (q-1)\delta_y \sin \theta_{x0} \}. \end{aligned}$$



■ Рис. 2. Синтезированная плоская АР  
■ Fig. 2. Synthesized flat antenna

Комплексные амплитуды поля для опорного и принятого сигналов могут быть представлены следующими выражениями:

$$\begin{aligned} \dot{E}(x_{i,q}, \theta_x) &= \\ &= E \exp \frac{2\pi}{\lambda} \{ [(i-1)\delta_x - (q-1)\delta_y \operatorname{ctg} \theta_x] \cos \theta_x - \\ &\quad - (q-1)\delta_y \sin \theta_x \}; \\ \dot{E}_0(x_{i,q}, \theta_{x0}) &= \\ &= E \exp \frac{2\pi}{\lambda} \{ [(i-1)\delta_x - (q-1)\delta_y \operatorname{ctg} \theta_{x0}] \cos \theta_{x0} - \\ &\quad - (q-1)\delta_y \sin \theta_{x0} \}. \end{aligned}$$

Надо отметить, что в данном случае индексы  $i$  и  $q$  определяют порядковый номер отсчетов по столбцам и строке соответственно, но сами точки отсчетов для сигнала и опоры смещены друг относительно друга по оси  $X$  на величину  $\Delta x_q$ , что отличает данный подход от обычных методов корреляционной обработки.

Распределение комплексных амплитуд переизлученного поля принятого сигнала в точках, соответствующих опорному полю, имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{E}(x_{i,q}, \theta_{x0}, \theta_x) &= \\ &= E \exp \frac{2\pi}{\lambda} \{ [(i-1)\delta_x - (q-1)\delta_y \operatorname{ctg} \theta_{x0}] \cos \theta_x - \\ &\quad - (q-1)\delta_y \sin \theta_x \}. \end{aligned}$$

При этом значение корреляционной суммы поля принятого сигнала с опорным определяется выражением

$$\begin{aligned} f_{k\Sigma} &= EE_0 \sum_{i=1}^{n'} \exp \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} (i-1)\delta_x (\cos \theta_x - \cos \theta_{x0}) \right\} \times \\ &\times \sum_{q=1}^p \exp \left\{ \frac{2\pi}{\lambda} (q-1)\delta_y \frac{-\cos \theta_x \cos \theta_{x0} + \cos^2 \theta_{x0} +}{\sin \theta_{x0}} + \right. \\ &\quad \left. + (-\sin \theta_x + \sin \theta_{x0}) \right\}, \end{aligned}$$

где  $n'$  — число элементов в синтезированной АР с интервалами между элементами  $\delta_x$ .

При равенстве  $\theta_{x0} = \theta_x$  значение корреляционной суммы достигает максимума, равного

$$f_{k\Sigma \max} = EE_0 n' p.$$

Сигналом на выходе системы после обработки являются значения корреляционной функции, вычисляемой путем сравнения сигнала на элементах синтезированной АР с опорным. Значения данной функции зависят от углового отклонения между принятым сигналом и опорой. Эта зависимость в теории фазированных АР определяется как ДН в режиме приема.

Синтезированная ДН определяется по формуле

$$\begin{aligned} f(\theta) &= F_1(\theta_x) \frac{\sin \left[ \frac{n'}{2} k \delta_x (\cos \theta_x - \cos \theta_{x0}) \right]}{\sin \left[ \frac{1}{2} k \delta_x (\cos \theta_x - \cos \theta_{x0}) \right]} \times \\ &\times \sin \left[ \frac{p}{2} k \delta_y \left( \frac{-\cos \theta_x \cos \theta_{x0} + \cos^2 \theta_{x0} +}{\sin \theta_{x0}} + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + (-\sin \theta_x + \sin \theta_{x0}) \right) \right] \\ &\times \frac{1}{\sin \left[ \frac{1}{2} k \delta_y \left( \frac{-\cos \theta_x \cos \theta_{x0} + \cos^2 \theta_{x0} -}{\sin \theta_{x0}} - \right. \right.} \end{aligned} \quad (1)$$

Формулу (1) можно преобразовать к виду

$$\begin{aligned} f(\theta) &= F_1(\theta_x) \frac{\sin \left[ \frac{n'}{2} k \delta_x (\cos \theta_x - \cos \theta_{x0}) \right]}{\sin \left[ \frac{1}{2} k \delta_x (\cos \theta_x - \cos \theta_{x0}) \right]} \times \\ &\times \frac{\sin \left[ \frac{p}{2} k \delta_y \left( \frac{1 - \cos(\theta_x - \theta_{x0})}{\sin \theta_{x0}} \right) \right]}{\sin \left[ \frac{1}{2} k \delta_y \left( \frac{1 - \cos(\theta_x - \theta_{x0})}{\sin \theta_{x0}} \right) \right]}. \end{aligned} \quad (2)$$

Произведем анализ вклада в разрешающую способность за счет синтезирования продольных размеров АР.

Для ближней зоны, когда форма ЭМВ представляет собой «прожекторный» пучок:

$$p = \frac{L^2}{\lambda \delta_y} \sin \theta_{x0} + 1. \quad (3)$$

Определим ширину второго множителя ДН АР по нулевым значениям.

Нулевые значения второй множитель в формуле (2) принимает при условии

$$\frac{p}{2} k \delta_y \left( \frac{1 - \cos(\theta_x - \theta_{x0})}{\sin \theta_{x0}} \right) = \pi. \quad (4)$$

После преобразования формулы (4) получим

$$\sin \frac{\theta_x - \theta_{x0}}{2} = \sqrt{\frac{\lambda}{2p\delta_y \sin \theta_{x0}}}. \quad (5)$$

Поскольку значения углов лежат в пределах основного лепестка ДН линейной АР, выражение (5) можем записать в виде

$$\theta_x - \theta_{x0} = 2 \sqrt{\frac{\lambda}{2p\delta_y \sin \theta_{x0}}}. \quad (6)$$

Подставляя значение  $p$  в данное выражение, получим

$$\theta_x - \theta_{x0} = \sqrt{2} \frac{\lambda}{L \sin^2 \theta_{x0}}. \quad (7)$$

Из выражения (7) видно, что в пределах ближней зоны, когда  $p$  определяется формулой (6), разрешающая способность синтезированной АР практически не увеличивается. Но при увеличении границы синтеза, выходящей за ближнюю зону, при условии, что фронт ЭМВ будет оставаться близким к плоскому, значение  $p$  можно увеличивать в десятки раз. Соответственно, и разрешающая способность по углу будет возрастать.

Рассмотренный алгоритм представляет собой алгоритм согласованной фильтрации сигнала в элементах виртуальной АР с опорным сигналом. Как известно из радиолокации, согласованная фильтрация соответствует оптимальной обработке сигнала в случае белого шума и, следовательно, приводит к увеличению точности радиолокационных измерений.

### Математическое моделирование

В данной работе рассматривается сужение ДН только в азимутальной плоскости, также имеется возможность сужения за счет модификации алгоритмов и для угломестной плоскости.

В соответствии с изложенным подходом было произведено компьютерное моделирование со следующими исходными данными:

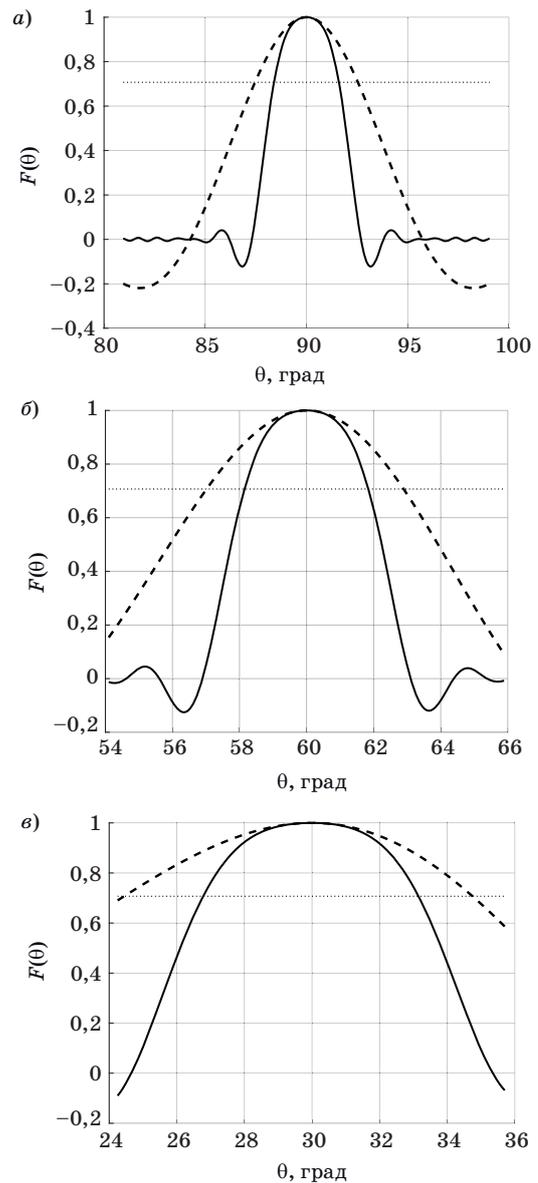
- расположение элементов решетки вдоль оси X (см. рис. 1);
- число элементов решетки  $n = 20$ ;
- расстояние между элементами решетки по оси X:  $d_x = \delta_x = \frac{\lambda}{2}$ ;
- расстояние между элементами решетки по оси Y:  $\delta_y = \frac{\lambda}{2}$ ;
- число отсчетов синтеза равно  $10p$ .

При этих данных исходная (до синтеза) ширина ДН при фазировании решетки в направлении нормали к ее оси равна

$$2\theta_{0,5}^\circ = 57,3 \frac{\lambda}{nd} = \frac{57,3}{20 \cdot 0,5} \approx 5,7^\circ.$$

Результаты моделирования для различных направлений фазирования представлены на рис. 3, а–в. Пунктирной линией обозначена ДН несинтезированной АР, а сплошной линией — синтезированной АР.

Как видно из рис. 3, при синтезировании линейной плоской эквидистантной АР происхо-



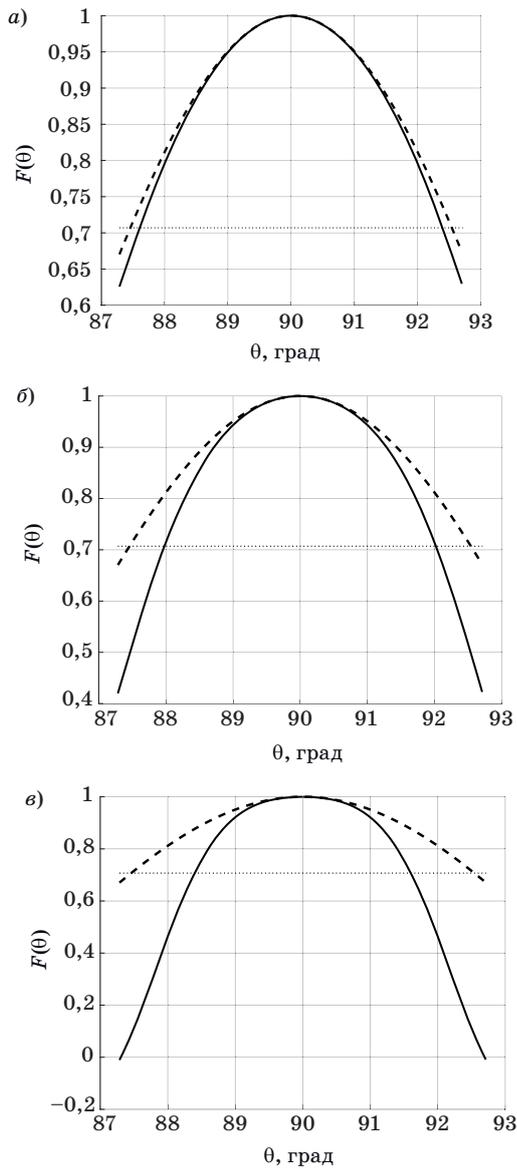
■ Рис. 3. Синтезированная плоская АР при  $\theta_{x0} = 90^\circ$  (а);  $\theta_{x0} = 60^\circ$  (б);  $\theta_{x0} = 30^\circ$  (в)

■ Fig. 3. Synthesized flat antenna for  $\theta_{x0} = 90^\circ$  (а);  $\theta_{x0} = 60^\circ$  (б);  $\theta_{x0} = 30^\circ$  (в)

дит сужение основного лепестка. Разрешающая способность для данных начальных условий увеличивается приблизительно в 1,5 раза. Для дальнейшего сужения ДН необходимо увеличивать длину решетки в направлении оси Y, т. е. повышать число отсчетов синтеза  $p$ .

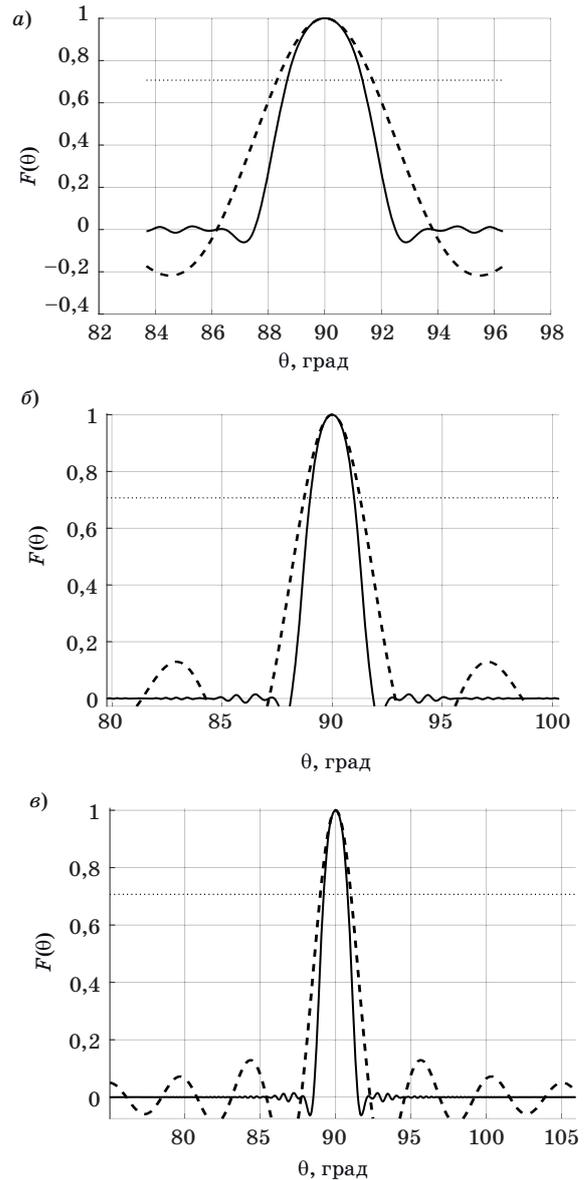
Также наблюдается сглаживание максимума ДН, что характерно для плоских АР и косвенно подтверждает корректность выполненного моделирования.

Результаты моделирования для различных значений интервала синтеза  $p$  при на-



■ **Рис. 4.** Синтезированная плоская АР, сфазированная в направлении  $\theta_{x0} = 90^\circ$ , при  $p = 362$  (а);  $p = 905$  (б);  $p = 1810$  (в)

■ **Fig. 4.** Synthesized flat antenna array phased in direction  $\theta_{x0} = 90^\circ$  for  $p = 362$  (a);  $p = 905$  (б);  $p = 1810$  (в)



■ **Рис. 5.** Синтезированная плоская АР, сфазированная в направлении  $\theta_{x0} = 90^\circ$ , при  $n = 30$  (а);  $n = 40$  (б);  $n = 50$  (в)

■ **Fig. 5.** Synthesized flat antenna array phased in direction  $\theta_{x0} = 90^\circ$  for  $n = 30$  (a);  $n = 40$  (б);  $n = 50$  (в)

правления фазирования  $\theta_{x0} = 90^\circ$  представлены на рис. 4, а–в.

Результаты моделирования для различного числа элементов АР  $n$  при направлении фазирования  $\theta_{x0} = 90^\circ$  представлены на рис. 5, а–в.

Данные ширины ДН на уровне 0,707 по амплитуде при различном числе элементов АР представлены в таблице.

Как видно из рис. 5 и таблицы, при одинаковом интервале синтезирования  $p$  ДН АР сужается в среднем на 20 %, что в свою очередь приводит к увеличению точности радиолокационных угловых измерений.

Количество элементов АР, $n$	Ширина ДН АР ( $2\theta_{0,707}$ )		Сужение ДН, %
	реальной	синтезированной	
20	5,08	4,04	20,5
40	2,54	1,98	21,0
60	1,7	1,32	22,4
80	1,26	0,97	23,0
100	1,02	0,78	23,5
120	0,84	0,66	21,4
140	0,72	0,56	22,2

## Заключение

С помощью рассмотренного метода синтеза апертуры АР можно сузить ее ДН и, соответственно, повысить разрешающую способность

по углу. Причем если заранее произвести расчет значений полей в опорных направлениях, это позволит производить обработку в масштабе времени, близкому к реальному.

## Литература

1. Дмитриев Д. Д., Карцан И. Н. Адаптивные антенные решетки с цифровым формированием луча. *Решетневские чтения*, 2016, т. 1, с. 263–265.
2. Мищенко С. Е., Шацкий Н. В. Амплитудно-фазовый синтез цифровой антенной решетки с учетом флуктуаций амплитудного распределения и отказов отдельных элементов. *Антенны*, 2014, № 6 (205), с. 15–19.
3. Куликов С. В., Яшков А. М., Гудаев Р. А., Митюшов Д. Г. Характеристики антенных решеток при цифровом формировании диаграммы направленности. *Актуальные вопросы развития вооружения, военной и специальной техники войск противовоздушной и противоракетной обороны, Космических войск Воздушно-космических сил: материалы научно-методических трудов II Всероссийской научно-практической конференции*, Москва, 21 апреля 2017 г. М., с. 165–168.
4. Хзмалян А. Д. Применение оптимальной обработки сигнала в РЛС с цифровой антенной решеткой. *Вестник воздушно-космической обороны*, 2017, № 2 (14), с. 5–10.
5. Будко П. А., Жуков Г. А., Журавлева Н. Г. Применение цифровых адаптивных компенсаторов помех для повышения эффективности декаметровых радиолоний. *DSPA: Вопросы применения цифровой обработки сигналов*, 2016, т. 6, № 3, с. 482–487.
6. Горбунов Ю. Н. Стохастическая интерполяция пеленга в адаптивных антенных решетках с последовательным диаграммообразованием на базе усеченных (малоэлементных) апертур и робастных статистик сигнала на входе. *Антенны*, 2015, № 6 (217), с. 18–26.
7. Джиоев А. Л., Омельчук И. С., Тюрин Д. А., Фоминченко Г. Г., Фоминченко Г. Л. Способ пассивной однопозиционной угломерно-разностно-доплеровской локации, структура и алгоритм функционирования реализующей его радиолокационной системы. *Журнал радиоэлектроники*, 2017, № 9, с. 10.
8. Петров В. П. Алгоритмы оценки пространственного спектра в адаптивных цифровых антенных решетках. *Вестник СибГУТИ*, 2014, № 4 (28), с. 60–70.
9. Орошук И. М., Сучков А. Н. Возможности применения нелинейных цифровых антенных решеток в декаметровом диапазоне. *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*, 2015, № 2 (23), с. 17–26.
10. Макаров Е. В. Анализ углового сверхразрешения источников электромагнитного поля в многоканальных системах с малой апертурой: автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. Воронеж, ВГУ, 2009. 16 с.
11. Лаговский Б. А. Сверхразрешение на основе синтеза апертуры цифровыми антенными решетками. *Антенны*, 2013, № 6 (193), с. 9–16.
12. Нечаев Ю. Б. Сверхразрешающие алгоритмы в задачах азимутальной радиопеленгации с использованием кольцевых антенных решеток. *Антенны*, 2007, № 7, с. 29–34.
13. Чесановський І. І., Верба Д. Д. Узагальнення методів цифрового синтезування апертури в радіолокаційних системах. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 2013, № 2, с. 277–280.
14. Детков А. Н. Оптимизация обработки траекторного сигнала радиолокационной системы с цифровым синтезированием апертуры антенны при использовании скрытых марковских моделей. *Радиотехника и электроника*, 2017, т. 62, № 6, с. 554–560.
15. Манохин Г. О., Гельцер А. А., Рогожников Е. В. Увеличение разрешающей способности радиолокационной системы за счет параметрических методов обработки сигналов. *Вестник СибГУТИ*, 2015, № 1 (29), с. 15–23.
16. Ратынский М. В. *Адаптация и сверхразрешение антенных решеток*. М., Радио и связь, 2003. 197 с.
17. Aliyazicioglu Z., Hwang H., Grice M., Yakovlev A. Sensitivity analysis for direction of arrival estimation using a root-MUSIC algorithm. *Engineering Letters*, 2008, vol. 16, no. 3, pp. 353–360.
18. Varabanov N. Antenna array super-resolution method for moving signals. *International Conference on Information Engineering*, 2013, pp. 431–440.
19. Чистяков В. А., Куприц В. Ю. Сверхразрешение в антенных решетках. *Решетневские чтения*, 2016, т. 1, с. 310–312.
20. Мищенко С. Е., Шацкий Н. В., Шацкий Н. В. Пассивная радиолокация со сверхразрешением в антенной решетке с векторными элементами. *Журнал радиоэлектроники*, 2014, № 7, с. 2.
21. Lagarkov F. N. Numerical end experimental investigation of the superresolution in a focusing system based on a plate of «left-handed» material. *Proc. of the Symp. F, ICMAT*, 2003, pp. 157–160.
22. Djurovic I. QML-RANSAC: PPS and FM signals estimation in heavy noise environments. *Signal Processing*, 2017, vol. 130, pp. 142–151.
23. Djurovic I., Zhang Y. Accurate parameter estimation of over-the-horizon radar signals using RANSAC and MUSIC algorithms. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2018, vol. 67, pp. 85–93.
24. Jiaguo Lu. *Design Technology of Synthetic Aperture Radar*. Wiley — IEEE Press, 2019. 329 p.

25. Lin C., Tang S., Zhang L., Guo P. Focusing high-resolution airborne SAR with topography variations using an extended BPA based on a time/frequency rotation principle. *Remote Sens*, 2018, vol. 10, no. 1275. <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/8/1275> (дата обращения: 13.11.2019). doi:10.3390/rs10081275

26. Tang S. Y., Zhang L. R., So H. C. Focusing high-resolution highly squinted airborne SAR data with maneuvers. *Remote Sens*, 2018, vol. 10, no. 862. <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/862> (дата обращения: 11.11.2019). doi:10.3390/rs10060862

UDC 621.396.969

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-37-45

### Method for increasing the resolution and accuracy of radar angular measurements based on sequential spatio-temporal processing of received signals

A. P. Aleshkin<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0002-0532-1378](https://orcid.org/0000-0002-0532-1378), [a\\_aleshkin@mail.ru](mailto:a_aleshkin@mail.ru)

V. V. Vladimirov<sup>a</sup>, Researcher, [orcid.org/0000-0003-2984-9692](https://orcid.org/0000-0003-2984-9692)

V. I. Nevzorov<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0002-7676-1530](https://orcid.org/0000-0002-7676-1530)

P. V. Savochkin<sup>a</sup>, PhD, Tech., Associate Professor, [orcid.org/0000-0003-1766-501X](https://orcid.org/0000-0003-1766-501X)

<sup>a</sup>A. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia Emb., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Increasing requirements for the location accuracy of radar stations, along with the minimization of their structural changes, necessitates the use of special mathematical algorithms for digital signal processing. The use of such algorithms makes it possible to increase the resolution of a radar station up to a superresolution exceeding the Rayleigh resolution, without any constructive modification of the antenna systems. The existing superresolution algorithms require a large computational cost and a long signal accumulation time. **Purpose:** Obtaining superresolution in the angular coordinates of a linear antenna array due to digital synthesis of longitudinal flat aperture in real time by digital methods. **Methods:** An amplitude-phase distribution is formed on the elements of a linear lattice of the data array. On this base, a longitudinal flat aperture is synthesized using digital modeling algorithms for “virtual re-emission” of the received signals. **Results:** Based on the proposed method of synthesizing a linear antenna array aperture in the longitudinal plane, an algorithm was developed for estimating the increase in the angular resolution of the linear antenna array. Computer simulation of the resulting lattice was performed, and its radiation pattern was built. The dependence was analyzed of the angular resolution on the phasing direction and on the synthesis interval when using this method. Quantitative assessments were carried out by the comparison between the obtained angular resolution and a potentially possible one determined by the Rayleigh criterion. The resolution in angular coordinates when using this method increases by 1.5 times. Thus, the proposed method allows you to increase the angular resolution of a radar station without any significant structural changes in the antenna array, using relatively simple algorithms. **Practical relevance:** The application of this method in radar stations, especially those operating in the short-wave range where increasing the size of the antenna array is a rather difficult task, will improve the radar measurement accuracy.

**Keywords** — antenna array, aperture synthesis, digital signal processing, superresolution in angular coordinates.

**For citation:** Aleshkin A. P., Vladimirov V. V., Nevzorov V. I., Savochkin P. V. Method for increasing the resolution and accuracy of radar angular measurements based on sequential spatio-temporal processing of received signals. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 37–45 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-37-45

### References

1. Dmitriev D. D., Kartsan T. I. Adaptive array antenna digital beamforming. *Reshetnev Readings*, 2016, no. 1, pp. 263–265 (In Russian).
2. Mishchenko S. E., Shatsky N. V. Amplitude-phase synthesis of digital array antenna taking into account the amplitude distribution fluctuations and failure of individual elements. *Antennas*, 2014, no. 6 (205), pp. 15–19 (In Russian).
3. Kulikov S. V., Yashkov A. M., Gudaev R. A., Mityushov D. G. Characteristics of antenna arrays in the digital generation of the directional diagram. *Trudv II Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Aktual’nye voprosy razvitiya vooruzheniya, voennoj i special’noj tekhniki vojsk protivovozdushnoj i protivoraketnoj oborony, Kosmicheskikh vojsk Vozdushno-kosmicheskikh sil”* [Proceedings of the II All-Russian Scientific and Practical Conference “Topical issues of development of weapons, military and special equipment of the air and missile defense forces, Space forces of the Air and space forces”]. Moscow, 2017, pp. 165–168 (In Russian).
4. Khzmalyan A. D. Application of optimal digital signal processing in a digital antenna array radar. *Aerospace Defense Herald*, 2017, no. 2 (14), pp. 5–10 (In Russian).
5. Budko P. A., Zhukov G. A., Zhuravleva N. G. Application of digital adaptive noise compensators to improve the efficiency of decameter radio lines. *DSPA. Voprosy primeneniya cifrovoj obrabotki signalov*, 2016, vol. 6, no. 3, pp. 482–487 (In Russian).
6. Gorbunov Yu. N. Stochastic interpolation of bearing in adaptive antenna arrays with sequential beam formation on the basis of truncated (small element) apertures and input signal robust statistics. *Antennas*, 2015, no. 6 (217), pp. 18–26 (In Russian).
7. Dzhioyev A. L., Omelchuk I. S., Turin D. A., Fominchenko G. G., Fominchenko G. L. Method of passive single-positioning angle-difference-doppler location, structure and algorithm of functioning of its radar location system. *Journal of Radio Electronics*, 2017, no. 9, 10 p. (In Russian).
8. Petrov V. P. Spatial spectrum analysis algorithms in adaptive digital arrays. *Vestnik SibGUTI*, 2014, no. 4 (28), pp. 60–70 (In Russian).
9. Oroshchuk I. M., Suchkov A. N. The possible application of nonlinear digital antenna arrays in decametre range. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2015, no. 2 (23), pp. 17–26 (In Russian).
10. Makarov E. V. *Analiz uglovogo sverhrazresheniya istochnikov elektromagnitnogo polya v mnogokanal’nyh sistemah s maloj aperturoj*. Dis. kand. fiz.-mat. nauk [Analysis of angular superresolution of electromagnetic field sources in multi-channel systems with a small aperture. PhD phys. and math. sci. diss.]. Voronezh, VGU Publ., 2009. 16 p. (In Russian).

11. Lagovsky B. A. Superresolution, based on aperture synthesis with smart antennas. *Antennas*, 2013, no. 6 (193), pp. 9–16 (In Russian).
12. Nechaev Yu. B., Zotov S. A., Makarov E. S. Super-resolution algorithms in the problem of azimuthal radio bearing with using ring antenna arrays. *Antennas*, 2007, no. 7, pp. 29–34 (In Russian).
13. Chesanovskiy I. I., Verba D. D. Summary of methods for digital aperture synthesis in radar systems. *Visnik Hmel'nic'kogo nacional'nogo universitetu. Tekhnichni nauki*, 2013, no. 2, pp. 277–280 (In Ukrainian).
14. Detkov A. N. Optimization of trajectory signal processing in a radar system with digital synthesis of antenna aperture using hidden markov models. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2017, vol. 62, no. 6, pp. 554–560 (In Russian).
15. Manokhin G. O., Geltser A. A., Rogozhnikov E. V. Resolution gain of the radar system via parametric signal processing techniques. *Vestnik SibGUTI*, 2015, no. 1 (29), pp. 15–23 (In Russian).
16. Ratynskij M. V. *Adaptaciya i sverhrazreshenie antennyh reshetok* [Adaptation and superresolution of antenna arrays]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2003. 197 p. (In Russian).
17. Aliyazicioglu Z., Hwang H., Grice M., Yakovlev A. Sensitivity analysis for direction of arrival estimation using a root-MUSIC algorithm. *Engineering Letters*, 2008, vol. 16, no. 3, pp. 353–360.
18. Barabanov N. Antenna array super-resolution method for moving signals. *International Conference on Information Engineering*, 2013, pp. 431–440.
19. Chistyakov V. A., Kuprits V. U. Superresolution in antenna arrays. *Reshetnev Readings*, 2016, no. 1, pp. 310–312 (In Russian).
20. Mishchenko S. E., Shatsky V. V., Shatsky N. V. The passive location with super resolution in the antenna array with vector antenna elements. *Journal of Radio Electronics*, 2014, no. 7, 2 p. (In Russian).
21. Lagarkov F. N. Numerical end experimental investigation of the superresolution in a focusing system based on a plate of «left-handed» material. *Proc. of the Symp. F. ICMAT*, 2003, pp. 157–160.
22. Djurovic I. QML-RANSAC: PPS and FM signals estimation in heavy noise environments. *Signal Processing*, 2017, vol. 130, pp. 142–151.
23. Djurovic I., Zhang Y. Accurate parameter estimation of over-the-horizon radar signals using RANSAC and MUSIC algorithms. *Progress in Electromagnetics Research M*, 2018, vol. 67, pp. 85–93.
24. Jianguo Lu. *Design Technology of Synthetic Aperture Radar*. Wiley — IEEE Press, 2019. 329 p.
25. Lin C., Tang S., Zhang L., Guo P. Focusing high-resolution airborne SAR with topography variations using an extended BPA based on a time/frequency rotation principle. *Remote Sens*, 2018, vol. 10, no. 1275. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/8/1275> (accessed 13 November 2019). doi:10.3390/rs10081275
26. Tang S. Y., Zhang L. R., So H. C. Focusing high-resolution highly squinted airborne SAR data with maneuvers. *Remote Sens*, 2018, vol. 10, no. 862. Available at: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/6/862>. (accessed 11 November 2019). doi:10.3390/rs10060862

## 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](mailto:ius.spb@gmail.com)).

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

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

УДК 550.388.2

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

## Оценка качества алгоритма контроля доступности WAAS в условиях умеренной геомагнитной бури

В. В. Демьянов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0003-2893-9522](https://orcid.org/0000-0003-2893-9522), [sword1971@yandex.ru](mailto:sword1971@yandex.ru)

Д. С. Халиманов<sup>а</sup>, аспирант, [orcid.org/0000-0002-9389-6701](https://orcid.org/0000-0002-9389-6701)

М. Э. Федоров<sup>а</sup>, старший преподаватель, [orcid.org/0000-0002-4043-4730](https://orcid.org/0000-0002-4043-4730)

О. Б. Имарова<sup>а</sup>, магистрант, [orcid.org/0000-0001-7087-4000](https://orcid.org/0000-0001-7087-4000)

<sup>а</sup>Иркутский государственный университет путей сообщения, Чернышевского ул., 15, Иркутск, 664074, РФ

**Введение:** известно, что американская широкозонная дифференциальная система WAAS характеризуется повышенной вероятностью ложной тревоги о нарушении доступности требуемых навигационных характеристик в условиях геомагнитных возмущений. Следствием этого может стать снижение эффективности работы WAAS из-за несоответствия выходной информации системы контроля доступности требуемых навигационных характеристик фактическому качеству навигационно-временного обеспечения. **Цель:** сравнительный анализ фактического качества навигационно-временного обеспечения пользователей спутниковой навигационной системы GPS и выходной информации системы контроля доступности требуемых навигационных характеристик WAAS в условиях умеренной магнитной бури, а также при наличии технических сбоев в работе отдельных сегментов систем GPS и WAAS. **Результаты:** по региону США, для 82 опорных станций, оборудованных навигационными приемниками GPS, были рассчитаны погрешности местоопределения. При расчетах использовались геометрические дальности видимых навигационных спутников и соответствующие реальные значения ионосферной дальномерной погрешности, которые определялись методом двухчастотных измерений. На основании этих же данных и с использованием известного типового алгоритма контроля доступности WAAS вычислялись уровни защиты пользователей в горизонтальной и вертикальной плоскостях. Результаты этих вычислений представлены в виде временного графика зависимости процента зоны покрытия рабочей зоны WAAS, который сравнивался с соответствующими графиками, представленными в официальных отчетах о работе WAAS. Установлено, что имеют место случаи существенного рассогласования между прогнозами доступности требуемых навигационных характеристик по данным WAAS и реальным качеством позиционирования в рабочей зоне этой системы. Обнаружены рассогласования в результатах расчетов уровней защиты в горизонтальной и вертикальной плоскостях, полученных из официальных отчетов о работе системы и вычисленных на основе геометрической дальности и реальной ионосферной дальномерной погрешности. **Практическая значимость:** предложенные рекомендации для пересмотра концепции построения системы контроля доступности требуемых навигационных характеристик широкозонных дифференциальных систем с разделением расчета «локально зависимых» и «глобально зависимых» компонент дифференциальных поправок дальномерных погрешностей позволят снизить вероятность появления ложной тревоги или опасного рассогласования информации в системе.

**Ключевые слова** – контроль доступности, целостность, требуемые навигационные характеристики, WAAS, дифференциальные системы.

**Для цитирования:** Демьянов В. В., Халиманов Д. С., Федоров М. Э., Имарова О. Б. Оценка качества алгоритма контроля доступности WAAS в условиях умеренной геомагнитной бури. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 46–59. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

**For citation:** Demyanov V. V., Khalimanov D. S., Fedorov M. E., Imarova O. B. Evaluating the quality of WAAS availability control algorithm under geomagnetic storm conditions. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 46–59 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

### Введение

Широкозонная дифференциальная система (ШДС) является средством повышения точности определения местоположения пользователей спутниковых радионавигационных систем и обеспечивает контроль доступности требуемых навигационных характеристик (ТНХ) пользователей различных категорий в пределах рабочей зоны. Максимально допустимые погрешности определения местоположения образуют границы «цилиндра безопасности» — области пространства, в пределах которой должен фактически находиться пользователь, чтобы не нарушить ТНХ, соответствующие данной категории

пользователя и решаемой им задачи. Средства ШДС позволяют формировать вектор дифференциальных поправок, содержащий компоненты погрешности текущих дальномерных измерений спутников радионавигационной системы, а также передавать пользователям оперативную информацию, которая помогает оценивать фактическую текущую доступность заданных ТНХ с некоторой доверительной вероятностью [1]. Текущая доступность ТНХ оценивается в аппаратуре пользователя системы в виде «уровней защиты», т. е. ожидаемой с определенной вероятностью погрешности определения местоположения в плане и по высоте с учетом погрешностей дальномерных измерений и геометрии наблюдаемого

навигационного созвездия спутников [2]. В зависимости от группы ТНХ, которая определяется категорией пользователя, пользовательское оборудование вычисляет только горизонтальный уровень защиты (Horizontal Protection Level — HPL) либо и горизонтальный и вертикальный (Vertical Protection Level — VPL) уровни защиты. Выход вычисленного значения HPL или VPL за границы области пространства допустимых погрешностей («цилиндра безопасности») сигнализирует о недоступности ТНХ в текущий момент времени. При этом гарантируется, что фактическая ошибка определения местоположения пользователя должна быть меньше значений уровней защиты в течение 99,99999 % времени.

В настоящее время наиболее известным и открытым для независимых исследований типом ШДС является американская система WAAS (Wide Area Augmentation System), которая поддерживает высокие ТНХ пользователей GPS в пределах рабочей зоны, охватывающей территорию США и Канады. В частности, при использовании средств WAAS для поддержания ТНХ авиационных потребителей на континентальной территории США (CONUS) и Аляски вводятся следующие пределы «цилиндра безопасности» [3]:

- полет в зоне аэродрома (режим LP) — ТНХ доступны, если  $HPL \leq 40$  м;

- некатегорированный заход на посадку без введения в вертикальной плоскости (режим LPV) — ТНХ доступны, если  $VPL \leq 50$  м и  $HPL \leq 40$  м;

- категорированный заход на посадку с введением в вертикальной плоскости до высоты принятия решения, равной 60 м (200 футов) (режим LPV200) — ТНХ доступны, если  $VPL \leq 35$  м и  $HPL \leq 40$  м.

Входными данными для определения уровней защиты HPL и VPL, которые сообщаются пользователям системы через геостационарные спутники WAAS, являются компоненты относительной дальномерной погрешности (User Differential Range Error — UDRE) по каждому из видимых спутников GPS и соответствующая ионосферная дальномерная погрешность (User Ionospheric Range Error — UIRE). Величина UDRE характеризует остаточную погрешность после учета кратковременных и долговременных дифференциальных поправок погрешности частотно-временного и эфемеридного обеспечения. Величина UIRE соответствует остаточной ионосферной дальномерной погрешности, возникающей после коррекции этой погрешности [3].

Очевидно, что надежность контроля доступности ТНХ средствами WAAS зависит от того, насколько модели компонент дальномерных погрешностей UDRE и UIRE соответствуют реальным условиям определения местоположения. «Если говорить о погрешностях эфемеридного и

частотно-временного обеспечения, можно сказать, что данные погрешности носят «глобальный» характер, который не зависит от местных условий наблюдения. Этот тип погрешностей имеет монотонный закон изменения во времени (дрейф погрешности), который в большинстве случаев хорошо известен, и текущая величина такой погрешности прогнозируется и корректируется с высокой точностью. В то же время ионосферная дальномерная погрешность имеет локальный характер, ярко выраженную ракурсную зависимость и часто непредсказуемо изменяется в значительных пределах, особенно в условиях геомагнитных возмущений, а также в условиях высокоширотной и низкоширотной ионосферы» [2]. Соответственно, точность определения местоположения пользователя на плоскости и, особенно, по высоте уязвима к возмущениям в ионосфере. В средних широтах такие возмущения в большинстве случаев возникают в течение основной фазы геомагнитной бури и вызывают рост дальномерной погрешности, а также кратковременные сбои в приеме сигналов отдельных спутников.

Самыми главными для вычисления текущей ионосферной дальномерной погрешности по каждому из видимых спутников в произвольной точке наблюдений в пределах рабочей зоны WAAS являются значения «вертикальных» ионосферных погрешностей дальномерных измерений (Grid Ionospheric Vertical Error — GIVE). Значения GIVE рассчитываются в узлах равномерной интерполяционной сети в пределах рабочей зоны WAAS на главной опорной станции WAAS и транслируются всем пользователям системы через геостационарный спутник (INMARSAT, AORE). Точки этой интерполяционной «ионосферной сети», покрывающей весь Северо-Американский континент, размещены равномерно с расстоянием  $5^\circ$  по широте и  $5^\circ$  по долготу. Текущая величина GIVE в каждом из узлов интерполяции оценивается с помощью интерполяции на неравномерной сети первичных измеренных «вертикальных» ионосферных дальномерных погрешностей. Последние, в свою очередь, получены путем пересчета из текущего набора «наклонных» измерений ионосферной дальномерной погрешности от всех видимых спутников GPS на контрольно-корректирующих станциях наземного сегмента WAAS. При этом пересчете принята модель сферически слоистой ионосферы с фиксированной высотой максимума ионизации 350 км. В конечном итоге пользователь WAAS определяет текущую ионосферную дальномерную погрешность в произвольной точке своего расположения с помощью линейной интерполяции по значениям GIVE, взятым из ближайших трех или четырех точек опорной «ионосферной сети». Таким образом, пользователь системы может оценить

текущую ионосферную погрешность по каждому из видимых спутников в пределах всей рабочей зоны, независимо от своего удаления от опорных станций наземного сегмента WAAS.

Можно видеть, что дифференциальные поправки на ионосферную погрешность определяются путем двойной интерполяции, да еще и с пересчетом из «наклонных» погрешностей в «вертикальные» на основе простой сферически-слоистой модели ионосферы. Поэтому они часто плохо соответствуют реальному состоянию возмущенной ионосферы. В силу сказанного оценка величины GIVE во всей рабочей зоне WAAS по одному и тому же алгоритму может оказаться некорректной и вести к завышенным значениям уровней защиты VPL и HPL и, соответственно, к неоправданно заниженной ожидаемой доступности THX в сравнении с реальной ситуацией.

Целью данной работы является оценка фактической эффективности работы алгоритма контроля доступности WAAS в условиях умеренной магнитной бури и при наличии технических сбоев в работе систем GPS и WAAS. Эта оценка проводится нами путем наблюдения соответствия между прогнозами ожидаемой доступности THX в пределах рабочей зоны WAAS и фактическими показателями точности позиционирования пользователя GPS. Выполнено сравнение официальных отчетов мониторинга целостности WAAS [4] и реального качества позиционирования в зоне покрытия WAAS. Реальное качество позиционирования пользователей GPS анализируется для случая автономной навигации с использованием одночастотных измерений радионавигационных параметров по стандартному C/A-коду без ионосферной коррекции (режим Standard Point Positioning — SPP). Результаты исследований позволяют наметить возможности дальнейшего развития технологии широкозонной дифференциальной навигации на основе комбинированного использования принципов работы локальной и широкозонной дифференциальных систем для раздельного оценивания «глобально зависимых» и «локально зависимых» дифференциальных поправок.

### Источники данных и методы их обработки

Исследования проводились в условиях умеренной геомагнитной бури, которая началась 14.02.2011 в 19:12 UT (Universal Time) и характеризовалась максимальным планетарным индексом  $K_p = 4$  [4]. Основная фаза продолжалась примерно до 03:00 UT следующего дня и сопровождалась длительной фазой восстановления. В большинстве случаев такая умеренная геомагнитная буря не вызывает сильных возмущений в средних широтах ионосферы. Как было установлено ранее

[5], многомасштабные ионосферные возмущения распространяются в сторону среднеширотной зоны от расширяющейся южной границы аврорального овала, которая рассматривается как источник акустико-гравитационных волн, передающих возмущения в ионосферу. Размер области расширения аврорального овала напрямую зависит от силы геомагнитной бури. Поэтому маловероятно, что умеренная геомагнитная буря способна вызвать распространение сильных ионосферных возмущений на всю область средних широт. Однако во время наблюдений имели место и следующие технические сбои функционирования сегментов WAAS и GPS, представленные в отчете.

1. 14.02.2011. Кратковременная потеря связи с геостационарным спутником связи GEO-138 с 12:01:14 UT до 12:01:27 UT — частичная деградация сервисов LPV и LPV200 в областях рабочей зоны.

2. 15.02.2011. Недоступен спутник GPS PRN 21 с 11:15 UT до 20:05 UT; предупреждение о нарушении целостности данных спутника GPS PRN 04 с 11:32 UT до 11:43 UT — частичная деградация сервисов LPV и LPV200 в областях рабочей зоны.

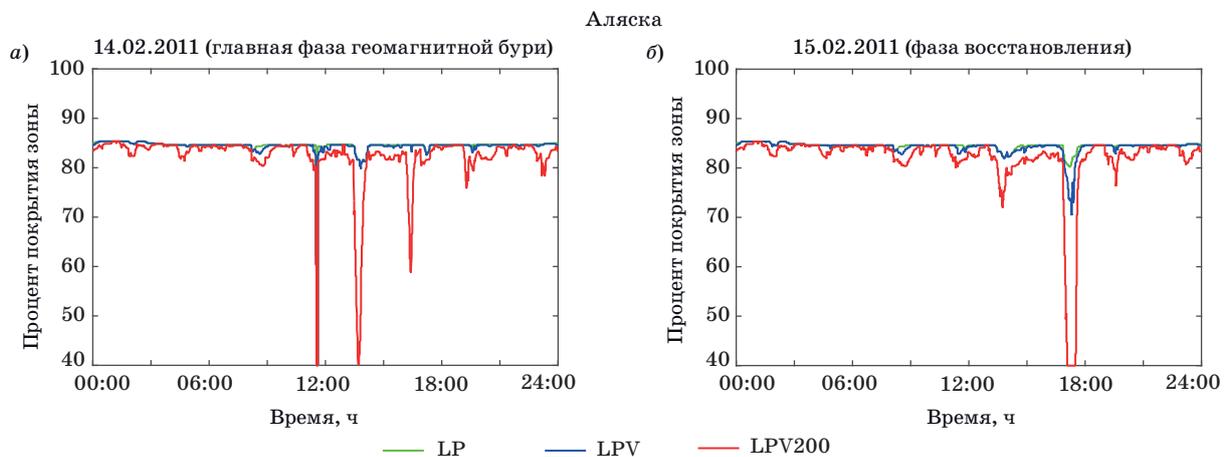
Как можно видеть, прогнозируется частичная деградация качества работы WAAS только по причине возникновения технических сбоев системы, а возможное влияние геомагнитных возмущений, прежде всего на высоких широтах, не принимается во внимание. В связи со всем вышесказанным для проведения исследования были выбраны именно эти дни, чтобы проследить, связаны ли негативные прогнозы WAAS об ожидаемом снижении качества навигации с геомагнитным возмущением. При этом сразу нужно отметить, что первый технический сбой из отчета не повлияет на результаты нашего анализа качества позиционирования в режиме SPP, а также при проведении расчетов уровней защиты HPL и VPL с использованием геометрической дальности и реальных значений ионосферной дальномерной погрешности [см. выражения (1) и (2) далее]. С другой стороны, возможен эффект деградации качества позиционирования за счет временной потери сопровождения спутников GPS PRN 04 и PRN 21 в периоды времени, которые указаны в отчете.

Согласно соответствующему официальному отчету о работе WAAS [6] было выдано предупреждение о снижении области покрытия WAAS сервисом с THX по требованиям LPV200 для территории Аляски на период с 11:30 UT до 17:00 UT 14.02.2011. На рис. 1, а изображен график, показывающий процент области покрытия Аляски на протяжении всего этого дня. Для сравнения на рис. 1, б отображены те же данные за следующий день 15.02, который соответствовал восстановительной фазе геомагнитного возмущения.

ния. Согласно этим рисункам следует ожидать резкого сокращения зоны покрытия WAAS в течение нескольких коротких интервалов времени в районе 11:30 UT, 14:00 UT и 17:00 UT в условиях геомагнитной бури 14.02.2011 и в 17:40–18:00 UT 15.02.2011.

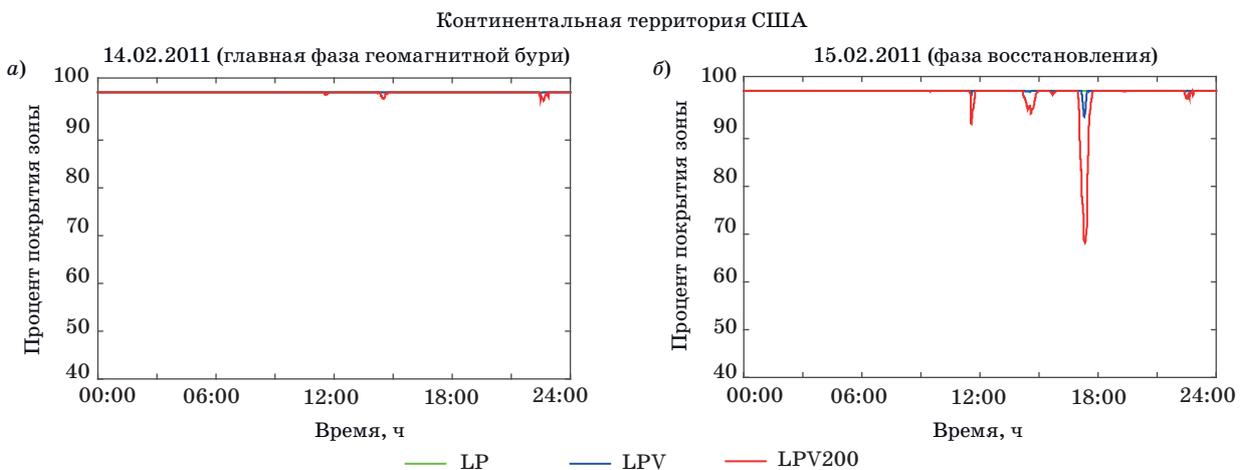
В отличие от территории Аляски, для зоны покрытия континентальной территории США (CONUS) были предоставлены более позитивные предупреждения системы WAAS. Графики отображают процент зоны покрытия CONUS относительно времени UT 14.02.2011 (рис. 2, а) и 15.02.2011 (рис. 2, б). В соответствии с отчетом WAAS 14.02 зона покрытия CONUS не сокращается, но есть предупреждение WAAS о ее резком сокращении примерно в 17:40 UT 15.02.2011.

Оценка реального качества позиционирования пользователей GPS выполняется в режиме SPP без ионосферной коррекции (наихудший вариант ожидаемой точности позиционирования). Вычисление уровней защиты HPL и VPL также выполнялось нами на каждой GPS-станции в исследуемой области на основе использования измеренных ионосферных дальномерных погрешностей без ионосферной коррекции. Таким образом, наши результаты и в случае оценки реального качества позиционирования, и в случае модельного расчета уровней защиты HPL и VPL будут отражать ожидаемое качество позиционирования с учетом воздействия реальной ионосферы без использования дифференциальной коррекции этой погрешности, а также возможной деградации ка-



■ **Рис. 1.** Процент зоны покрытия Аляски относительно времени UT в период основной фазы геомагнитной бури 14.02.2011 (а) и в день фазы восстановления геомагнитной бури 15.02.2011 (б)

■ **Fig. 1.** The percentage of the Alaska coverage area relative to UT during the main phase of the geomagnetic storm on February 14, 2011 (а) and on the day of the geomagnetic storm recovery phase on February 15, 2011 (б)



■ **Рис. 2.** Процент зоны покрытия CONUS относительно времени UT во время основной фазы геомагнитной бури 14.02.2011 (а) и в день фазы восстановления геомагнитной бури 15.02.2011 (б)

■ **Fig. 2.** The percentage of CONUS coverage area relative to UT time during the main phase of the geomagnetic storm on February 14, 2011 (а) and on the day of the geomagnetic storm recovery phase on February 15, 2011 (б)

чества позиционирования от потери сопровождения спутников PRN 04 и PRN 21. Очевидно, что ожидаемое качество позиционирования в данном случае будет хуже, чем полученное средствами WAAS после использования дифференциальной коррекции. Однако такой подход позволяет дать независимую оценку фактического соответствия прогнозов WAAS конкретным условиям наблюдения в ионосфере в течение суток.

Для проведения исследований мы использовали файлы данных, которые содержали суточные измерения всех видимых спутников GPS на одной из стационарных станций (GPS-станций), расположенных в двух областях зоны покрытия WAAS — Аляски и CONUS. Для исследования были выбраны доступные нам данные от 12 GPS-станций на территории Аляски и 70 на территории CONUS (рис. 3).

Процесс обработки данных включал следующие шаги.

**Шаг 1.** Расчет рядов погрешностей определения местоположения для каждой из GPS-станций с 30-секундным временным разрешением [7]. Счет координат каждой станции производился на основании данных, которые содержатся в соответствующем этой станции RINEX-файле, с помощью программной утилиты TEQC [8]. Полученные таким образом координаты и погрешности их определения пересчитывались далее из прямоугольной геоцентрической системы координат в локальную топоцентрическую систему координат.

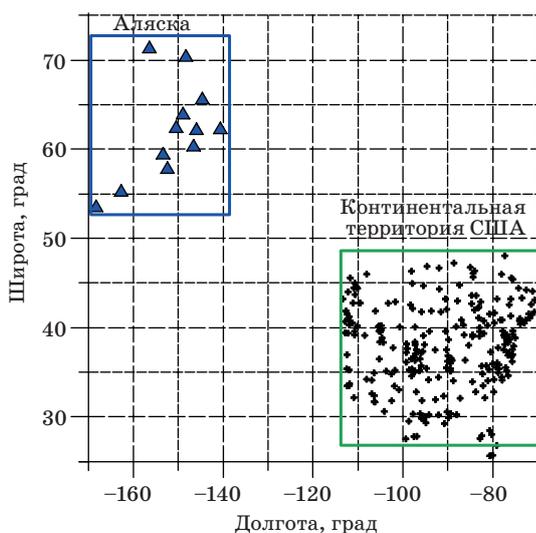
**Шаг 2.** Расчет текущих значений HPL и VPL с учетом реальных ионосферных погрешностей для каждого из видимых спутников и на каждой GPS-станции в области Аляски или CONUS. Для

этого была использована математическая модель дальности ( $\rho_i$ ) в виде суммы геометрической дальности до спутника и ионосферной дальномерной погрешности, которая вычислялась для этого же спутника с помощью двухчастотных дальномерных кодовых измерений следующим образом:

$$\begin{aligned} \rho_i &= R_{GEOM,i} + \Delta R_{ion,i}; \\ R_{GEOM,i} &= \sqrt{(x_{0,i} - x_{US})^2 + (y_{0,i} - y_{US})^2 + (z_{0,i} - z_{US})^2}; \\ \Delta R_{ion,i} &= \frac{40,308}{f_1^2} TEC_i; \\ TEC_i &= \frac{1}{40,308} \frac{f_1^2 \cdot f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} (C1_i - P2_i), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $x_{0,i}$ ,  $y_{0,i}$ ,  $z_{0,i}$  и  $x_{US}$ ,  $y_{US}$ ,  $z_{US}$  — координаты  $i$ -го спутника и GPS-станции в прямоугольной геоцентрической системе координат;  $TEC_i$  — полное электронное содержание в ионосфере вдоль линии видимости « $i$ -й спутник — GPS-станция» (в единицах TECU, 1 TECU =  $10^{16}$  1/м<sup>2</sup>);  $f_1 = 1575,25$  ГГц и  $f_2 = 1227,75$  ГГц — рабочие частоты GPS;  $C1_i$  — псевдодальность, измеренная с помощью дальномерного C/A-кода открытого доступа на частоте  $f_1$  для  $i$ -го спутника;  $P2_i$  — псевдодальность, измеренная с помощью точного дальномерного кода ограниченного доступа (P-кода) на частоте  $f_2$ .

Расчет уровней защиты HPL и VPL для каждой GPS-станции выполнялся с использованием дальномерных измерений (1) и с учетом реальной наблюдаемой геометрии спутников для каждой из групп требований LP, LPV и LPV200 [9]:



■ Рис. 3. Карта местоположения GPS-станций в зоне покрытия WAAS

■ Fig. 3. The map of the location of GPS stations in the WAAS coverage area

$$\begin{aligned} HPL &= \begin{cases} K_{HNPA} \cdot D_{mjr} \\ \text{or} \\ K_{HPA} \cdot D_{mjr} \end{cases}; \quad VPL = K_{VPA} \cdot D_V; \\ D_{mjr} &= \sqrt{\frac{D_X^2 + D_Y^2}{2} + \sqrt{\left(\frac{D_X^2 - D_Y^2}{2}\right)^2 + D_{XY}^2}}; \\ D_X^2 &= \sum_{i=1}^N S_{X,i}^2 \cdot \sigma_i^2; \quad D_Y^2 = \sum_{i=1}^N S_{Y,i}^2 \cdot \sigma_i^2; \\ D_V^2 &= \sum_{i=1}^N S_{V,i}^2 \cdot \sigma_i^2; \quad D_{XY} = \sum_{i=1}^N S_{X,i} \cdot S_{Y,i} \cdot \sigma_i^2; \\ S &= \begin{bmatrix} S_{X,1} & S_{X,2} & \dots & S_{X,N} \\ S_{Y,1} & S_{Y,2} & \dots & S_{Y,N} \\ S_{V,1} & S_{V,2} & \dots & S_{V,N} \\ S_{t,1} & S_{t,2} & \dots & S_{t,N} \end{bmatrix} = \\ &= (\mathbf{G}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{G})^{-1} \cdot \mathbf{G}^T \cdot \mathbf{W}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_i$  — среднеквадратическое отклонение (СКО) измеренных ионосферных дальномерных погрешностей для  $i$ -го спутника;  $K_{HNPA} = 6,18$  — коэффициент доверительной вероятности для THX LP;  $K_{HPA} = 6,0$  — для THX LPV;  $K_{VPA} = 5,33$  — для THX LPV200;  $G$  — текущая геометрическая матрица направляющих косинусов «спутники — пользователь»;  $W$  — диагональная матрица дисперсии дальномерных погрешностей.

Для вычисления значений  $\sigma_i$  для каждого спутника использовалось усреднение измерений со скользящим временным интервалом  $\Delta T = 5$  мин, что соответствует времени обновления дифференциальных поправок в системе WAAS [9].

**Шаг 3.** Сравнение границ допустимых погрешностей HAL и VAL для режимов LP, LPV и LPV200 и реальных погрешностей позиционирования, которые были рассчитаны на шаге 1 с последующей оценкой процентного соотношения зоны покрытия для Аляски и CONUS, в которых выполняются требования LP, LPV и LPV200, по формуле

$$\% \text{ зоны покрытия} = \frac{N_{TOT}}{N_{FLT}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где  $N_{TOT}$  — полное количество GPS-станций в исследуемой области;  $N_{FLT}$  — количество GPS-станций, на которых зафиксировано превышение уровней HAL (VAL) для какой-либо из групп требований LP, LPV или LPV200.

**Шаг 4.** Сравнение вычисленных значений HPL и VPL (2) и соответствующих границ допустимых погрешностей HAL и VAL для групп THX LP, LPV и LPV200 для каждой GPS-станции на территории Аляски и CONUS с последующей оценкой процентного соотношения зоны покрытия, в которой выполняются требования данных сервисов.

Использование двухчастотных измерений для моделирования измерений дальности (1) означает, что текущее значение ионосферных дальномерных погрешностей ( $\Delta R_{ion,i}$ ) содержит не только чистые ионосферные погрешности, но и все другие, зависящие от частоты, дальномерные погрешности. Основными из них являются погрешность многолучевости и дифференциальные задержки сигнала в аппаратуре спутника и приемника [10]. Оценим ожидаемые дальномерные погрешности, которые фактически содержатся в модели измерения дальности (1). Известно, что наиболее вероятное значение «вертикальной» ионосферной погрешности пользователя (UIRE), которое принято в расчетной части алгоритмов WAAS, составляет [9]

$$\Delta R_{UIRE,V} = \begin{cases} 9,0 \text{ м} & 0^\circ \leq \varphi_{PP} \leq 20^\circ \\ 4,5 \text{ м} & 20^\circ < \varphi_{PP} \leq 55^\circ, \\ 6,0 \text{ м} & 55^\circ < \varphi_{PP} \end{cases} \quad (4)$$

где  $\varphi_{PP}$  — широта подионосферной точки, к которой пересчитывается «вертикальная» ионосферная погрешность.

Для преобразования этой величины в соответствующее значение «наклонной» дальномерной погрешности с учетом угла возвышения навигационного спутника можно использовать выражение [11]

$$\Delta R_{UIRE,SLT} = \Delta R_{UIRE,V} \left( 1 - \left( \frac{R_E \cos(LEL)}{R_E + h_{F2}} \right)^2 \right)^{-0,5}, \quad (5)$$

где  $h_{F2} = 350$  км — уровень самой большой концентрации электронной плотности слоя F2 ионосферы;  $R_E = 6378,1363$  км — радиус Земли;  $LEL$  — угол возвышения спутника.

На основе той же многолетней статистики наблюдений установлено, что СКО ионосферной дальномерной погрешности колеблется в пределах 2–9 TECU, что соответствует величине UIRE от 0,32 до 1,44 м.

В соответствии с Interface Control Document GPS абсолютная средняя величина дифференциальной задержки сигнала в аппаратуре спутника не должна превышать 15 нс (4,5 м). Величина этой погрешности может быть как положительной, так и отрицательной. При этом СКО данной погрешности, как правило, не превышает 3 нс, т. е. 0,9 м. В действительности величина данной погрешности существенно различается для разных спутников и может варьировать в пределах  $\pm 12$  нс (т. е.  $\pm 3,6$  м) от одного спутника к другому [12, 13].

Абсолютная средняя величина дифференциальной задержки сигнала в аппаратуре приемника также может иметь положительные и отрицательные значения и существенно зависит как от типа приемника, так и от температуры окружающей среды. Например, согласно [13] указанная погрешность может находиться в пределах  $\pm 40$  нс (т. е.  $\pm 12$  м) для навигационных приемников типа Trimble 5700 и Trimble NETP. СКО данной погрешности не превышает 2 нс (0,6 м).

Существует множество оценок дальномерных погрешностей, вызванных шумами многолучевости в точке приема сигналов навигационных спутников [14, 15]. Этот вид погрешности обычно считается центрированным гауссовым шумом, СКО которого зависит от угла возвышения спутника. Здесь мы опирались на результаты, полученные в работе [16], согласно которым СКО данной погрешности находится в пределах 0,13–0,4 м в зависимости от угла возвышения спутника.

Учитывая все вышеизложенное, можно ожидать, что абсолютные значения погрешности  $\Delta R_{ion,i}$ , вычисленной двухчастотным методом по формуле (1), группируются в интервале  $-3,2...28$  м

с доверительной вероятностью 99,7 %, а соответствующие значения СКО варьируют в пределах от 0,8 до 4,2 м.

### Сравнительная экспериментальная оценка качества оповещений WAAS

Процент области покрытия был рассчитан отдельно для уровней защиты по требованиям LP, LPV и LPV200. На рис. 4 представлены суточные ряды, показывающие вариации процента области покрытия CONUS навигационным сервисом в режиме SPP, который удовлетворяет ТНХ по требованиям LP, LPV или LPV200. Видно, что ни 14.02, ни 15.02 процент области покрытия не опускался ниже 82 % для групп требований LP, LPV или LPV200. Здесь и далее красные вертикальные линии обозначают моменты времени, соответствующие предупреждениям WAAS.

После сравнения полученных нами результатов (см. рис. 4) с отчетами WAAS (см. рис. 2) можно сделать следующие выводы:

— в целом качество позиционирования в режиме SPP 15.02 ниже по сравнению с предыдущим днем, что соответствует предупреждениям WAAS;

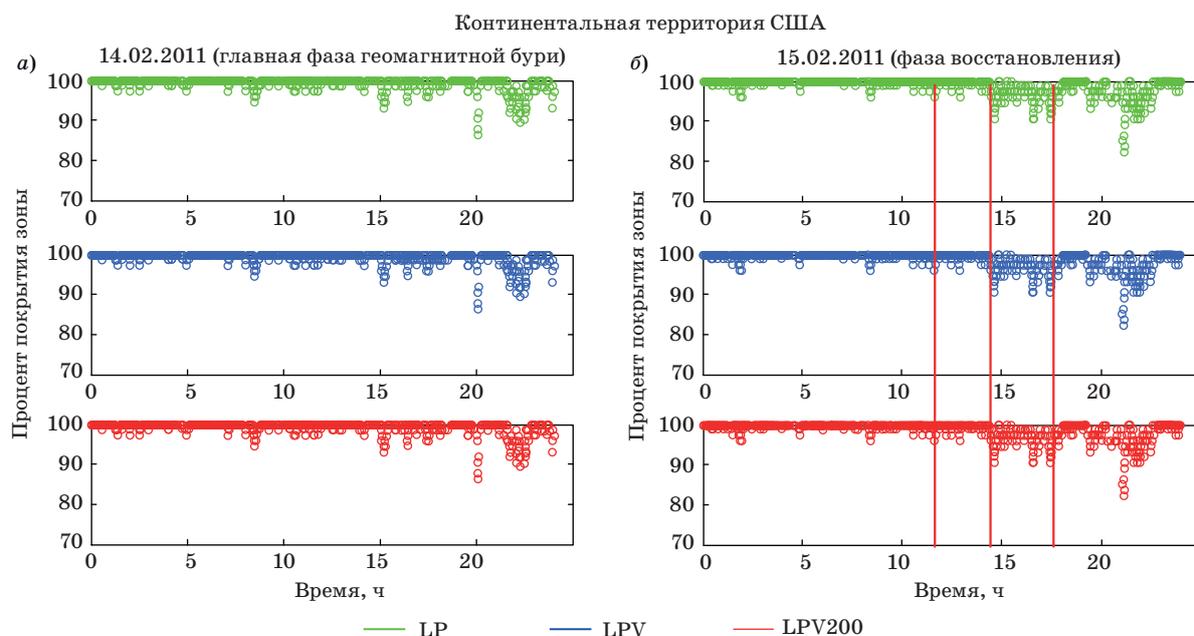
— 15.02.2011 наблюдается два явных интервала сокращения области покрытия навигационным сервисом в режиме SPP, который удовлетворяет требованиям LP, LPV или LPV200 в обла-

сти CONUS. Первый интервал длится с 14:30 до 18:00 UT, в течение которого данные официального отчета WAAS и данные на рис. 4 в основном не противоречат друг другу. Однако качество позиционирования в режиме SPP во втором интервале с 19:30 до 22:00 UT оказывается хуже, чем в первом. При этом, согласно отчету WAAS, нет никаких предупреждений о снижении качества позиционирования на этот временной промежуток;

— в отчете WAAS (см. рис. 2, б) есть предупреждение о сокращении области покрытия ниже 70 % для сервиса LPV200 на территории CONUS в 17:40 UT. Это значение намного ниже по сравнению с оценками области покрытия при использовании навигационного сервиса в режиме SPP для этого же интервала времени (см. рис. 4). Такое несоответствие говорит о возможной ложной тревоге в системе WAAS.

В целом, как и ожидалось, качество позиционирования в режиме SPP, удовлетворяющее требованиям групп LP, LPV или LPV200, показывает более низкий процент области покрытия в сравнении с позиционированием с использованием WAAS (см. рис. 4, а и рис. 2, а). Однако не наблюдается такого глубокого снижения процента области покрытия для требований сервиса LPV200 до уровня < 70 %. Это демонстрирует повышенную ложную тревогу в системе WAAS.

Проведем далее расчет уровней защиты HPL и VPL с использованием модели дальномерных из-



■ **Рис. 4.** Качество позиционирования в режиме SPP в области покрытия CONUS относительно времени UT 14 февраля (а) и 15 февраля (б) 2011 года

■ **Fig. 4.** The quality of positioning in the SPP mode in the CONUS coverage area relative to the UT time on February 14 (а) and February 15 (б), 2011. Red lines indicate time points that correspond to WAAS warnings (see Fig. 2)

мерений (1), содержащих реальную ионосферную дальномерную погрешность. Результат расчета отображен на рис. 5, где показаны суточные ряды вариаций процента области покрытия навигационным сервисом по требованиям групп LP, LPV или LPV200.

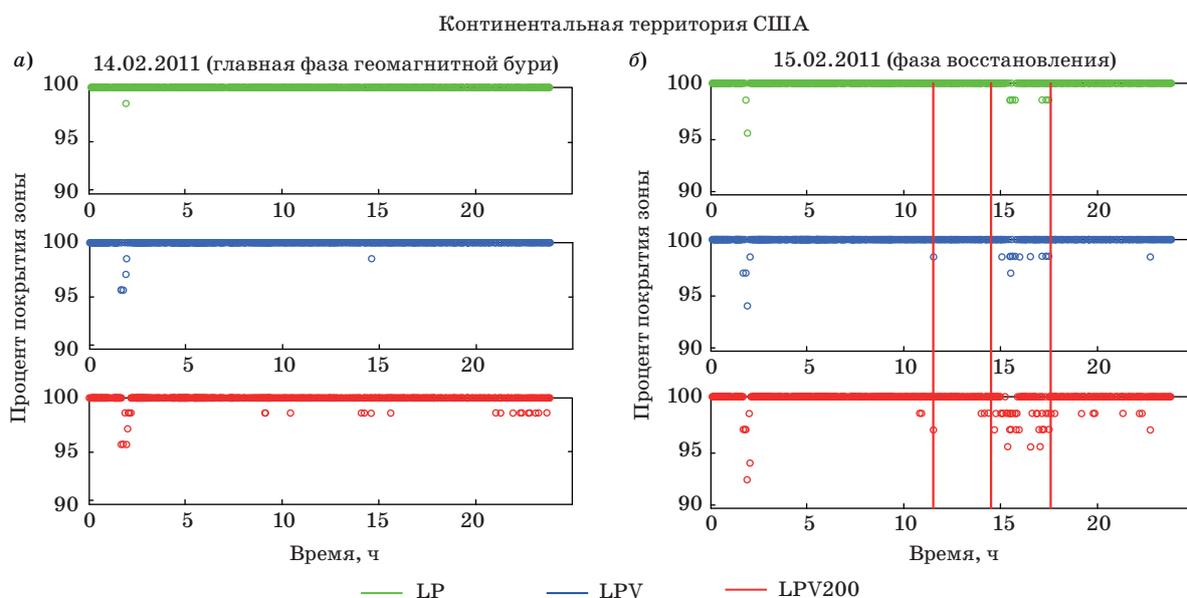
Сравнивая полученные графики на рис. 5, а и официальный отчет WAAS 14.02 (см. рис. 2, а), мы видим лучшее соответствие в отличие от предыдущих результатов (см. рис. 4), особенно для режима LP. Однако также наблюдается и явное расхождение во времени и по абсолютным величинам между предупреждениями WAAS и расчетными значениями с использованием модели (1), особенно для режима LPV200. Самый низкий процент покрытия, полученный в результате моделирования для 14.02.2011, составил около 95 % для режима LPV200 (см. рис. 5, а). Это ниже по сравнению с соответствующими показателями по отчету WAAS (см. рис. 2, а), но вполне ожидаемо, поскольку для своих расчетов мы использовали реальные ионосферные дальномерные погрешности без дифференциальной коррекции.

На диаграммах рис. 2 и 5 видно, что некоторая часть полученных нами данных из официального отчета WAAS имеет совпадения с результатами модельных расчетов по времени в период между 14:30 и 18:00 UT для 15.02.2011 (см. рис. 5, б) для сервисов LPV и LPV200. Но, согласно результатам моделирования, самый низкий процент охватываемой области покрытия за этот период

составил около 92 % (см. рис. 5, б). Это намного выше по сравнению с ожидаемым предупреждением WAAS за тот же период времени (до 70 %) (см. рис. 2, б). Данный факт также может свидетельствовать о возможной ложной тревоге в системе WAAS.

Результаты моделирования (см. рис. 5) и результаты оценки качества навигационного сервиса в режиме SPP (см. рис. 4) также показывают, что область покрытия снизилась до 93 % в период 20:00–20:30 UT для групп THX LP, LPV или LPV200 14.02 и 15.02 (см. рис. 4) и до 96–98 % в период 20:00–23:30 UT для THX LPV200 по результатам моделирования (см. рис. 5). Однако в отчетах WAAS за тот же период времени ничего подобного нет (см. рис. 2). Такое несоответствие между данными WAAS и нашими результатами показывает, что возможна вероятность появления опасного рассогласования информации на выходе WAAS при учете технических сбоев в системе, но при игнорировании реального состояния ионосферы.

В отличие от области CONUS, предупреждения WAAS, выданные для рабочей зоны на территории Аляски, носят случайный характер с сильными провалами ожидаемого процента области покрытия навигационным сервисом по требованиям LP, LPV LPV200 (см. рис. 1). При этом 14.02 с 11:40 до 17:00 UT указано три периода времени с режимами сокращения зоны покрытия до уровня 40 %. 15.02 также ожидается резкое сни-



■ **Рис. 5.** Суточные ряды вариаций процента области покрытия CONUS навигационным сервисом по требованиям групп LP, LPV или LPV200, рассчитанные с учетом реальных ионосферных погрешностей, 14 февраля (а) и 15 февраля (б) 2011 года

■ **Fig. 5.** Daily series of variations in the percentage of CONUS coverage area by the navigation service according to the requirements of the LP, LPV or LPV200 groups, calculated taking into account real ionospheric errors, February 14 (a) and February 15 (b), 2011. Red lines indicate time points that correspond to WAAS warnings (see Fig. 2)

жение качества работы системы в период 17:40–18:00 UT. В целом такое резкое различие ожидаемых прогнозов для территории Аляски и CONUS не противоречит известным особенностям ионосферы на средних и высоких широтах [17].

На рис. 6 представлены суточные ряды, показывающие вариации процента области покрытия территории Аляски навигационным сервисом в режиме SPP, который удовлетворяет ТНХ по требованиям LP, LPV или LPV200. Можно видеть, что и 14.02, и 15.02 процент области покрытия варьирует случайным образом. При этом минимальное значение составляет 78 % для наблюдений 15.02 (рис. 6, б) и 80 % 14.02.2011 (рис. 6, а). Сравнение между предупреждениями WAAS (см. рис. 1) и выходными данными на рис. 6 в указанных условиях, кроме сказанного, показывает, что:

- прогнозы WAAS дают более значительное ожидаемое сокращение зоны покрытия сервисом LPV200 (до 40 %, см. рис. 1, а) в сравнении с реальным качеством позиционирования в режиме SPP;

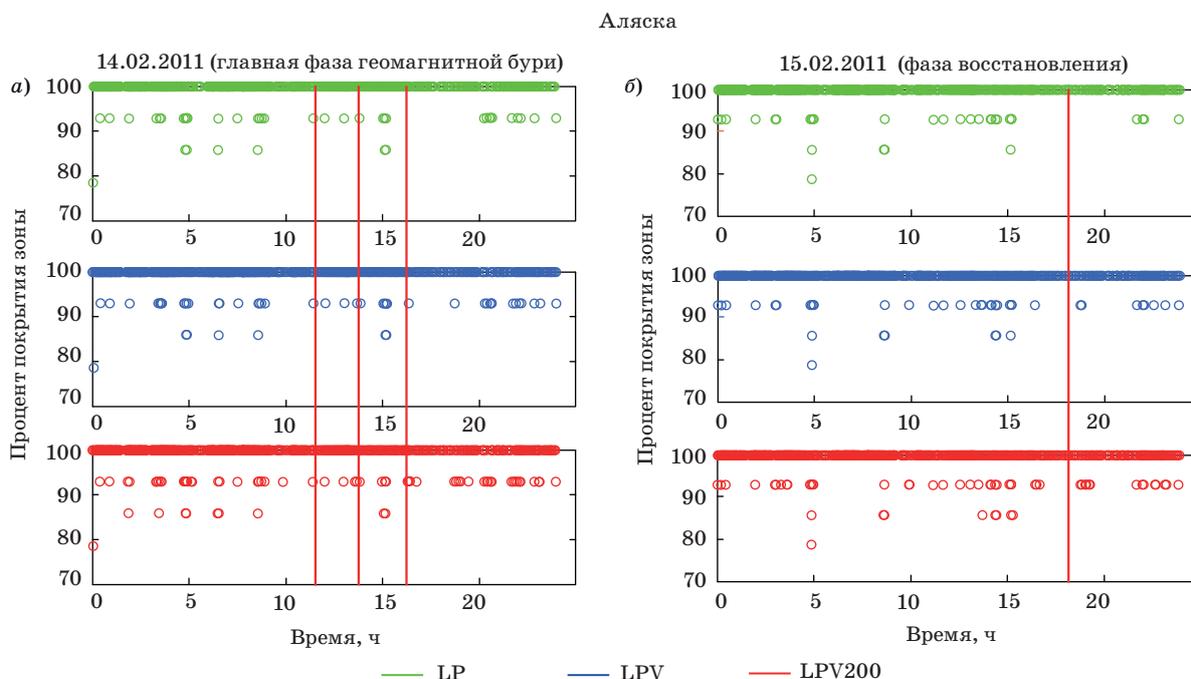
- нет согласования во времени между моментами деградации качества работы системы, которые обнаружены по прогнозам WAAS, и по результатам оценки реального качества позиционирования в режиме SPP. Возможно, это вызвано недостаточной плотностью сети станций GPS, которые нами использованы для анализа ситуации на территории Аляски;

- характер распределения случаев резкого сокращения рабочей зоны по результатам оценки реального качества позиционирования в режиме SPP носит случайный характер, как и прогнозы качества работы WAAS для территории Аляски. Это может говорить о том, что имеется одна и та же физическая причина, вызывающая деградацию качества работы системы в условиях высоких широт.

Далее проведено сравнение между результатами, представленными выше для территории Аляски, и модельными вычислениями уровней защиты HPL и VPL с помощью выражений (1), (2) для тех же условий. Результат расчетов с использованием модели дальномерных измерений (1) отображен на рис. 7, где показан процент области покрытия территории Аляски относительно времени UT.

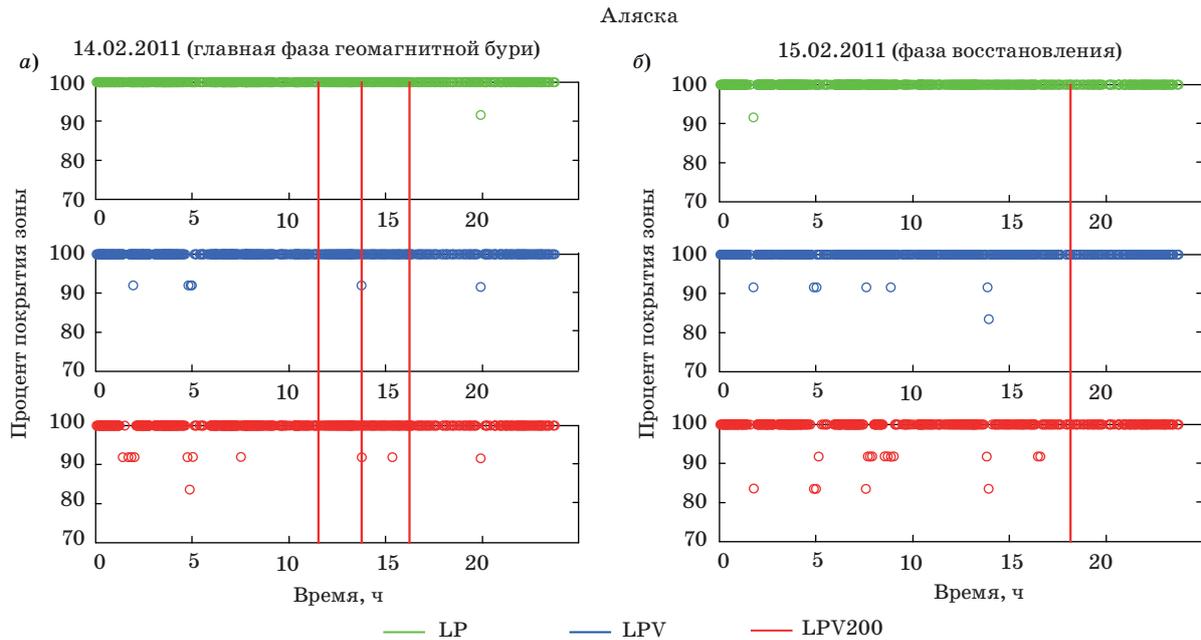
Сравнение между предупреждениями WAAS, качеством позиционирования в режиме SPP и результатами модельных расчетов показывает следующее:

- прогнозы WAAS дают намного большее ожидаемое сокращение зоны покрытия сервисом LPV200 (до 40 %, см. рис. 1) в сравнении с реальным качеством позиционирования (см. рис. 6, до 78 %) и в сравнении с результатами моделирования (см. рис. 7, до 82 %). Это может говорить о достаточно высокой вероятности ложной тревоги, которая выдается прогнозами WAAS в условиях ионосферы высоких широт;



■ Рис. 6. Качество позиционирования в режиме SPP в области покрытия Аляски 14 февраля (а) и 15 февраля (б) 2011 года

■ Fig. 6. The quality of positioning in the SPP mode in the Alaska coverage area on February 14 (a) and February 15 (b), 2011. Red lines indicate time points that correspond to WAAS warnings (see Fig. 1)



■ **Рис. 7.** Суточные ряды вариаций процента области покрытия Аляски навигационным сервисом по требованиям LP, LPV или LPV200, рассчитанные с учетом реальных ионосферных погрешностей, 14 февраля (а) и 15 февраля (б) 2011 года

■ **Fig. 7.** Daily series of variations in the percentage of Alaska coverage area by the navigation service according to LP, LPV, or LPV200 requirements, calculated taking into account real ionospheric errors, on February 14 (a) and February 15 (б), 2011. Red lines indicate time points that correspond to WAAS warnings (see Fig. 1)

— нет согласования во времени между моментами деградации качества работы системы, которые обнаружены по прогнозам WAAS (см. рис. 1), по результатам на рис. 6 и по результатам моделирования (см. рис. 7). Это может быть объяснено двумя причинами. С одной стороны, недостаточным количеством станций и измерений ионосферных дальномерных погрешностей, которые были использованы в нашем исследовании для территории Аляски. С другой стороны, прогнозы WAAS базируются на типовом алгоритме расчета HPL и VPL [формулы (2)], который не дифференцирует ионосферные условия распространения сигнала на средних и высоких широтах. И, напротив, использование в нашем анализе реальных измерений ионосферной дальномерной погрешности может лучше соответствовать местным условиям формирования данного вида погрешности и, соответственно, более корректным значениям уровней защиты HAL и VAL на основе этих данных.

### Заключение

Результаты нашего исследования показали случаи существенного рассогласования между прогнозами доступности требуемых навигационных характеристик WAAS, реальным качеством позиционирования в режиме SPP без ионосфер-

ной коррекции и оценками HPL и VPL, полученными на основе реальных измерений ионосферных погрешностей в двух областях США (центральной части США и Аляски). Прогнозы WAAS дают значительно худший сценарий ожидаемого качества работы системы в рабочей зоне в сравнении с реальным качеством позиционирования и результатами расчетов на основе реальных значений ионосферной дальномерной погрешности.

Некоторые случаи в работе WAAS можно интерпретировать как события «ложной тревоги». В частности, ни 14.02, ни 15.02 процент области покрытия не снижался ниже 82 % для сервисов LP, LPV или LPV200 по результатам оценки реального качества позиционирования в центральной части США. В то же время и в этой же области прогноз WAAS дает сокращение зоны покрытия сервисом LPV до 70 %. Еще хуже ситуация наблюдается на территории Аляски в условиях ионосферы высоких широт. Так, минимальное значение зоны покрытия сервисами LPV или LPV200 при оценке реального качества позиционирования составляет 78 % для наблюдений 15.02.2011 и 80 % 14.02.2011 (см. рис. 6, а). Прогнозы WAAS в этих же условиях дают более значительное ожидаемое сокращение зоны покрытия сервисом LPV200 — до 40 %.

Результаты расчетов HPL и VPL с использованием модели псевдодальности и реальных

ионосферных дальномерных погрешностей (1) в рассмотренных ситуациях в количественном отношении удовлетворительно согласуются с результатами оценок по реальному качеству позиционирования. В области CONUS имеется и качественное согласование: сокращение зоны покрытия сервисами LP, LPV или LPV200 происходит примерно в одно и то же время. Однако такого согласования нет для территории Аляски, которая качественно отличается от территории CONUS с точки зрения формирования ионосферных дальномерных погрешностей. В отличие от среднеширотной ионосферы, ионосфера в авроральной области содержит многомасштабные возмущения электронной концентрации не только в условиях магнитных бурь, но и в невозмущенных условиях [17–19].

Сказанное, вероятно, побуждает пересмотреть структуру и решающие правила алгоритма расчета «локально зависимых» дифференциальных поправок и прогнозов контроля целостности системы, который используется в составе WAAS, принимая во внимание текущее локальное состояние условий распространения радиоволн. Основной концепцией такой работы должно быть то, что доверительные интервалы ожидаемой локально зависимой дальномерной погрешности должны быть достаточно широкими, чтобы соответствовать реальным условиям формирования этой погрешности. Но, с другой стороны, размеры этого интервала не должны приводить к появлению «ложной тревоги», когда фактически ТНХ могут быть достигнуты.

Если существующий алгоритм контроля целостности WAAS в рассматриваемой части остается без изменений, то наилучшим выходом для модернизации самой системы является привлечение сигналов (в том числе на новых частотах, например, L5) и измерений других систем позиционирования, таких как GLONASS, BeiDou, GALILEO, QZSS, а также геостационарных спутниковых группировок. Такое дополнение позволило бы существенно улучшить качество оценки и интерполяции значений GIVE и, соответственно, сузить доверительные интервалы оценок локально зависимых дальномерных погрешностей и снизить вероятность появления ложной тревоги или опасного рассогласования информации.

В реальности это очевидное и эффективное решение наталкивается на серьезные ограничения. Так, на конечную точность вычисления величин GIVE оказывают серьезное влияние плавающие дифференциальные погрешности в аппаратуре навигационных спутников разных типов и поколений и навигационных приемников различных типов и марок [18–22]. При использовании разнотипных спутниковых радионавигационных систем, которые находятся под управлением адми-

нистраций различных стран, весьма непросто обеспечить согласование и поддержание технических стандартов на соответствующую аппаратуру на уровне общих однотипных требований.

Другая не менее серьезная проблема здесь состоит в том, что имеется существенное расхождение в финальной точности дальномерных измерений, которая обеспечивается разными спутниковыми радионавигационными системами. Например, долговременный анализ полной дальномерной погрешности (SISREs) показал, что величина SISRE существенно варьирует от системы к системе. Соответствующие величины составляют:  $(0,7 \pm 0,02)$  м (GPS),  $(1,5 \pm 0,1)$  м (BeiDou),  $(1,6 \pm 0,3)$  м (Galileo),  $(1,9 \pm 0,1)$  м (GLONASS) и  $(0,6 \pm 0,2)$  м (QZSS) [21].

Кроме этого, необходимо иметь в виду, что вероятность возникновения аномальных явлений при измерении радионавигационных параметров по сигналам отдельных спутников возрастает при увеличении количества спутников. Это требует совершенствования качества и разрешающей способности системы мониторинга качества сигналов.

Принимая все сказанное во внимание, мы полагаем, что при формировании оценок HPL и VPL необходимо разделить локально зависимые и глобально зависимые дальномерные погрешности. Существующий алгоритм и средства оценивания глобально зависимых дальномерных погрешностей WAAS (погрешности эфемерид, погрешности частотно-временного обеспечения, дифференциальные погрешности в аппаратуре спутника) могут обеспечить эффективную дифференциальную коррекцию и контроль целостности системы по данной группе погрешностей.

С другой стороны, как показано во множестве исследований, а также в настоящей работе, локально зависимые дальномерные погрешности не всегда могут быть эффективно оценены средствами и алгоритмами WAAS. Вероятно, лучшим решением здесь будет привлечение средств локальной дифференциальной коррекции для формирования выборочных оценок и дифференциальных поправок для локально зависимых дальномерных погрешностей, которые через сети и спутники связи будут сообщаться пользователям широкозонной дифференциальной системы в зонах доступности этих поправок с учетом возможностей расширения этих зон за счет экстраполяции.

Отметим, что предполагается использование не только «штатных» локальных дифференциальных систем, которые сосредоточены точно по своему назначению (районы аэропортов, портов, строительства или проведения проектных изысканий), но и иных опорных станций и сетей, которые в настоящее время получают большое

распространение и активно развиваются. Так, «за последние 15–20 лет в мире развернут ряд опорных измерительных сетей и центров обработки информации, которые пока используются для решения научных и некоторых прикладных задач. Сюда входят сеть международной геодезической службы [“International GNSS (Global Navigation Satellite Systems) Service” — IGS], сети непрерывно действующих опорных станций (“Continuously Operating Reference Stations” — CORS), которые развернуты рядом государственных агентств, и даже частных компаний, именно для поддержки высокоточных координатно-временных определений на определенных территориях (административный округ или государство). Ввиду высокой востребованности, в настоящее время рядом государств уже ставится задача, во-первых, рас-

ширять существующие и создавать опорные новые сети и, во-вторых, рассмотреть вопрос о том, как использовать возможности и базы данных указанных опорных сетей, чтобы наилучшим образом обеспечить реализацию высокоточной «глобальной» навигации в рамках единой универсальной всемирной концепции GNSS» [23]. В рамках данной концепции развития технологий спутниковой навигации можно рассматривать и наше предложение по модернизации широкозонных дифференциальных систем.

### Финансовая поддержка

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 17-77-20005.

### Литература

1. Demyanov V., Likhota R. The method of GNSS positioning availability control for transportation applications. *Machines, Technologies, Materials*, 2015, vol. 9, iss. 5, pp. 11–13.
2. Демьянов В. В., Халиманов Д. С., Имарова О. Б. Контроль доступности требуемых навигационных характеристик ГЛОНАСС на железнодорожном транспорте. *Транспортная инфраструктура Сибирского региона: материалы Десятой Междунар. науч.-практ. конф., Иркутск, 21–24 мая 2019 г.: в 2 т. Иркутск, ИрГУПС, 2019, т. 1, с. 243–248.*
3. *Global positioning system wide area augmentation system (WAAS) performance standard. Appendix B: Key Terms, Definitions, Abbreviations and Acronyms. 1st Edition, 2008.* <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf> (дата обращения: 12.11.2019).
4. *Wide-area augmentation system performance analysis report, Report # 36. Reporting Period: January 1 to March 31, 2011.* <http://www.nstb.tc.faa.gov/DisplayArchive.htm> (дата обращения: 16.12.2019).
5. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., and Gamayunov I. F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips. *Advances in Space Research*, 2009, vol. 43, no. 6, pp. 964–972. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.015>
6. *Federal Aviation Administration. Reports.* [www.nstb.tc.faa.gov/reports.htm](http://www.nstb.tc.faa.gov/reports.htm) (дата обращения: 16.12.2019).
7. *Rinex data.* <http://lox.ucsd.edu/pub/rinex/2011> (дата обращения: 16.12.2019).
8. Estey L., and Meertens C. TEQC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, 1999, vol. 3(1), pp. 42–49. doi:10.1007/PL00012778
9. *SARPS Amendment 91, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Aeronautical Telecommunications: International Standards and Recommended Practices. Vol. 1. Radio Navigation Aids,* July, 2006. [https://code7700.com/pdfs/icao/icao\\_annex\\_10\\_vol\\_i\\_6th\\_edition\\_july\\_2006\\_.pdf](https://code7700.com/pdfs/icao/icao_annex_10_vol_i_6th_edition_july_2006_.pdf) (дата обращения: 21.01.2020).
10. Themens D. R., Jayachandran P. T., Langley R. B., MacDougall J. W., and Nicolls M. J. Determining receiver biases in GPS-derived total electron content in the auroral oval and polar cap region using ionosonde measurements. *GPS Solutions*, 2013, vol. 17, pp. 357–369. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0284-6>
11. *Minimum Operation Performance Standard: MOPS DO-229E. Version C, Appendix A: Wide Area Augmentation System Signal Specification.* RTCA Inc., Paper No. 283-16/PMC-1548, December, 2016. <https://standards.globalspec.com/std/10072422/rtca-do-229-tool> (дата обращения: 23.01.2020).
12. Mylnikova A. A., Yasyukevich Y. V., Kunitsyn V. E., Padokhin A. M. Variability of GPS/GLONASS differential code biases. *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.11.002>
13. Schaer S. *Overview of GNSS Biases. International GNSS Service. Workshop on GNSS Biases.* 2012. [http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12\\_1\\_3.1.pdf](http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_1_3.1.pdf) (дата обращения: 23.01.2020).
14. Hilla S., Cline M. Evaluating pseudorange multipath effects at stations in the National CORS Network. *GPS Solutions*, 2004, vol. 7, pp. 253–267. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0073-3>
15. Xia L. Multipath in GPS navigation and positioning. *GPS Solutions*, vol. 8, pp. 49–50. <https://doi.org/10.1007/s10291-004-0085-7>
16. Sieradzki R., and Paziewski J. Study on reliable GNSS positioning with intense TEC fluctuations at high latitudes. *GPS Solutions*, 2016, vol. 20, pp. 553–563. doi:10.1007/s10291-015-0466-0
17. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V. Ionosphere geomagnetic variations and GPS positioning errors during the major magnetic storm on 29–31 October 2003. *International Reference Ionosphere News*, 2004, vol. 11 (3–4), pp. 10–14.

18. Demyanov V. V., Yasyukevich Y. V., Ishin A. B., Astafyeva E. I. Effects of ionosphere super-bubble on the GPS positioning performance depending on the orientation relative to geomagnetic field. *GPS Solutions*, 2012, vol. 16, pp. 181–189. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0217-9>
19. Veetil S. V., Haralambous H., Aquino M. Observations of quiet-time moderate midlatitude L-band scintillation in association with plasma bubbles. *GPS Solutions*, 2017, vol. 21, pp. 1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0598-x>
20. El-Mowafy A. GNSS multi-frequency receiver single-satellite measurement validation method. *GPS Solutions*, 2014, vol. 18(4), pp. 553–561. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0352-6>
21. Montenbruck O., Steigenberger P., and Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solutions*, 2015, vol. 19, pp. 321–333. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0390-8>
22. Hakansson M., Jensen A. B. O., Horemuz M., and Hedling G. Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning. *GPS Solutions*, 2017, vol. 21, pp. 849–860. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0572-7>
23. Демьянов В. В., Имарова О. Б. Тенденции развития технологий GNSS и направлений их применения на транспорте. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*, 2018, т. 58, № 2, с. 82–90. doi:10.26731/1813-9108/2018/2(58)/82-90.

UDC 550.388.2

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

**Evaluating the quality of WAAS availability control algorithm under geomagnetic storm conditions**V. V. Demyanov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, [orcid.org/0000-0003-2893-9522](https://orcid.org/0000-0003-2893-9522), [sword1971@yandex.ru](mailto:sword1971@yandex.ru)D. S. Khalimanov<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, [orcid.org/0000-0002-9389-6701](https://orcid.org/0000-0002-9389-6701)M. E. Fedorov<sup>a</sup>, Senior Lecturer, [orcid.org/0000-0002-4043-4730](https://orcid.org/0000-0002-4043-4730)O. B. Imarova<sup>a</sup>, Researcher, [orcid.org/0000-0001-7087-4000](https://orcid.org/0000-0001-7087-4000)<sup>a</sup>Irkutsk State Transport University, 15, Chernyshevsky St., 664074, Irkutsk, Russian Federation

**Introduction:** The Wide Area Augmentation System (WAAS) is vulnerable to false alarms about the violation of the required navigation parameter availability under geomagnetic disturbances. As a consequence, the system operation efficiency might decrease because of a mismatch between the output of the control system and the actual quality of the navigation-time support. **Purpose:** Comparative analysis of the actual quality of navigation-and-time support for GPS users and the output information of the system for monitoring the availability of the required WAAS navigation parameters under a moderate magnetic storm and with technical failures during the operation of separate segments of GPS and WAAS systems. **Results:** Location errors were calculated for 82 reference stations in the USA equipped with GPS navigation receivers. The calculations used the geometric ranges of visible navigation satellites and the corresponding real values of the ionospheric range-measurement error determined by the method of two-frequency measurements. Based on the same data and through the use of the conventional standard WAAS availability control algorithm, the user protection levels were calculated in the horizontal and vertical planes. The results of these calculations are presented as a time graph of WAAS operating area coverage percentage, which was compared with the respective graphs presented in the official WAAS work reports. It is established that there are cases of significant discrepancy between the forecasts about the availability of the required navigation parameters according to the WAAS data and the real quality of positioning in the operating area of this system. There are discrepancies in the results of calculations of protection levels in the horizontal and vertical planes obtained from official reports on the operation of the system and in calculations based on the geometric range and real ionospheric range-measurement error. **Practical relevance:** Recommendations are proposed in order to reconsider the development of a navigation parameter availability control for wide-area augmentation systems, splitting the calculation into “locally dependent” and “globally dependent” components of differential corrections of range-measurement errors. It will reduce the likelihood of false alarms or dangerous inconsistencies in information within the system.

**Keywords** — availability control, integrity, required navigation parameters, WAAS, differential systems.

**For citation:** Demyanov V. V., Khalimanov D. S., Fedorov M. E., Imarova O. B. Evaluating the quality of WAAS availability control algorithm under geomagnetic storm conditions. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 46–59 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-46-59

**References**

1. Demyanov V., Likhota R. The method of GNSS positioning availability control for transportation applications. *Machines, Technologies, Materials*, 2015, vol. 9, iss. 5, pp. 11–13.
2. Demyanov V. V., Khalimanov D. S., Imarova O. B. Monitoring the integrity of the positioning service GLONASS on railway transport. *Materialy Desyatoy Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii “Transportnaya infrastruktura Sibirskogo regiona”* [Proc. 10<sup>th</sup> Int. Conf. “Transport infrastructure of the Siberian region”]. Irkutsk, 2019, vol. 1, pp. 243–248 (In Russian).
3. *Global positioning system wide area augmentation system (WAAS) performance standard*. Appendix B: Key Terms, Definitions, Abbreviations and Acronyms. 1st Edition, 2008. Available at: <https://www.gps.gov/technical/ps/2008-WAAS-performance-standard.pdf> (accessed 12 November 2019).
4. *Wide-area augmentation system performance analysis report, Report # 36*. Reporting Period: January 1 to March 31, 2011. Available at: <http://www.nstb.tc.faa.gov/DisplayArchive.htm> (accessed 16 December 2019).
5. Afraimovich E. L., Astafyeva E. I., Demyanov V. V., and Gamayunov I. F. Mid-latitude amplitude scintillation of GPS signals and GPS performance slips. *Advances in Space Research*, 2009, vol. 43, no. 6, pp. 964–972. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2008.09.015>

6. *Federal Aviation Administration. Reports.* Available at: [www.nstb.tc.faa.gov/reports.htm](http://www.nstb.tc.faa.gov/reports.htm) (accessed 16 December 2019).
7. *Rinex data.* Available at: <http://lox.ucsd.edu/pub/rinex/2011> (accessed 16 December 2019).
8. Estey L., and Meertens C. TEC: the multi-purpose toolkit for GPS/GLONASS data. *GPS Solutions*, 1999, vol. 3(1), pp. 42–49. doi:10.1007/PL00012778
9. *SARPS Amendment 91, Annex 10 to the Convention on International Civil Aviation, Aeronautical Telecommunications: International Standards and Recommended Practices.* Vol. 1. Radio Navigation Aids, July, 2006. Available at: [https://code7700.com/pdfs/icao/icao\\_annex\\_10\\_vol\\_i\\_6th\\_edition\\_july\\_2006\\_.pdf](https://code7700.com/pdfs/icao/icao_annex_10_vol_i_6th_edition_july_2006_.pdf) (accessed 21 January 2020).
10. Themens D. R., Jayachandran P. T., Langley R. B., MacDougall J. W., and Nicolls M. J. Determining receiver biases in GPS-derived total electron content in the auroral oval and polar cap region using ionosonde measurements. *GPS Solutions*, 2013, vol. 17, pp. 357–369. <https://doi.org/10.1007/s10291-012-0284-6>
11. *Minimum Operation Performance Standard: MOPS DO-229E.* Version C, Appendix A: *Wide Area Augmentation System Signal Specification.* RTCA Inc., Paper No. 283-16/PMC-1548, December, 2016. Available at: <https://standards.global-spec.com/std/10072422/rtca-do-229-tool> (accessed 23 January 2020).
12. Mylnikova A. A., Yasyukevich Y. V., Kunitsyn V. E., Padokhin A. M. Variability of GPS/GLONASS differential code biases. *Results in Physics*, 2015, vol. 5, pp. 9–10. <https://doi.org/10.1016/j.rinp.2014.11.002>
13. Schaer S. *Overview of GNSS Biases. International GNSS Service. Workshop on GNSS Biases.* 2012. Available at: [http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12\\_1.3.1.pdf](http://www.biasws2012.unibe.ch/pdf/bws12_1.3.1.pdf) (accessed 23 January 2020).
14. Hilla S., Cline M. Evaluating pseudorange multipath effects at stations in the National CORS Network. *GPS Solutions*, 2004, vol. 7, pp. 253–267. <https://doi.org/10.1007/s10291-003-0073-3>
15. Xia L. Multipath in GPS navigation and positioning. *GPS Solutions*, vol. 8, pp. 49–50. <https://doi.org/10.1007/s10291-004-0085-7>
16. Sieradzki R., and Paziewski J. Study on reliable GNSS positioning with intense TEC fluctuations at high latitudes. *GPS Solutions*, 2016, vol. 20, pp. 553–563. doi:10.1007/s10291-015-0466-0
17. Afraimovich E. L., Astafieva E. I., Demyanov V. V. Ionosphere geomagnetic variations and GPS positioning errors during the major magnetic storm on 29–31 October 2003. *International Reference Ionosphere News*, 2004, vol. 11 (3–4), pp. 10–14.
18. Demyanov V. V., Yasyukevich Y. V., Ishin A. B., Astafyeva E. I. Effects of ionosphere super-bubble on the GPS positioning performance depending on the orientation relative to geomagnetic field. *GPS Solutions*, 2012, vol. 16, pp. 181–189. <https://doi.org/10.1007/s10291-011-0217-9>
19. Veetil S. V., Haralambous H., Aquino M. Observations of quiet-time moderate midlatitude L-band scintillation in association with plasma bubbles. *GPS Solutions*, 2017, vol. 21, pp. 1113–1124. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0598-x>
20. El-Mowafy A. GNSS multi-frequency receiver single-satellite measurement validation method. *GPS Solutions*, 2014, vol. 18(4), pp. 553–561. <https://doi.org/10.1007/s10291-013-0352-6>
21. Montenbruck O., Steigenberger P., and Hauschild A. Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solutions*, 2015, vol. 19, pp. 321–333. <https://doi.org/10.1007/s10291-014-0390-8>
22. Hakansson M., Jensen A. B. O., Horemuz M., and Hedling G. Review of code and phase biases in multi-GNSS positioning. *GPS Solutions*, 2017, vol. 21, pp. 849–860. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0572-7>
23. Demyanov V. V., Imarova O. B. Trends in the development of GNSS technologies and directions of their application in transport. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*, 2018, vol. 58, no. 2, pp. 82–90 (In Russian). doi:10.26731/1813-9108.2018.2(58).109-90

## Поддержка принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта: современное состояние и концептуальная модель

А. В. Смирнов<sup>а</sup>, доктор техн. наук, профессор, [orcid.org/0000-0001-8364-073X](https://orcid.org/0000-0001-8364-073X), [smir@iias.spb.su](mailto:smir@iias.spb.su)

Т. В. Левашова<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-1962-7044](https://orcid.org/0000-0002-1962-7044)

А. В. Пономарев<sup>а</sup>, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, [orcid.org/0000-0002-9380-5064](https://orcid.org/0000-0002-9380-5064)

<sup>а</sup>Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, 14-я линия В. О., 39, Санкт-Петербург, 199178, РФ

**Введение:** в настоящее время благодаря развитию информационно-коммуникационных технологий и искусственного интеллекта все более широкое применение находят системы человеко-машинных вычислений, однако в подавляющем большинстве разработок в этой области человек, по сути, играет роль «вычислительного устройства», которое может обрабатывать запросы определенного вида. Таким образом, творческий потенциал и способности к самоорганизации людей в значительной степени игнорируются. **Цель:** разработка систем поддержки принятия решений, основанных на применении человеко-машинного коллективного интеллекта. **Результаты:** проведен анализ существующего состояния проблемы в области построения гибких человеко-машинных систем и предложена концептуальная модель среды, на базе которой могут создаваться системы поддержки принятия решений. Центральными понятиями разработанной концептуальной модели являются: а) проблема, на решение которой направлена деятельность человеко-машинного коллектива; б) коллектив машин и людей, взаимодействующих посредством среды в целях решения проблемы; в) модель процесса, описывающая процедуру поддержки принятия решений в части сбора информации, разработки и оценки альтернатив. **Практическая значимость:** предполагается, что применение разработанной модели позволит создавать системы поддержки принятия решений нового класса, используя потенциал самоорганизации человеко-машинных коллективов.

**Ключевые слова** – поддержка принятия решений, человеко-машинный коллективный интеллект, методология, концептуальная модель.

**Для цитирования:** Смирнов А. В., Левашова Т. В., Пономарев А. В. Поддержка принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта: современное состояние и концептуальная модель. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 60–70. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-60-70

**For citation:** Smirnov A. V., Levashova T. V., Ponomarev A. V. Decision support based on human-machine collective intelligence: state-of-the-art and conceptual model. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 60–70 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-60-70

### Введение

В широком смысле под коллективным интеллектом понимается способность группы (команды) находить решения задач [1]. Исторически исследования в области коллективного интеллекта были посвящены разработке методов и процедур, повышающих данную способность коллективов, состоящих из людей. Однако в настоящее время благодаря развитию информационно-коммуникационных технологий и искусственного интеллекта (ИИ) все более широкое применение находят человеко-машинные системы. Ярким примером подобных систем являются системы человеко-машинных вычислений (см. например, [2–4]), в которых наряду с операциями, выполняемыми программными компонентами, в цикл обработки информации включаются и операции, требующие применения интеллектуальных усилий людей.

Подавляющая часть исследований в области систем человеко-машинных вычислений (краудсор-

синга, крауд-вычислений) позиционирует человека как вид «вычислительного устройства», которое может обрабатывать запросы определенного вида (например, распознавать образ). Функция человека-участника сводится к выполнению конкретного задания посредством взаимодействия с системой способом, жестко ограниченным формой отображения подробностей задания и ввода результата. Отчасти это связано с тем, что включение человека рассматривается просто как адаптация существующих принципов построения вычислительных систем. Особенно это хорошо заметно на примере сервис-ориентированной архитектуры (SOA), изначально предназначенной для создания программных систем, но сформулированной с помощью достаточно высокоуровневых положений, допускающих различные способы реализации сервисов, из которых конструируется система. В частности, существует ряд адаптаций SOA для представления сервисов, реализуемых людьми [5, 6]. Таким образом, творческий потенциал и способности к самоорганизации людей игнорируются подобными системами.

Вместе с тем использование этого потенциала и построение систем человеко-машинного коллективного интеллекта (ЧМКИ) и дополненного интеллекта (augmented intelligence), основанного на взаимодействии людей и современных систем ИИ, по мнению многих аналитиков, является одним из наиболее перспективных направлений развития в области информатики и информационных технологий [7].

Следует отметить при этом, что ЧМКИ оказывается наиболее востребованным в системах поддержки принятия решений, так как такие системы, с одной стороны, предполагают гибкость потока работ, поскольку зачастую предусматривают итеративное исследование проблемы, с другой стороны, активно используют элементы ИИ.

Исследования авторов статьи посвящены созданию механизмов организации поддержки принятия решений (ППР), основанных на применении ЧМКИ. В частности, в настоящей статье проводится анализ существующего состояния проблемы в области построения человеко-машинных систем (с учетом возможности самоорганизации их участников) и предлагается концептуальная модель среды, на базе которой могут создаваться системы поддержки принятия решений (СППР).

## Обзор современного состояния проблемы

Во многих исследованиях как в области организационного управления, так и в области человеко-машинных систем показывается, что при решении сложных задач возможностей фиксированных потоков работ оказывается недостаточно [8]. Преимущество применения элементов самоорганизации при функционировании малых команд также подчеркивается в многочисленных практических публикациях (например, по разработке программного обеспечения в рамках Agile-методик [9, 10] или по наукоемкой деятельности [11]). Следовательно, среда ППР, функционирующая на основе коллективного ЧМКИ, должна обеспечивать определенные механизмы самоорганизации.

Конкретные требования к среде должны опираться на существующие знания о процессах самоорганизации в человеческих и смешанных (человеко-машинных) коллективах. Для выявления таких требований было проведено исследование литературы, включавшее в себя анализ как общих вопросов самоорганизации в рассматриваемом классе коллективов, так и специфических вопросов построения систем человеко-машинных вычислений, предусматривающих элементы самоорганизации.

В рамках первого направления значительный интерес представляют междисциплинарные ис-

следования, раскрывающие структуру феноменов самоорганизации при совместной работе людей. В частности, можно отметить работу [12], в которой предлагается парадигма для объяснения и изучения того, как на основе локальных взаимодействий между агентами возникают такие общие паттерны, как распространение информации, возникновение и распространение норм, участие в совместных действиях. Основой этой парадигмы авторы видят агентный подход и агентное моделирование (agent-based models). В относительно независимую группу можно выделить работы, в которых разбираются механизмы самоорганизации на достаточно высоком уровне. Так, в работе [13] рассматриваются в общем виде взаимодействия между живыми организмами (от колоний бактерий до человеческих сообществ), а в [14] авторы исследуют роль возникновения социальных связей методами эволюционной теории игр. На схожем (междисциплинарном) уровне находится и работа [15], в которой выделяются основные механизмы и примитивы координации (использование разделяемого ресурса, назначение задания, передача артефакта и др.), являющиеся основой функционирования коллектива.

Наибольшую же актуальность с точки зрения исследуемой проблемы имеют работы по многоагентным технологиям, где затрагивается вопрос конструирования самоорганизующихся систем [16–18], а также работы по конструированию социальных робототехнических систем [19]. В частности, одной из актуальных задач является адаптация поведения искусственных агентов для их соответствия поведению людей (что необходимо для эффективной совместной работы). Перспективное решение данной задачи, предлагаемое в работах Ф. Дигнума (F. Dignum), опирается на понятие социальной практики (social practice) как на высокоуровневую спецификацию нормального (ожидаемого) поведения в данном социальном контексте [18, 20].

Термин «самоорганизация» широко применяется и в социальных науках [21]. Подавляющее большинство интерпретаций этого понятия включают четыре важнейших фактора: образование паттернов, автономность, устойчивость и динамику [22]. С точки зрения ППР наибольший интерес в данной области исследований представляют работы, в которых затрагиваются механизмы функционирования и динамика малых групп — выделение в них лидерства, механизм принятия решений (см., например, [23, 24]). В рамках теории организации (organization theory) выделяется также ряд «нестандартных» форм организаций — временных организаций (temporary organizations) и виртуальных организаций (virtual organizations), теоретические ис-

следования которых уже нашли применение при создании моделей крауд-систем [25, 26].

При рассмотрении специфических вопросов в центре исследования были системы социальных вычислений и человеко-машинные системы, в которых сценарий работы не фиксирован (не задан жестко конечным пользователем). В одной из наиболее ранних работ в этом направлении [27] предлагается алгоритм Price-Divide-Solve (PDS), определяющий правила совместной декомпозиции задачи до элементарных заданий, которые могут быть выполнены одним участником.

Одной из значимых попыток создания систем, обеспечивающих совместную работу людей и программных сервисов при решении разного класса задач, являются так называемые гибридные коллективные адаптивные системы (Hybrid Diversity-Aware Collective Adaptive Systems — HDACAS), вопросам создания которых посвящен, например, проект SmartSociety [28]. Разработанные в рамках этого проекта подходы и программные инструменты позволяют создавать гибридные системы, в функционировании которых участвуют как программные сервисы, так и люди. Однако этот проект имеет ряд недостатков:

- жизненный цикл проблемы достаточно жестко определяется платформой (сначала стадия переговоров, потом исполнения — возврат от исполнения к переговорам невозможен);

- программные сервисы не могут играть активную роль (в том числе участвовать в переговорах с людьми);

- несмотря на то что присутствует возможность адаптации к изменяющимся условиям, точки адаптации и ее алгоритмы должны быть заранее описаны разработчиком системы.

Концепция flash organizations [8, 26, 29] также нацелена на расширение возможности самоорганизации крауд-команд. Авторы определяют flash organization как крауд-сообщество, структурированное для достижения сложных целей. При построении таких сообществ предлагается применять подходы, схожие с теми, что используются в современных организациях, а именно: задействовать такие формальные структуры, как роли, иерархии и команды, определяющие обязанности, взаимосвязи и потоки информации без явной спецификации всех действий. Здесь: 1) участники не полагаются на наличие потока работ, предписывающих им выполнение конкретных действий; 2) за счет модели «pull request» организация может приспосабливаться и адаптироваться, не будучи ограниченной заданным набором заданий, ролей и зависимостей; 3) не обязательно нанимать всех исполнителей сразу, можно адаптировать структуру, добавляя новых исполнителей прямо в процессе достижения целей.

В результате проведенного обзора можно сделать следующие выводы.

1. Исследователи социальных систем и практики в области конструирования таких систем сходятся во мнении, что элементы самоорганизации оказываются критически важными, особенно при решении сложных задач. В настоящее время не существует решений, поддерживающих коллективный интеллект, образуемый искусственными интеллектуальными агентами и людьми.

2. Одну из важнейших ролей в функционировании самоорганизующихся коллективов, состоящих из людей, играют социальные нормы и адаптация политик поведения участников коллектива для следования этим нормам. Соответственно, при включении в состав коллектива программных сервисов следует обеспечить возможность считывания и интерпретации ими социальных норм, а также следования им. Причем, поскольку программные сервисы могут быть созданы различными пользователями среды, слой реализации социальных норм было бы рационально отделить от кода непосредственно программных сервисов, сделав его частью общей инфраструктуры среды.

3. Важной чертой самоорганизации в человеческих коллективах является координация на основе ролей [8, 26]. Концепция роли должна быть обеспечена средой, равно как и механизмы «переключения» программного агента между ролями (если это возможно) и уточнения конкретного содержания роли в рамках данного коллектива [17].

4. Проявление самоорганизации коллектива может быть упорядочено с помощью паттернов [22], структур и схем координации, к которым приходят участники в определенных условиях.

5. Необходимо формальное представление дискурса [30, 31], позволяющее отследить причину тех или иных аргументов или результатов (происхождение информации), «понимаемое» как людьми-участниками, так и программными агентами.

Полученные выводы были использованы при определении требований к среде ЧМКИ и учтены в концептуальной модели СППР на основе ЧМКИ.

### **Требования к среде поддержки принятия решений на основе ЧМКИ**

В результате исследования был разработан набор требований к системам поддержки принятия решений на основе ЧМКИ. Во-первых, значительная часть требований к среде ЧМКИ опирается на исследование организационного поведения, в ко-

торых выделяются преграды для координации внутри команд (географическое распределение, взаимодействие посредством технологий, нестабильность состава команд), и предлагаются средства, направленные на преодоление данных преград (структурирование команд, распределение ответственности и пр.). Наличие таких средств, обеспечивающих координацию, становится требованием к системам ЧМКИ. Во-вторых, часть требований базируется на экспериментальных исследованиях систем краудсорсинга и крауд-вычислений при решении сложных задач (см., например, [8]). В-третьих, ряд требований обусловлен гетерогенным составом среды, включением в нее как людей, так и программных сервисов. Можно выделить два уровня конвергенции коллективного интеллекта и ИИ — базовый и прикладной. При разработке универсальной среды целесообразно сконцентрироваться на базовом уровне, включающем в себя функции, имеющие место в самых разных системах, такие как использование ИИ для рациональной организации коллективов, занимающихся проблемой; обеспечение взаимодействия между системой ИИ, участниками коллектива и конечными пользователями.

Требования могут быть структурированы в две тематические группы.

1. *Обеспечение взаимодействия и координации.* Среда должна предоставлять возможность спецификации процесса ППР с различной степенью детализации — от «укрупненной» (роль) до подробной (последовательность действий). Необходимость этого требования вытекает из того, что подробная спецификация не всегда может быть составлена заранее, а составление ее может оказаться слишком трудоемким для лица, принимающего решения (ЛПР).

Конечный пользователь (ЛПР) должен иметь возможность отслеживать ход выполнения процесса и влиять на его реализацию на любом этапе. Необходимость этого требования связана с тем, что при отсутствии такого контроля шанс потерять исполнителями цели и контекст процесса оказывается достаточно большим [8]. Например, конечный пользователь может отслеживать прогресс, обеспечивать обратную связь, отвечать на вопросы в чате, а также ставить процесс на паузу, вносить изменения в структуру команды и продолжать выполнять требуемые действия [29].

Среда должна обеспечивать возможность повторно использовать фрагменты процесса ППР. Это существенно упростит планирование. Повторное использование может осуществляться в различной форме: как систематизированный каталог зарекомендовавших себя паттернов координации (из которого ЛПР или участник может самостоятельно выбрать решение, соответствующее

текущей проблеме) или как рекомендуемая система, которая производит анализ ситуации и предлагает хорошо зарекомендовавший себя паттерн координации.

Среда должна иметь возможность обеспечивать формирование команд, состоящих из участников, с которыми (и у которых) есть положительный опыт взаимодействия. Что это важно, показано, например, в работе [32] и предложен способ этого достичь в среде, где присутствие участников не гарантировано (способ основан на формировании команды посредством решения оптимизационной задачи, в целевую функцию которой входят как характеристики полезности участника команды, оцененные на основе предыдущих взаимодействий, так и ожидаемая доступность участника). Для реализации этого требования должны быть разработаны модели анализа истории взаимодействий, предсказания будущей эффективности участников и формирования команд с учетом различных критериев.

2. *Представление информации.* Модель информации о процессе ППР, используемая в среде, во-первых, должна быть достаточно выразительной, чтобы с ее помощью можно было описать любые действия команды, а во-вторых, должна иметь визуальное представление, облегчающее взаимодействие и координацию внутри команды (создание и изменение плана действий, состава команды и пр.).

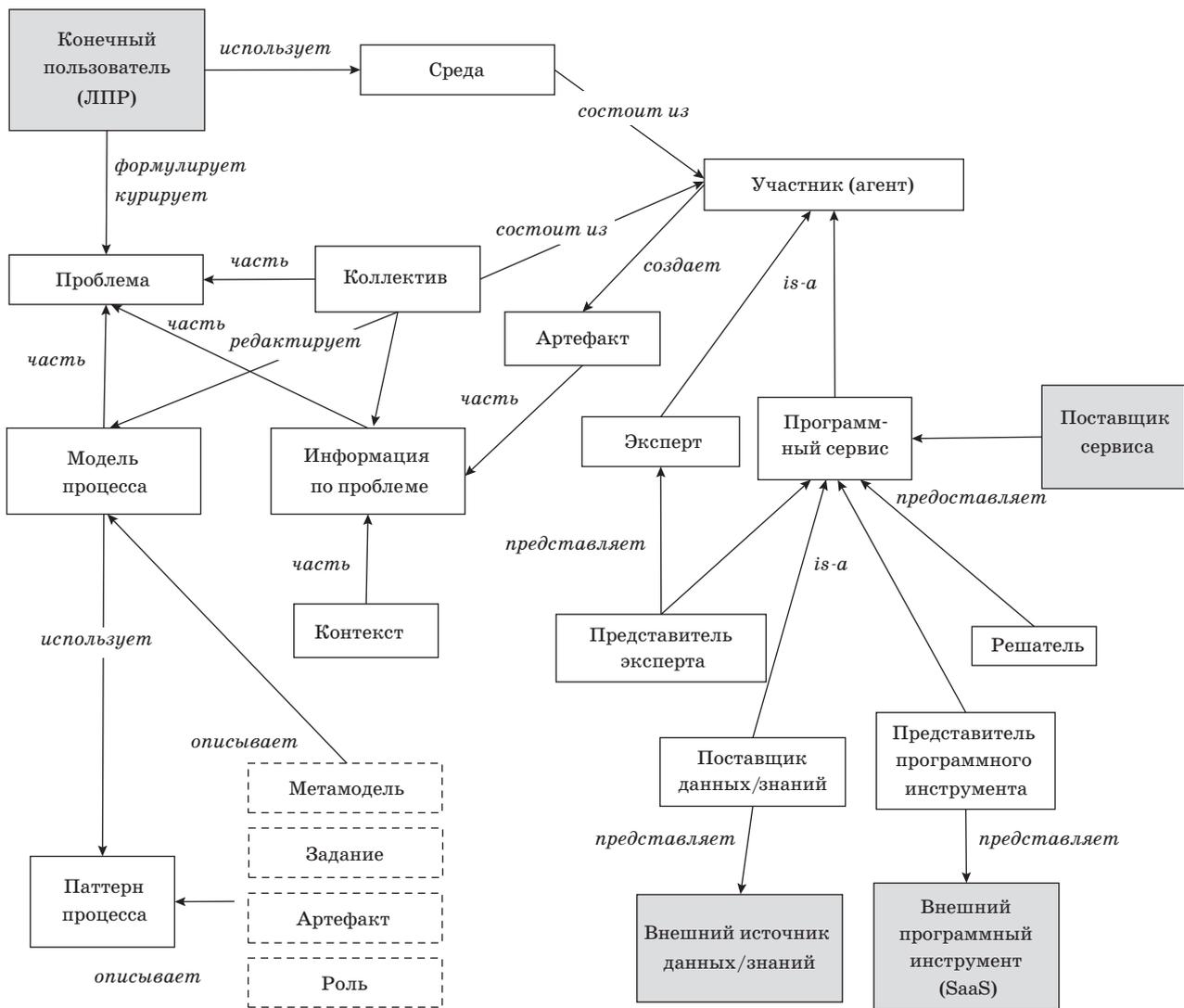
Информация о критериях и альтернативах должна представляться в виде, удобном для ЛПР (см., например, [33]).

Среда должна обеспечивать преобразование текущего состояния процесса ППР, описаний артефактов (и, возможно, содержимого некоторых артефактов) в машиночитаемую форму, чтобы сделать их доступными для программных агентов. Эта необходимость также определяется базовым уровнем конвергенции коллективного и искусственного интеллекта.

## Концептуальная модель поддержки принятия решений на основе ЧМКИ

В результате проведенного обзора была разработана концептуальная модель ППР на основе ЧМКИ. Данная модель (рис. 1) задает содержательную интерпретацию всех специфических понятий, описывающих процесс ППР на основе ЧМКИ, и определяет взаимосвязи между ними, а также раскрывает суть основных процессов, важных с точки зрения функционирования информационной среды, построенной на базе предложенной модели.

### Основные понятия концептуальной модели



■ **Рис. 1.** Концептуальная модель поддержки принятия решений на основе ЧМКИ

■ **Fig. 1.** Conceptual model of the decision-making based on human-machine collective intelligence

*Среда* — среда, поддерживающая ЧМКИ и предлагающая реализацию основных механизмов, которые являются критическими для существования коллективного интеллекта (способности коллектива решать задачи): семантической интероперабельности и координации. Таким образом, среда дает возможность коллективному интеллекту реализоваться. В частности, поскольку основной целью в рамках проекта является СППР, то эта среда предоставляет набор возможностей для организации групп/коллективов, выполняющих задачи по СППР. В первую очередь поддержку создания и изменения модели процесса, исполнение модели процесса (в том числе подбор участников для реализации элементов модели процесса), поддержку соответствия между машиночитаемым и человекочитаемым представлениями информации (формирование струк-

турированных артефактов с результатами работы участников, формализацию задач до уровня, доступного программным агентам).

*Система поддержки принятия решений* — система, созданная в соответствии с концептуальной моделью СППР на основе ЧМКИ. Предполагается, что СППР создается с использованием механизмов, реализованных средой.

*Конечный пользователь/ЛПР* — внешняя по отношению к СППР сущность (например, менеджер среднего/высшего звена какой-либо компании). Считается, что задачей СППР является предоставление ЛПР информации для принятия решения. ЛПР осуществляет первичное целеполагание и *контекст*, формулирует проблему, предлагает исходную версию модели процесса (эскиз модели процесса), возможно, с помощью среды. В дальнейшем он наблюдает за ходом решения

проблемы участниками, может вмешиваться в процесс, предлагая «на лету» коррективы.

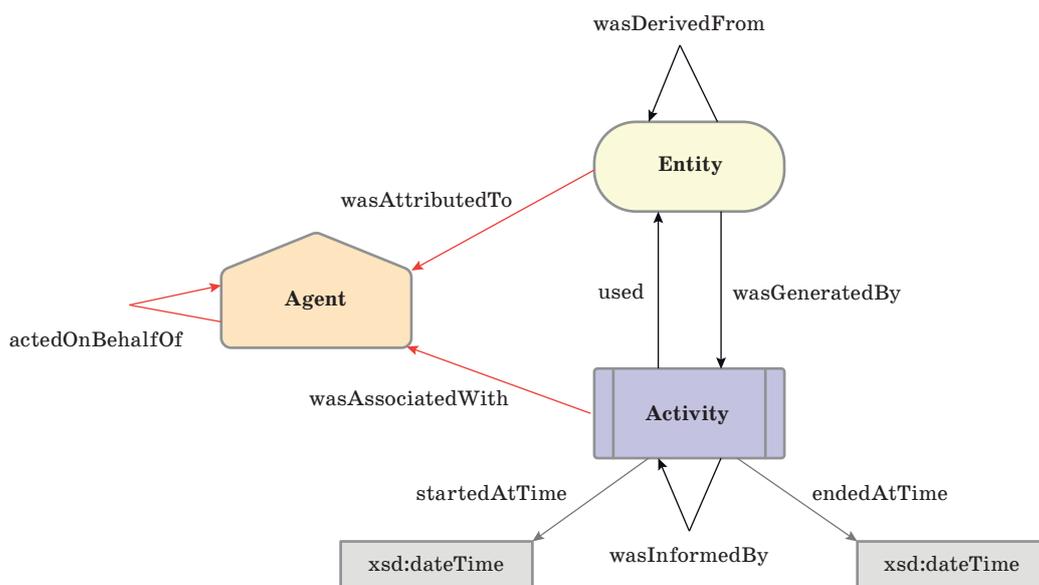
*Проблема* — вопрос, требующий разрешения в форме ответа на него или выполнения действий. Проблема задается конечным пользователем, а помощь (поддержка) в решении проблемы предоставляется СППР. Кроме того, этот же термин используется для обозначения всей совокупности информации (информации по проблеме), порожденной участниками среды при работе над проблемой, полученной от конечного пользователя.

*Модель процесса (поддержки принятия решений)* — модель, описывающая процессы сбора информации, разработки и оценки альтернатив и представляющая собой некоторую инструкцию к действию. Одной из особенностей модели процесса является то, что среда позволяет участникам влиять на нее (соответственно, участники могут предлагать дополнительные шаги, конкретизировать отдельные операции (см. *процесс (ре)организации модели поддержки принятия решений*). Другой особенностью является поддержка нескольких уровней детализации этой модели процесса (так, при функционировании временных организаций хорошо показали себя ролевые модели координации, программным агентам сложно будет уточнять обязанности в рамках роли, поэтому часть процесса может быть описана в виде детализированной модели (конкретных операций с входами и выходами, которым может быть поставлен в соответствие сервис-исполнитель или композиция сервисов)). Модель процесса создается с помощью метамодели. При формировании модели могут использоваться *паттерны* — положительно

зарекомендовавшие себя решения типовых задач координации и самоорганизации. Исходная версия модели процесса (эскиз модели процесса) предлагается конечным пользователем. Она не содержит полную спецификацию всех действий, возможно, содержит только важные действия и (или) роли. Модель процесса уточняется в ходе выполнения (см. *процесс (ре)организации модели процесса*).

*Метамодель процесса (поддержки принятия решений)* — элементы, с помощью которых происходит построение конкретной модели процесса СППР, исполняемой коллективом участников в среде человеко-машинного коллективного интеллекта. Метамодель является многоуровневой и содержит, в частности, понятия *задание, артефакт и роль*.

*Информация по проблеме* — форма представления текущей информации по проблеме с той или иной степенью формализации. Информация по проблеме включает в себя контекст, всю информацию, сообщенную конечным пользователем, и всю информацию, порожденную коллективом при решении проблемы. В ходе функционирования среды одним из процессов является «взаимный» перевод этой информации из машиночитаемого представления в человекочитаемое и обратно. Структура формализованного представления информации по проблеме должна сохранять возможность отслеживать источник и основания получения каждого фрагмента информации. Для формального представления подобных отношений может быть использована онтологическая модель происхождения информации PROV-O [34] (рис. 2).



■ Рис. 2. Ядро онтологической модели PROV-O

■ Fig. 2. The core of the ontological provenance model PROV-O

Ядро онтологической модели происхождения информации (provenance) включает три концепта:

— сущность (*Entity*) — артефакт, документ, происхождение которого должно быть описано;

— деятельность (*Activity*) — процесс, в ходе которого могут порождаться и использоваться сущности;

— агент (*Agent*) — активный участник системы, играющий роль автора артефактов и участника процессов.

Сущности, в соответствии с моделью, могут создаваться в ходе различных деятельностей и использоваться в них (отношения «wasGeneratedBy» и «used» соответственно). Модель также предоставляет возможность описывать тот факт, что сущность является производной по отношению к другой сущности (отношение «wasDerivedFrom»). Для деятельности могут быть определены время начала и завершения («startedAtTime» и «endedAtTime» соответственно), а также факт использования одной деятельностью информации, порождаемой другой деятельностью (отношение «wasInformedBy»). Наконец, модель позволяет отметить факт вовлечения агента (*Agent*) в ту или иную деятельность (отношение «wasAssociatedWith»), участия в создании сущностей (отношение «wasAttributedTo») и действия одного агента от имени другого (отношение «actedOnBehalfOf»).

*Артефакт* — результат работы какого-либо участника; является частью понятия информации по проблеме.

*Участник (агент)* — эксперт либо программный сервис, который может принимать участие в реализации модели процесса (назначаться на роли, выполнять задания и пр.).

*Программный сервис* — агент, являющийся компьютерной программой.

*Эксперт* — агент-человек.

*Коллектив (группа, команда)* — множество участников, реализующих модель процесса поддержки принятия решений в рамках конкретной проблемы.

### Процессы, обеспечиваемые средой

Основными процессами, параллельно осуществляемыми в ходе функционирования среды, являются: 1) процесс (ре)организации поддержки принятия решений и 2) процесс подготовки решения. Кроме того, важную роль играют вспомогательные процессы, в том числе обеспечивающие участие программных сервисов в работе коллектива.

*Процесс (ре)организации поддержки принятия решения.* В рамках этого процесса участники выдвигают различные предложения об организации ППР (используя элементы метамодели и действуя с помощью интеллектуаль-

ных ассистентов, обладающих процессной базой знаний), обсуждают их и корректируют модель. Разработка методов функционирования подобных интеллектуальных ассистентов является одной из важнейших задач, поскольку представляет собой один из базовых способов конвергенции коллективного и искусственного интеллекта.

*Процесс подготовки решения.* Основной (продуктивный) процесс, в ходе которого участники порождают различные артефакты, так или иначе полезные для ЛПП (описание альтернатив, описание критериев и пр.). Артефакты имеют как человекочитаемое представление, так и машиночитаемое. Содержат элементы, кодирующие происхождение информации (с помощью онтологической модели PROV-O).

Вспомогательный процесс обеспечения участия программных сервисов в работе коллектива является двунаправленным, инициатором в нем может стать и эксперт, и программный сервис. Информация по проблеме не всегда представлена в достаточно формализованном виде (подходящем для машинной обработки). Для перевода между машинным представлением и человекочитаемым используются:

1) из машиночитаемого представления в человекочитаемое: а) генерация структурного описания по онтологии (минимальные усилия), б) методы визуализации текущего множества альтернатив и их описаний (относительно небольшие усилия);

2) из человекочитаемого в машиночитаемое — интерактивные методы. Базовыми технологиями являются вычислительная лингвистика (родство ключевых слов и описаний), рассуждения на основе прецедентов и пр. Человек получает несколько вариантов, может выбрать, исправить, дополнить.

Способы участия программных сервисов в системе:

— программные сервисы могут быть простыми, «рассчитываемыми» только на то, что они будут «обнаружены» средствами семантического поиска, предоставляемыми средой, и «назначены» для решения конкретной задачи, уже описанной в терминах понимаемой ими онтологии;

— программные сервисы могут обладать конфигуратором, который должен быть настроен человеком. Такой сервис требует, чтобы какой-то эксперт «пошел ему навстречу» и обеспечил конфигурацию для решения задачи (в частности, он может запрашивать ресурсы человека-конфигуратора). Например, агент-предиктор может «видеть» задачу предсказания чего-нибудь и создать запрос на то, чтобы другие участники закодировали для него параметры, на основе которых предсказание будет осуществляться, подготовили данные или совершили другие подготовитель-

ные операции (сформировали задачу для человека, что является напрямую одним из способов использования коллективного интеллекта для ИИ);

— программный сервис может обладать диалоговым конфигуратором. По сути, то же, что и предыдущий вариант, только алгоритм конфигурации заключается в ответе на вопросы. Например, такой диалоговый агент может задавать уточняющие вопросы, вопросы с выбором и прочие через среду взаимодействия, чтобы точно специфицировать задачу. В любом случае агент умеет сам себя конфигурировать, вопрос лишь в методах, которые для этого используются.

### Базовый сценарий функционирования среды поддержки принятия решений на основе ЧМКИ

Лицо, принимающее решение (конечный пользователь), описывает проблемную ситуацию на естественном языке, рассчитывая получить набор альтернатив (возможно, ускользнувших от его внимания), а также анализ этих альтернатив по важным для себя критериям. Обращение ЛПР к СППР включает описание проблемной ситуации, эскиз модели процесса, временное ограничение. Описание проблемной ситуации, в свою очередь, включает текстовое описание ситуации, известные ЛПР альтернативы (или механизм их получения), важные для ЛПР критерии, ограничения. Эскиз модели процесса содержит основ-

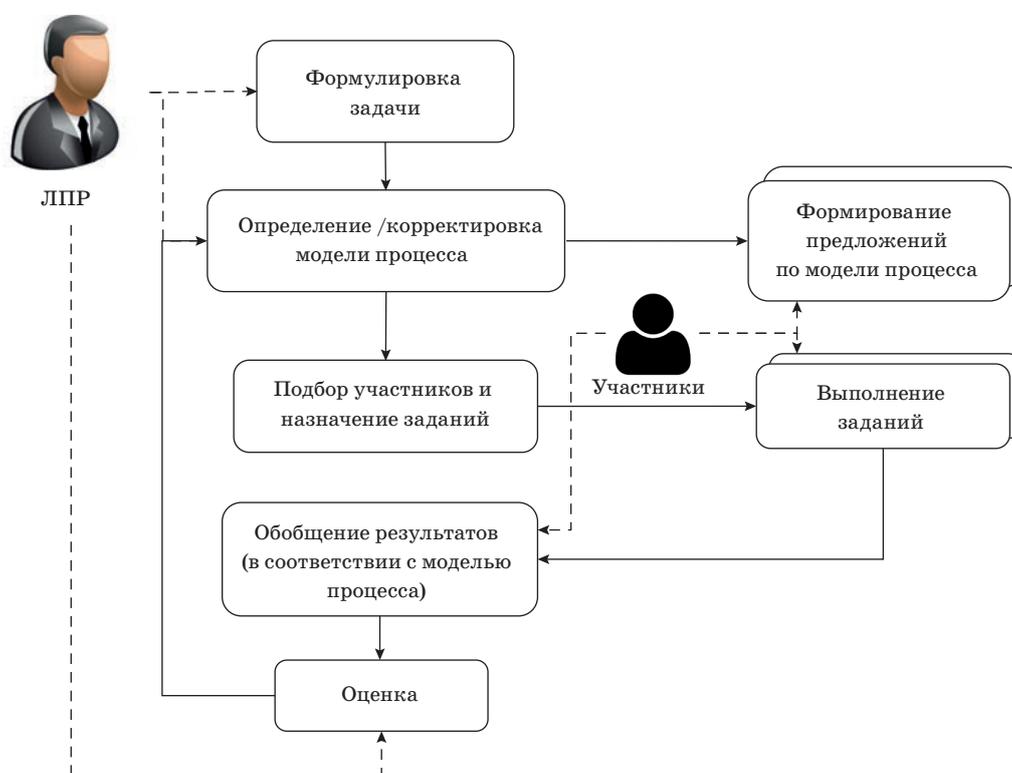
ные элементы модели процесса (не обязательно полную ее спецификацию).

Описание проблемной ситуации становится доступно участникам среды, после чего происходит подбор участников на роли/задачи, определенные в действующем варианте модели процесса (с учетом истории совместной работы). Подбор может осуществляться в «строгой» форме (когда ЛПР все равно) или в «мягкой» (среда формирует рекомендации для ЛПР, а окончательное решение о назначении участников принимает уже ЛПР).

При таком первоначальном назначении, скорее всего, основными исполнителями будут люди, поскольку постановка задачи вряд ли будет настолько подробной, чтобы какие-то из программных агентов могли ей соответствовать.

Участники осуществляют деятельность двух видов: (ре)организацию модели поддержки принятия решения и подготовку решений.

Схематически базовый сценарий функционирования среды изображен на рис. 3, где блоки соответствуют основным действиям (совершаемым средой или ее пользователями различных категорий), сплошные стрелки — потокам информации, а пунктирные стрелки отображают факт ответственности пользователей той или иной категории за выполнение соответствующего вида деятельности. Основные процессы, обеспечиваемые средой, имеют циклическую структуру, которая позволя-



■ Рис. 3. Базовый сценарий функционирования среды  
 ■ Fig. 3. Basic scenario implemented by the environment

ет адаптировать процесс ППР к изменениям текущей ситуации или требованиям ЛПР. Так, первый цикл (соответствующий процессу (ре)организации решения) состоит из действий «Определение/корректировка модели процесса»-«Формирование предложений по модели процесса»-«Обобщение результатов»-«Оценка». В ходе этого процесса происходит формирование предложений и уточнение самой модели процесса. Следует отметить, что действие «Обобщение результатов» включает в себя разработку (согласование) и выполненных заданий, и предложений по изменению модели процесса. Второй цикл, исполняемый независимо от первого и соответствующий процессу подготовки решения, включает действия «Определение/корректировка модели процесса»-«Подбор участников»-«Выполнение заданий»-«Обобщение результатов»-«Оценка».

### Заключение

В работе предложена концептуальная модель поддержки принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта.

### Литература

1. Chikersal P., Tomprou M., Kim Y. J., Woolley A. W., Dabbish L. Deep structures of collaboration. *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing*, 2017, pp. 873–888. doi:10.1145/2998181.2998250
2. Assis Neto F. R., Santos C. A. S. Understanding crowdsourcing projects: A systematic review of tendencies, workflow, and quality management. *Information Processing and Management*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 490–506. doi:10.1016/j.ipm.2018.03.006
3. Ramírez-Montoya M. S., García-Peñalvo F.-J. Co-creation and open innovation: Systematic literature review. *Comunicar*, 2018, vol. 26, no. 54, pp. 9–18. doi:10.3916/C54-2018-01
4. Hajibayova L., Latham K. F. Exploring museum crowdsourcing projects through Bourdieu's lens. *Knowledge Organization*, 2017, vol. 44, no. 7, pp. 506–514. doi:10.5771/0943-7444-2017-7-506
5. Schall D. *Service-Oriented Crowdsourcing: Architecture, Protocols and Algorithms*. New York, Springer, 2012. doi:10.1007/978-1-4614-5956-9
6. Schall D. *Service oriented protocols for human computation*. Handbook of Human Computation. New York, Springer, 2013. Pp. 551–560. doi:10.1007/978-1-4614-8806-4\_74
7. Wright B. *From artificial intelligence to augmented intelligence*. <https://www.idgconnect.com/opinion/1502870/artificial-intelligence-augmented-intelligence> (дата обращения: 27.01.2020).

Центральными понятиями разработанной концептуальной модели являются:

- проблема, на решение которой направлена деятельность человеко-машинного коллектива;
- коллектив машин и людей, взаимодействующих посредством среды в целях решения проблемы;
- модель процесса, описывающая процесс поддержки принятия решений в части сбора информации, разработки и оценки альтернатив. Для разработанной модели предложен базовый сценарий функционирования системы/среды поддержки принятия решений на основе человеко-машинного коллективного интеллекта.

Предполагается, что использование разработанной модели позволит создавать системы поддержки принятия решений нового класса, опираясь на потенциал самоорганизации человеко-машинных коллективов.

### Финансовая поддержка

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 19-11-00126).

8. Retelny D., Bernstein M. S., Valentine M. A. No workflow can ever be enough: How crowdsourcing workflows constrain complex work. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 2017, vol. 1, no. 2, article 89. doi:10.1145/3134724
9. Kaltenecker S., Hundermark P. *What are self-organizing teams*. <https://www.infoq.com/articles/what-are-self-organising-teams/> (дата обращения: 27.01.2020).
10. Lichtenberger A. *Self-organized teams: where great things start*. <https://blog.itil.org/2015/01/self-organized-teams-where-great-things-start/> (дата обращения: 27.01.2020).
11. Drucker P. *Management Challenges for the 21st Century*. Routledge, 2012. doi:10.4324/9780080942384
12. Macy M. W., Willer R. From factors to actors: Computational sociology and agent-based modeling. *Annual Review of Sociology*, 2002, vol. 28, no. 1, pp. 143–166. doi:10.1146/annurev.soc.28.110601.141117
13. Perc M., Gómez-Gardeñes J., Szolnoki A., Floría L. M., Moreno Y. Evolutionary dynamics of group interactions on structured populations: a review. *Journal of the Royal Society Interface*, 2013, vol. 10, no. 80, pp. 20120997. doi:10.1098/rsif.2012.0997
14. Santos F. C., Pacheco J. M., Lenaerts T. Cooperation prevails when individuals adjust their social ties. *PLoS Computational Biology*, 2006, vol. 2, no. 10, pp. e140. doi:10.1371/journal.pcbi.0020140
15. Malone T. W., Crowston K. The Interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 1994, vol. 26, no. 1, pp. 87–119. doi:10.1145/174666.174668

16. Городецкий В. И. Самоорганизация и многоагентные системы. I. Модели многоагентной самоорганизации. *Известия РАН. Теория и системы управления*, 2012, no. 2, pp. 92–120.
17. Lhaksmana K. M., Murakami Y., Ishida T. Role-based modeling for designing agent behavior in self-organizing multi-agent systems. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 2018, vol. 28, no. 1, pp. 79–96. doi:10.1142/S0218194018500043
18. Dignum F. *Interactions as social practices: towards a formalization*. <https://arxiv.org/abs/1809.08751> (дата обращения: 27.01.2020).
19. Карпов В. Э., Карпова И. П., Кулинич А. А. *Социальные сообщества роботов*. М., ЛЕНАНД, 2019. 352 с.
20. Cranefield S., Dignum F. Incorporating social practices in BDI agent systems. *Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2019, pp. 1901–1903.
21. Fuchs C. *Concepts of Social Self-Organisation Research Paper Intas Project 'Human Strategies in Complexity'*. <http://www.self-organization.org/results/papers/pdf/hsicpaper4.pdf> (дата обращения: 27.01.2020).
22. Gilbert N., Anzola D., Johnson P., Elsenbroich C., Balke T., Dilaver Kalkan O. *Self-organizing dynamical systems*. International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier, 2015. Pp. 529–534.
23. Smith C., Comer D. Self-organization in small groups: A study of group effectiveness within non-equilibrium conditions. *Human Relations*, 1994, vol. 47, no. 5, pp. 553–581. doi:10.1177/001872679404700505
24. Plowman D. A., Solansky S., Beck T. E., Baker L., Kulkarni M., Travis D. V. The role of leadership in emergent, self-organization. *The Leadership Quarterly*, 2007, vol. 18, no. 4, pp. 341–356. doi:10.1016/j.leaqua.2007.04.004
25. Reinicke B. Creating a framework for research on virtual organizations. *Journal of Information Systems Applied Research*, 2011, vol. 4, iss. 1, pp. 49–56.
26. Valentine M. A., Retelny D., To A., Rahmati N., Doshi T., Bernstein M. S. Flash organizations. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2017, pp. 3523–3537. doi:10.1145/3025453.3025811
27. Kulkarni A., Can M., Hartmann B. Collaboratively crowdsourcing workflows with turkomatic. *Proceedings of the ACM 2012 Conference on Computer Supported Cooperative Work*, 2012, pp. 1003–1012. doi:10.1145/2145204.2145354
28. Scekcic O., Schiavinotto T., Videnov S., Rovatsos M., Truong H.-L., Miorandi D., Dustdar S. A programming model for hybrid collaborative adaptive systems. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2017, vol. 6750. doi:10.1109/tetc.2017.2702578
29. Retelny D., Robaszkiewicz S., To A., Lasecki W. S., Patel J., Rahmati N., Doshi T., Valentine M., Bernstein M. S. Expert crowdsourcing with flash teams. *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2014, pp. 75–85. doi:10.1145/2642918.2647409
30. *Mastering Data-Intensive Collaboration and Decision Making*/Ed. N. Karacapilidis. Springer, 2014. 226 p. doi:10.1007/978-3-319-02612-1
31. Karacapilidis N., Tampakas V. On the exploitation of collaborative argumentation structures for inducing reasoning behavior. *Proceedings of the 18th International Conference on IEEE/Internet*, 2019, pp. 78–84. doi:10.33965/icwi2019\_201913L010
32. Salehi N., McCabe A., Valentine M., Bernstein M. S. Huddler: Convening stable and familiar crowd teams despite unpredictable availability. *Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, 2017, pp. 1700–1713. doi:10.1145/2998181.2998300
33. Lengler R., Eppler M. J. Towards a periodic table of visualization methods of management. *Graphics and Visualization in Engineering*, 2007, ACTA Press, Anaheim, pp. 83–88.
34. *The PROV Ontology*. <https://www.w3.org/TR/prov-o/> (дата обращения: 27.01.2020).

UDC 004.891:004.822:007.51

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-60-70

**Decision support based on human-machine collective intelligence: state-of-the-art and conceptual model**A. V. Smirnov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Tech., Professor, orcid.org/0000-0001-8364-073X, smir@iias.spb.suT. V. Levashova<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-1962-7044A. V. Ponomarev<sup>a</sup>, PhD, Tech., Senior Researcher, orcid.org/0000-0002-9380-5064<sup>a</sup>Saint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

**Introduction:** Due to the development of information and communication technologies and artificial intelligence, human-machine computing systems are becoming more widely used. However, in the vast majority of developments in this area, a human, in fact, plays the role of a “computing device”, who can only handle requests of a certain kind. Thus, human creativity and the ability to (self-)organize are largely discarded. **Purpose:** Developing a decision support concept based on the use of human-machine collective intelligence. Analyzing the current state of the problem in the field of constructing flexible human-machine systems. Proposing a conceptual model of the environment based on which decision support systems can be created. **Results:** A conceptual model of decision support is proposed

based on human-machine collective intelligence. Its central concepts are: a) the problem at whose solution the human-machine collective activity is aimed, b) the collective of machines and people interacting through the environment to solve the problem, c) the process model which describes the decision support process in terms of information collection development and evaluation of alternatives. **Practical relevance:** The developed model can be a base to create a new class of decision support systems leveraging the self-organization potential of human-machine collectives.

**Keywords** — decision support, human-computer collective intelligence, methodology, conceptual model.

**For citation:** Smirnov A. V., Levashova T. V., Ponomarev A. V. Decision support based on human-machine collective intelligence: state-of-the-art and conceptual model. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 60–70 (In Russian). doi:10.31799/1684-8853-2020-2-60-70

## References

- Chikersal P., Tomprou M., Kim Y. J., Woolley A. W., Dabbish L. Deep structures of collaboration. *Proceedings of the 2017 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing*, 2017, pp. 873–888. doi:10.1145/2998181.2998250
- Assis Neto F. R., Santos C. A. S. Understanding crowdsourcing projects: A systematic review of tendencies, workflow, and quality management. *Information Processing and Management*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 490–506. doi:10.1016/j.ipm.2018.03.006
- Ramírez-Montoya M. S., García-Peñalvo F.-J. Co-creation and open innovation: Systematic literature review. *Comunicar*, 2018, vol. 26, no. 54, pp. 9–18. doi:10.3916/C54-2018-01
- Hajibayova L., Latham K. F. Exploring museum crowdsourcing projects through Bourdieu's lens. *Knowledge Organization*, 2017, vol. 44, no. 7, pp. 506–514. doi:10.5771/0943-7444-2017-7-506
- Schall D. *Service-Oriented Crowdsourcing: Architecture, Protocols and Algorithms*. New York, Springer, 2012. doi:10.1007/978-1-4614-5956-9
- Schall D. *Service oriented protocols for human computation*. In: *Handbook of Human Computation*. New York, Springer, 2013. Pp. 551–560. doi:10.1007/978-1-4614-8806-4\_74
- Wright B. *From artificial intelligence to augmented intelligence*. Available at: <https://www.idgconnect.com/opinion/1502870/artificial-intelligence-augmented-intelligence> (accessed 27 January 2020).
- Retelny D., Bernstein M. S., Valentine M. A. No workflow can ever be enough: How crowdsourcing workflows constrain complex work. *Proceedings of the ACM on Human-Computer Interaction*, 2017, vol. 1, no. 2, article 89. doi:10.1145/3134724
- Kaltenecker S., Hundermark P. *What are self-organizing teams*. Available at: <https://www.infoq.com/articles/what-are-self-organising-teams/> (accessed 27 January 2020).
- Lichtenberger A. *Self-organized teams: where great things start*. Available at: <https://blog.itil.org/2015/01/self-organized-teams-where-great-things-start/> (accessed 27 January 2020).
- Drucker P. *Management Challenges for the 21st Century*. Routledge, 2012. doi:10.4324/9780080942384
- Macy M. W., Willer R. From factors to actors: Computational sociology and agent-based modeling. *Annual Review of Sociology*, 2002, vol. 28, no. 1, pp. 143–166. doi:10.1146/annurev.soc.28.110601.141117
- Perc M., Gómez-Gardeñes J., Szolnoki A., Floría L. M., Moreno Y. Evolutionary dynamics of group interactions on structured populations: a review. *Journal of the Royal Society Interface*, 2013, vol. 10, no. 80, pp. 20120997. doi:10.1098/rsif.2012.0997
- Santos F. C., Pacheco J. M., Lenaerts T. Cooperation prevails when individuals adjust their social ties. *PLoS Computational Biology*, 2006, vol. 2, no. 10, pp. e140. doi:10.1371/journal.pcbi.0020140
- Malone T. W., Crowston K. The Interdisciplinary study of coordination. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 1994, vol. 26, no. 1, pp. 87–119. doi:10.1145/1746666.1746668
- Gorodetskii V. I. Self-organization and multiagent systems. I: Models of multiagent self-organization. *Journal of Computer and Systems Sciences International*, 2012, vol. 51, no. 2, pp. 256–281 (In Russian).
- Lhaksmana K. M., Murakami Y., Ishida T. Role-based modeling for designing agent behavior in self-organizing multi-agent systems. *International Journal of Software Engineering and Knowledge Engineering*, 2018, vol. 28, no. 1, pp. 79–96. doi:10.1142/S0218194018500043
- Dignum F. *Interactions as social practices: Towards a formalization*. Available at: <https://arxiv.org/abs/1809.08751> (accessed 27 January 2020).
- Karpov V. E., Karpova I. P., Kulnich A. A. *Social'nye soobshchestva robotov* [Social communities of robots]. Moscow, LENAND Publ., 2019. 352 p. (In Russian).
- Cranefield S., Dignum F. Incorporating social practices in BDI agent systems. *Proceedings of the 18th International Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 2019, pp. 1901–1903.
- Fuchs C. *Concepts of Social Self-Organisation Research Paper Intas Project 'Human Strategies in Complexity'*. Available at: <http://www.self-organization.org/results/papers/pdf/hscpaper4.pdf> (accessed 27 January 2020).
- Gilbert N., Anzola D., Johnson P., Elsenbroich C., Balke T., Dilaver Kalkan O. *Self-organizing dynamical systems*. In: *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*. 2<sup>nd</sup> ed. Elsevier, 2015. Pp. 529–534.
- Smith C., Comer D. Self-organization in small groups: A study of group effectiveness within non-equilibrium conditions. *Human Relations*, 1994, vol. 47, no. 5, pp. 553–581. doi:10.1177/001872679404700505
- Plowman D. A., Solansky S., Beck T. E., Baker L., Kulkarni M., Travis D. V. The role of leadership in emergent, self-organization. *The Leadership Quarterly*, 2007, vol. 18, no. 4, pp. 341–356. doi:10.1016/j.leaqua.2007.04.004
- Reinicke B. Creating a framework for research on virtual organizations. *Journal of Information Systems Applied Research*, 2011, vol. 4, iss. 1, pp. 49–56.
- Valentine M. A., Retelny D., To A., Rahmati N., Doshi T., Bernstein M. S. Flash organizations. *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2017, pp. 3523–3537. doi:10.1145/3025453.3025811
- Kulkarni A., Can M., Hartmann B. Collaboratively crowdsourcing workflows with turkomatic. *Proceedings of the ACM 2012 Conference on Computer Supported Cooperative Work*, 2012, pp. 1003–1012. doi:10.1145/2145204.2145354
- Scekic O., Schiavinotto T., Videnov S., Rovatsos M., Truong H.-L., Miorandi D., Dustdar S. A programming model for hybrid collaborative adaptive systems. *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, 2017, vol. 6750. doi:10.1109/tetc.2017.2702578
- Retelny D., Robaszkievicz S., To A., Lasecki W. S., Patel J., Rahmati N., Doshi T., Valentine M., Bernstein M. S. Expert crowdsourcing with flash teams. *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2014, pp. 75–85. doi:10.1145/2642918.2647409
- Mastering Data-Intensive Collaboration and Decision Making*. Karacapilidis N. (Ed.) Springer, 2014. 226 p. doi:10.1007/978-3-319-02612-1
- Karacapilidis N., Tampakas V. On the exploitation of collaborative argumentation structures for inducing reasoning behavior. *Proceedings of the 18th International Conference on IEEE/Internet*, 2019, pp. 78–84. doi:10.33965/icwi2019\_201913L010
- Salehi N., McCabe A., Valentine M., Bernstein M. S. Huddler: Convening stable and familiar crowd teams despite unpredictable availability. *Proceedings of the ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work*, 2017, pp. 1700–1713. doi:10.1145/2998181.2998300
- Lengler R., Eppler M. J. Towards a periodic table of visualization methods of management. *Graphics and Visualization in Engineering*, 2007, ACTA Press, Anaheim, pp. 83–88.
- The PROV Ontology*. Available at: <https://www.w3.org/TR/prov-o/> (accessed 27 January 2020).

UDC 517.977

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-71-77

## Utility function in the foraging problem with imperfect information

A. N. Kirillov<sup>a</sup>, Dr. Sc., Phys.-Math., Leading Researcher, [orcid.org/0000-0002-3356-1846](https://orcid.org/0000-0002-3356-1846), [krllv1812@yandex.ru](mailto:krllv1812@yandex.ru)

I. V. Danilova<sup>a</sup>, Post-Graduate Student, [orcid.org/0000-0001-7031-4580](https://orcid.org/0000-0001-7031-4580)

<sup>a</sup>Karelian Research Centre of RAS, 11, Pushkinskaya St., 185910, Petrozavodsk, Russian Federation

**Introduction:** One of the foraging theory problems is choosing the most suitable patch as a source of energy (food) resources for the population. A promising approach to study this problem is based on the Boltzmann distribution. In statistical physics, the Boltzmann distribution describes the probability of a system falling into a particular energy state. **Purpose:** The development of this approach in order to solve the patch selection problem. The solution based on the utility functions should be used to construct the probability distribution. **Methods:** Construction and analysis of the patch utility function which takes into account the time and population movement. Based on utility functions, domains are built which characterize the probability of choosing a patch. Boltzmann distribution is used to specify the patch selection probabilities. **Results:** A utility function depending on time is proposed and analyzed. A measure of the population's awareness of the patch suitability is proposed, which depends on the distance to the patch at a given time. The utility function properties have been investigated. The influence of its information component on the patch selection process is analyzed. The patches are classified as "bad" or "good" according to the amount of food resources they contain. The study showed that a population may choose a bad patch on a certain time interval. Preferential utility domains are constructed and their kinematics is analyzed. **Particular relevance:** The results obtained allow you to forecast the behavior of a population choosing a suitable patch.

**Keywords** – utility function, preferential utility domain, measure of awareness.

For citation: Kirillov A. N., Danilova I. V. Utility function in the foraging problem with imperfect information. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 71–77. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-71-77

### Introduction

The problem of selection of the patch by the population, that is most suitable for consumption of the resources contained in it, is studied in the theory of optimal foraging. It is assumed that the population, in search of a suitable patch, acts in such a way as to maximize the amount of consumed energy [1–5].

V. Krivan developed the concept of ideal free distribution [6, 7] to solve the problem of optimal selection of suitable patch. According to the ideal free distribution the population has perfect information about the quality of patches and it is distributed between patches so as to maximize an energy consumption rate. He showed that the ideal free distribution in the problem of selection of the patch by the population is evolutionarily stable [6]. Empirical observations show that the ideal free distribution model is not adequate to the real processes for selection of the patch, because poor patches also attract individuals of the population. In addition, the population does not have perfect information on the quality of patches. Influence of migration on the stability behavior of a single-species population is studied in [8].

A game-theoretic approach to the solution of the problem of optimal selection of a suitable patch by the population was proposed in [9]. The Nash equilibrium is used as a criterion of optimality.

The concept of information, applicable to the theory of optimal foraging, has been widely used in

neurobiology. The decision-making by the population on the selection of a strategy during a search for food with taking into account the accumulation and loss of data over time was studied in [10–13]. In [5, 14, 15] it was shown that food search strategies and the transition between them is explained by an increase in awareness. In [16], an elementary heuristic, which underlies the behavior of a population during a search, is considered; it is shown on the basis of experimental data that a search must be considered as an unsteady process that transfers an organism from one information state to another. A model of data accumulation for a population, that makes a decision to leave the patch, is analyzed in [17, 18]. This analysis is based on the marginal value theorem [19]. In [20, 21], the issue of selection of the patch is considered with taking into account the density of the population that selected this patch. In [22], a negative and positive relationship between the energy capacity of the patch and the frequency of visits by population is analyzed.

U. Dieckmann [23] proposed the following approach to solve the problem of selection of the patch. This approach is based on the utility function that takes into account the cost of moving to patch and the measure of awareness of its quality. In addition, the population is situated in one of the patches and evaluates the usefulness of other patches.

On the basis of [23], a utility function which takes into account population movements between

patches, i. e., a change in its position depending on time, was proposed in [24]. The notion of preferential utility domain (PUD) of a patch was proposed in [24]. If the population locates in some PUD, it selects the patch, that also locates in this domain, with more probability than any patch located in other domain.

This work develops investigations presented in [24]. A measure of the population's awareness of the suitability of patch is proposed. It depends on the varying distance to patch and on the current time as well. The properties of the utility function are investigated and the PUDs are constructed. That takes into account the current time and average awareness of the quality of patches. The PUD partition of the environment, in which the population moves, depends on time, that makes it possible for the worst patch to be included in the PUD of the best patch at some time, evaluated in this paper.

The utility function, that is proposed in this paper, is used to determine the probability of selection of the patch by a population at any time. The Boltzmann distribution [23] is used as the probability of selection of patch. In statistical physics, the Boltzmann distribution usually describes of the probabilities of system energy states.

### The utility function and its properties

The following problem is considered in [23]. A population is located in the patch  $i$ , containing some energy resource, and can move to patch  $j \neq i$ . The probability of moving from  $i$  to  $j$  is determined by

the Boltzmann distribution:  $P_{ij} = \frac{e^{qU_{ij}}}{\sum_{j=1}^m e^{qU_{ij}}}$ , where  $m$

is the number of patches;  $U_{ij}$  is the utility of patch  $j$  for a population, located in patch  $i$ :

$$U_{ij} = V_j I_{ij} + (1 - I_{ij}) \bar{V} - T_{ij}, \quad i, j = 1, \dots, m, \quad (1)$$

where  $I_{ij}$  is a measure of the awareness of a population, locating in the patch  $i$ , about the patch  $j$ . Let  $I_{ij} \in [0, 1]$ , where  $I_{ii} = 1$ , i. e. the population has complete information about the patch in which it is located;  $V_j$  is the amount of food resources in the patch  $j$ ;  $\bar{V} = \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2 + \dots + \gamma_m V_m$  is the average utility of the patches for a population located in patch  $i$ ,  $\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_m = 1$ ,  $\gamma_i \geq 0$ ;  $T_{ij}$  is a function of the cost of moving from  $i$  to  $j$ .

Unlike [23], where the population is static, in the present paper, the population moves in the space between patches. In addition, the movement is not determined, because according to ecological investigations, it is almost impossible to propose a motion model even for a certain species. We introduce the

utility function  $U_i(d_i, t)$  of the patch  $i$  at time  $t$  for population, located at a distance  $d_i$  from the patch  $i$ :

$$U_i(d_i, t) = V_i I_i(d_i, t) + (1 - I_i(d_i, t)) \bar{V} - T_i(d_i), \quad i = 1, \dots, m, \quad (2)$$

where  $I_i(d_i, t)$  is a population measure of the awareness of the patch  $i$ ,  $I_i(d_i, t) \in [0, 1]$ ,  $\bar{V} = \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2 + \dots + \gamma_m V_m$  is the average utility of the patches for a population,  $\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_m = 1$ , where  $\gamma_i = \text{const}$ ,  $\gamma_i \geq 0$ ;  $T_i(d_i)$  is a function of the cost of moving to  $i$ , we will assume that:  $\frac{\partial T_i}{\partial d_i} \geq 0$ .

From (2), it follows that the structure of the utility function  $U_i$  substantially depends on the information component that is represented by the first two terms. We assume that the measure of awareness  $I_i(d_i, t)$  has the following properties. The population has complete information on the patch in which it is located:  $I_i(0, t) = 1$ , for any  $t \in \mathbb{R}$ .

The farther the population is located from a patch  $i$ , the less information on the value  $V_i$  it has,

i. e.  $\frac{\partial I_i}{\partial d_i} < 0$ ,  $\lim_{d_i \rightarrow \infty} I_i(d_i, t) = 0$ . If  $d_i \neq 0$ , then as time  $t$

increases, the population's awareness of the patch  $i$

increases:  $\frac{\partial I_i}{\partial t} > 0$ ,  $\lim_{t \rightarrow \infty} I_i(d_i, t) = 1$ .

Basing on the foregoing, we formulate the properties of the utility function  $U_i$ . We assume that the patch  $i$  is "good" if  $V_i > \bar{V}$ , and it is "bad" if  $V_i < \bar{V}$ .

1. *With the time increase, the usefulness of the "bad" patch decreases, and the usefulness of the "good" patch increases.* Indeed, taking into account

(2), we have:  $\frac{\partial U_i}{\partial t} = \frac{\partial I_i}{\partial t} (V_i - \bar{V})$ . Since  $\frac{\partial I_i}{\partial t} > 0$ , then

$\frac{\partial U_i}{\partial t} > 0$  for  $V_i > \bar{V}$ , and  $\frac{\partial U_i}{\partial t} < 0$  for  $V_i < \bar{V}$ . Thus,

the longer the time of study of the "bad" patch by population, the less the attractivity of it for population, and vice versa.

2. *If  $V_i > \bar{V}$ , then its utility of the  $i$ -th patch decreases with the increasing of  $d_i$ .*

Then:  $\frac{\partial U_i}{\partial d_i} = \frac{\partial I_i}{\partial d_i} (V_i - \bar{V}) - \frac{\partial T_i}{\partial d_i} < 0$ , that follows

from the properties  $I_i$  and  $T_i$ .

Let us consider in more detail the structure of the utility function  $U_i$ . Value  $W_i = V_i I_i + (1 - I_i) \bar{V}$  is the information component of the utility function  $U_i$ . Thus, the measure of awareness  $I_i$ ,  $W_i$  do not influence the property 2, since

$\frac{\partial W_i}{\partial d_i} < 0$  for any value  $I_i$ .

3. *If  $V_i < \bar{V}$ , then its utility of the  $i$ -th patch may decrease or increase while  $d_i$  increases.* Since, the

sign of the derivative  $\frac{\partial U_i}{\partial d_i}$  coincides with the sign

of the difference  $\frac{\partial I_i}{\partial d_i}(V - \bar{V}) - \frac{\partial T_i}{\partial d_i}$  which depends on  $t$ , then the information component  $W_i$  considerably influences the sign of the derivative  $\frac{\partial U_i}{\partial d_i}$ .

Thus, in the case of a “bad” patch, i. e. for a small value  $V_i$ ,  $V_i < \bar{V}$ , information component  $W_i$  plays a more significant role in the process of the patch selection, basing of the utility function  $U_i(d_i, t)$ , than in the case of a “good” patch  $V_i$ . In other words, a “good” patch is more noticeable than a “bad” at long distances.

**Example.** Assume  $I_i = e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}}$ ,  $T_i(d_i) = \alpha d_i^2$ , where  $\alpha, \beta, C$  are the positive constants. Here  $\beta$  is the coefficient of forgetting. It was shown in [24] that with increasing of  $\beta$  the population measure of awareness,  $I_i$ , decreases. Thus, the larger the value of  $\beta$ , the faster the population forgets information on the patch;  $C$  is the constant that determines the measure of awareness of the patch the initial time instant  $t = 0$ ;  $\alpha$  is the coefficient of cost,  $\bar{V} = \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2 + \dots + \gamma_m V_m$ ,  $\gamma_i \geq 0$ ,  $\gamma_1 + \gamma_2 + \dots + \gamma_m = 1$ . Then, the utility function has the following form:

$$U_i(d_i, t) = V_i e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}} + \left(1 - e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}}\right) \bar{V} - \alpha d_i^2. \quad (3)$$

Since  $\frac{\partial U_i}{\partial t} = \frac{\beta d_i^2}{(t+C)^2} e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}} (V_i - \bar{V})$ , then, obviously, the property 1 is satisfied. It is easy to show that  $\frac{\partial U_i}{\partial d_i} = 2d_i(\bar{V} - V_i) \frac{\beta}{t+C} e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}} - 2d_i\alpha$ , whence it follows that the property 2 is also satisfied. In the case of a “bad” patch,  $V_i < \bar{V}$ , it follows from the form of derivative  $\frac{\partial U_i}{\partial d_i}$ , that its sign substantially depends on the measure of awareness  $I_i = e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}}$  and its derivative  $\frac{\partial I_i}{\partial d_i}$ .

### Two-dimensional case

Consider the case  $m = 2$ . For convenience, denote the first and second patches by  $A_1$  and  $A_2$ , respectively. Utility functions for two patches are:

$$U_i(d_i, t) = V_i e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}} + (1 - e^{-\frac{\beta d_i^2}{t+C}}) \bar{V} - \alpha d_i^2, \quad i = 1, 2, \text{ where } \bar{V} = \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2. \text{ Let } V_1 < V_2, \text{ i. e. the second patch is more attractive than the first.}$$

Consider, in more detail, the case of a “bad” patch, for  $m = 2$ . Let the patch  $i = 1$  be “bad”, i. e.  $V_1 < V_2$ ,  $V_1 < \bar{V} = \gamma_1 V_1 + \gamma_2 V_2$ . Taking into account the form of the function  $U_i(d_i, t)$  (3), it is easy to show that the following statement is valid.

**Proposition 1.** Assume  $d_1^2 > \gamma_2(V_2 - V_1)/\alpha e$ . Then  $\frac{\partial U_1}{\partial d_1} < 0$  for any  $t \geq 0$ .

**Proposition 2.** Assume  $d_1^2 < \gamma_2(V_2 - V_1)/\alpha e$ . Then there exist  $\tilde{t}_1, \tilde{t}_2, \tilde{t}_1 < \tilde{t}_2$ , such that  $\frac{\partial U_1(d_1, t)}{\partial d_1} < 0$

for  $t \in [0, \tilde{t}_1) \cup (\tilde{t}_2, +\infty)$ ,  $\frac{\partial U_1(d_1, t)}{\partial d_1} > 0$  for  $t \in [\tilde{t}_1, \tilde{t}_2]$ .

*Proof.* Two cases are possible:  $e^{-\frac{\beta d_1^2}{t+C}} < \frac{\alpha(t+C)}{\beta \gamma_2(V_2 - V_1)}$

or  $e^{-\frac{\beta d_1^2}{t+C}} > \frac{\alpha(t+C)}{\beta \gamma_2(V_2 - V_1)}$ , or, equivalently,

$$\frac{\beta}{t+C} e^{-\frac{\beta d_1^2}{t+C}} < \frac{\alpha}{\gamma_2(V_2 - V_1)} \text{ or } \frac{\beta}{t+C} e^{-\frac{\beta d_1^2}{t+C}} \geq \frac{\alpha}{\gamma_2(V_2 - V_1)}.$$

Denote  $z = \frac{\beta}{t+C}$ ,  $A = \frac{\gamma_2(V_2 - V_1)}{\alpha}$ ,  $f(z) = z e^{-z d_1^2}$ . It's

obvious that  $z^* = \frac{1}{d_1^2}$  is a point of maximum of  $f(z)$

and  $f(z^*) = \frac{1}{e d_1^2}$  is the maximum value of  $f(z)$ . It

follows from the assumption of the Proposition 2 that  $\frac{1}{e d_1^2} > \frac{1}{A}$ . Then  $e^{-z d_1^2} < \frac{1}{Az}$  for  $z < \tilde{z}_1$  or  $z > \tilde{z}_2$ ,

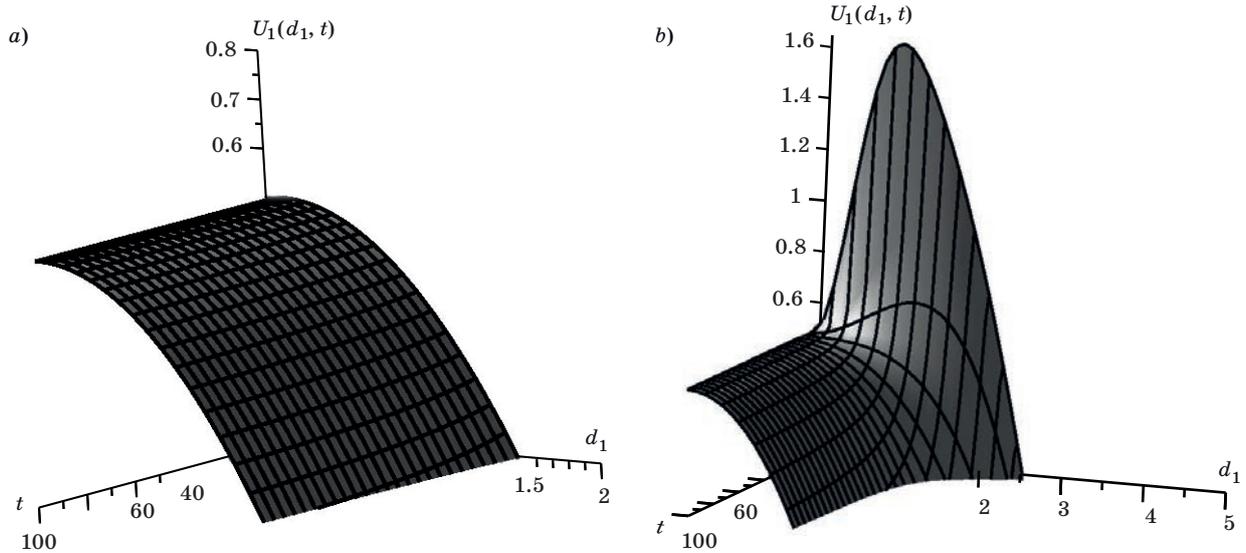
and  $e^{-z d_1^2} > \frac{1}{Az}$  for  $z \in [\tilde{z}_1, \tilde{z}_2]$ , where  $\tilde{z}_1 = \frac{\beta}{\tilde{t}_1 + C}$ ,

$\tilde{z}_2 = \frac{\beta}{\tilde{t}_2 + C}$  for some values  $t = \tilde{t}_1$  and  $t = \tilde{t}_2$ . Thus,

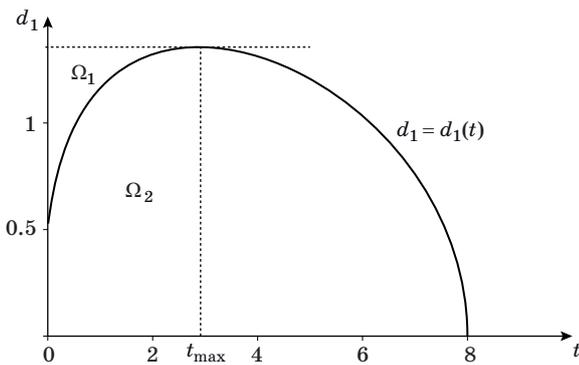
$$\frac{\partial U_1}{\partial d_1} < 0 \text{ for } t < \tilde{t}_1, \text{ or } t > \tilde{t}_2, \quad \frac{\partial U_1}{\partial d_1} > 0 \text{ for } t \in [\tilde{t}_1, \tilde{t}_2].$$

The proposition 2 is proved.

The form of the utility function  $U_1 = U_1(d_1, t)$ , corresponding to the Propositions 1 and 2, is shown in Fig. 1, *a* and *b*, respectively. It should be noted that the case of a small distance of the population from the “poor” patch is considered in the Proposition 2. Unlike a “good” patch 2, a “bad” patch 1 is a weak source of information. Thus, the process of estimation of the utility of a “bad” patch has some uncertainty for sufficiently small  $t$ . Consider the domain  $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ , where  $\Omega_1 =$



■ Fig. 1. Utility function  $U_1(d_1, t)$  of patch  $A_1$ :  $\gamma_1 = 0.4, \gamma_2 = 0.6, V_1 = 0.5, V_2 = 3, \alpha = 0.3, \beta = 1.6$ ; a —  $C = 50$ ; b —  $C = 0.5$



■ Fig. 2. Domains  $\Omega_1, \Omega_2$ :  $\gamma_1 = 0.4, \gamma_2 = 0.6, V_1 = 0.5, V_2 = 3, \alpha = 0.3, \beta = 1.6, C = 0.5$

$= \left\{ (d_1, t) : \frac{\partial U_1}{\partial d_1} > 0, d_1 \geq 0, t \geq 0 \right\}, \Omega_2 = \left\{ (d_1, t) : \frac{\partial U_1}{\partial d_1} < 0, (d_1, t) \leq d_1(t_{\max}), t \in [0, t_{\max}] \right\}$ . For sufficiently small  $t$  and  $d_1$ , i. e. when points  $(t, d_1) \in \Omega$ , derivative  $\frac{\partial U_1}{\partial d_1}$  can change its sign depending on  $t, d_1$  and the relations between the parameters  $\alpha, \beta, V_1, \bar{V}, C$ . Consider the equality  $\frac{\partial U_1}{\partial d_1} = 0$ . After simple transformations, it implies that  $d_1(t) = \sqrt{\frac{t+C}{\beta} \ln \frac{\gamma_2 \beta (V_2 - V_1)}{\alpha(t+C)}}$ . The function  $d_1(t)$  is continuous and has a unique maximum at  $t = t_{\max}$ , where  $t_{\max} \in (0, \tilde{t}), \tilde{t} = \frac{\gamma_2 (V_2 - V_1) \beta}{\alpha e} - C$  (Fig. 2).

### Domains of preferred utility

In [24], the definition of PUD was introduced and their common boundary was found. Taking into account that in the present paper, unlike [24], utility also depends on  $t$ , we propose the following definition of the PUD.

Consider the patch  $i$  as a point  $A_i \in \mathbb{R}^n$ . Assume that a point  $M(t) = M \in \mathbb{R}^n$  corresponds to a population position at a time  $t, d_i(t) = \rho(M(t), A_i)$  — the distance of  $M(t)$  from  $A_i$ .

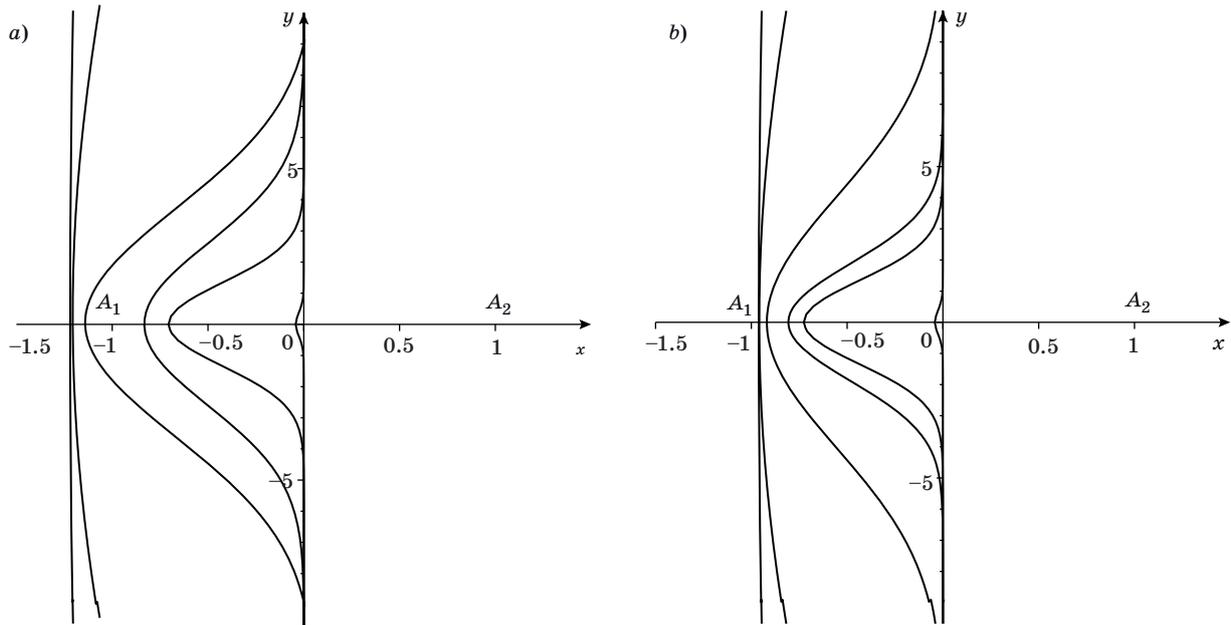
*Definition.* The preferential utility domain  $D_i(t)$  of the patch  $A_i$  is a set  $D_i(t) = \{M(t) \in \mathbb{R}^n; \rho(M(t), A_i) = d_i(t), U_i(d_i(t), t) > U_j(d_j(t), t), i \neq j, j = 1, \dots, m\}$ . Here  $U_i(d_i(t), t)$  is the utility function (3).

It follows from the definition that the boundaries of the domains  $D_i(t)$  change in time. Let us consider the asymptotic behavior of the partition of the space  $\mathbb{R}^2 = \{(x, y) : x, y \in \mathbb{R}\}$  into domains  $D_i(t)$  for the case  $m = 2$ . Without loss of generality, we assume that the patches have the following coordinates:  $A_1(-1, 0), A_2(1, 0), D_1(t), D_2(t)$  are PUDs of patches  $A_1$  and  $A_2$ , respectively. Denote  $g(t) = \{M(t) \in \mathbb{R}^2; \rho(M(t), A_i) = d_i(t), U_1(d_1(t), t) = U_2(d_2(t), t), i = 1, 2\}$  the common boundary of  $D_1(t), D_2(t)$ . Here  $\rho(M(t), A_i)$  is the distance between  $M$  and  $A_i$ . Consider question of “capture” by PUD<sub>2</sub> of  $A_1$ , where PUD<sub>2</sub> is the preferential utility domain of  $A_2$ . Denote

$E = \ln \frac{\gamma_1 (V_2 - V_1)}{\gamma_2 (V_1 - V_2) + 4\alpha}$ . It is not difficult to prove

the following proposition.

*Proposition 3.* For existence of time  $t = t^* \geq 0$ , such that  $A_1 \in D_2(t)$  for all  $t \geq t^*$  it is necessary and sufficient that  $(V_2 - V_1)/4 > \alpha$ . Wherein:  $t^* = 4\beta/E - C$ , if  $\alpha > \gamma_2 (V_2 - V_1)/4$  and  $C \leq 4\beta/E$ ,



■ Fig. 3. Case of “capture” (a) and of absence of “capture” (b) of patch  $A_1$ :  $\gamma_1 = 0.4$ ,  $\gamma_2 = 0.6$ ,  $V_1 = 0.5$ ,  $V_2 = 3$ ,  $\beta = 1.6$ ,  $C = 0.5$ ; a —  $\alpha = 0.55$ ; b —  $\alpha = 0.65$

or  $t^* = 0$ , if  $\alpha > \gamma_2(V_2 - V_1)/4$  and  $C > 4\beta/E$  or if  $\alpha \leq \gamma_2(V_2 - V_1)/4$ .

Figures 3, a and b show cases of “capture” of patch  $A_1$  and absence of “capture” of patch  $A_1$ , respectively.

**The probability of patch selection**

The utility function  $U_i(d_i, t)$  of a patch  $i$  is used to find the probability  $P_i(t)$  of selection of a suitable patch, by population, at time  $t$ . According [23], we

use the Boltzmann distribution 
$$P_i(t) = \frac{e^{qU_i(d_i,t)}}{\sum_{i=1}^m e^{qU_i(d_i,t)}}$$

to obtain  $P_i(t)$ , where  $q > 0$  is some constant. In [24] the system of  $m$  nonlinear, ordinary, non-autonomous differential equation was obtained:

$$\begin{cases} \dot{P}_1 = qP_1(P_2\varphi_{12} + \dots P_m\varphi_{1m}) \\ \dot{P}_2 = qP_2(P_1\varphi_{21} + \dots P_m\varphi_{2m}) \\ \dots\dots\dots \\ \dot{P}_m = qP_m(P_1\varphi_{m1} + \dots P_{m-1}\varphi_{m,(m-1)}) \end{cases}$$

where  $\varphi_{ij} = \dot{U}_i - \dot{U}_j$ .

In [11], for  $m = 2$ , the Lyapunov stability of the Boltzmann distribution which is a particular solution of the above system was proved. Since the form of the above system is the same as in [24], the stabil-

ity result is also valid. It means that the use of the Boltzmann distribution in practical applications is reasonable.

**Conclusion**

A utility function, used to determine the probability of a patch selection by a population is proposed. Developing the approach presented in [23], where the utility function was introduced for static population, in this paper the proposition of population is varied and, therefore, the utility function depends on time. The patches are classified according to the amount of food resources. The properties of a utility function are studied. Herewith, the particular attention is focused on the influence of a utility function component. The Boltzmann distribution is used as the probability of patch selection. Preferential utility domains are constructed and their kinematics, as  $t \rightarrow \infty$ , is analyzed.

In this work, a mathematical model, that reflects the main qualitative laws characterizing the process of selection of a suitable patch by the population, is proposed. Based on the proposed approach, relying on experimental observations, it possible to construct models for specific populations.

**Acknowledgements**

This paper was supported by the RFBR (18-01-00249a).

## References

1. *Encyclopedia of animal behavior*. Elsevier Ltd, 2019. Vol. 1. 889 p.
2. Kagan E., Ben-Gal I. *Search and foraging individual motion and swarm dynamics*. Taylor and Francis Group, LLC, 2015. 268 p.
3. Hayden B. Y., Walton M. E. Neuroscience of foraging. *Frontiers in Neuroscience*, 2014, vol. 8. Available at: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnins.2014.00081/full> (accessed 21 April 2014).
4. Barack D. L., Chang S. W., Platt M. L. Posterior cingulate neurons dynamically signal decisions to disengage during foraging. *Neuron*, 2017, no. 96, pp. 339–347. doi:10.1016/j.neuron.2017.09.048
5. Greene J. S., Brown M., Dobosiewicz M., Ishida I. G., Macosko E. Z., Zhang X., et al. Balancing selection shapes density — dependent foraging behaviour. *Nature*, 2016, no. 539, pp. 254–258. doi:10.1038/nature19848
6. Cressman R., Krivan V. The ideal free distribution as an evolutionarily stable state in density — dependent population games. *Oikos*, 2010, vol. 119, pp. 1231–1242.
7. Cressman R., Krivan V. Two-patch population models with adaptive dispersal: the effects of varying dispersal speeds. *J. Math. Biol.*, 2013, vol. 67, no. 2, pp. 329–358.
8. Dey S., Joshi A. Effects of constant immigration on the dynamics and persistence of stable and unstable *Drosophila* populations. *Nature*, 2013, vol. 3, pp. 1–7. doi: <https://doi.org/10.1038/srep01405>
9. Ivanova A. S., Kirillov A. N. Equilibrium and control in the biocommunity species composition preservation problem. *Autom. Remote Control*, 2017, vol. 78, no. 8, pp. 1500–1511. doi:10.1134/S0005117917080100
10. Piet A. T., El Hady A., Brody C. D. Rats adopt the optimal timescale for evidence integration in a dynamic environment. *Nature Communications*, 2018, no. 9, pp. 42–65. doi:<https://doi.org/10.1038/s41467-018-06561-y>
11. Hanks T. D., Kopec C. D., Brunton B. W., Duan C. A., Erlich J. C., Brody C. D. Distinct relationships of parietal and prefrontal cortices to evidence accumulation. *Nature*, 2015, no. 520, pp. 220–223. doi:10.1038/nature14066
12. Evans D. A., Stempel A. V., Vale R., Ruehle S., Lefler Y., Branco T. A. Synaptic threshold mechanism for computing escape decisions. *Nature*, 2018, no. 558, pp. 590–594. doi:10.1038/s41586-018-0244-6
13. Shenhav A., Straccia M. A., Cohen J. D., Botvinick M. M. Anterior cingulate engagement in a foraging context reflects choice difficulty, not foraging value. *Nature Neuroscience*, 2014, no. 17, pp. 1249–1254. doi:10.1038/nn.3771
14. Calhoun A. J., Chalasani S. H., Sharpee T. O. Maximally informative foraging by *Caenorhabditis elegans*. *Elife*, 2014, no. 3. Available at: <https://cdn.elifesciences.org/articles/04220/elifesciences-04220-v1.pdf> (accessed 9 December 2014).
15. Calhoun A. J., Hayden B. Y. The foraging brain. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 2015, no. 5, pp. 24–31. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.07.003>
16. Bartumeus F., Campos D., Ryu W. S., Lloret-Cabot R., Mendez V., Catalan J. Foraging success under uncertainty: search tradeoffs and optimal space use. *Ecology Letters*, 2016, no. 19, pp. 1299–1313. doi:10.1111/ele.12660
17. Jacob D. Davidson, Ahmed El Hady. Foraging as an evidence accumulation process. *Computational Biology*, 2019. Available at: <https://journals.plos.org/ploscompbiol/article?id=10.1371/journal.pcbi.1007060> (accessed 30 April 2019).
18. Constantino S. M., Daw N. D. Learning the opportunity cost of time in a patch – foraging task. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 2015, no. 15, pp. 837–853. doi:10.3758/s13415-015-0350-y
19. Charnov E. L. Optimal foraging, the marginal value theorem. *Theoretical Population Biology*, 1976, no. 9, pp. 129–136.
20. Beauchamp G. The spatial distribution of foragers and food patches can influence antipredator vigilance. *Behavioral Ecology*, 2017, no. 28, pp. 304–311. doi:<https://doi.org/10.1093/beheco/arw160>
21. Beauchamp G., Ruxton G. D. Frequency-dependent conspecific attraction to food patches. *Biology Letters*, 2014, no. 10, pp. 1–3. doi:10.1098/rsbl.2014.0522
22. Wenninger A., Kim T. N., Spiesman B. J., Gratton C. Contrasting foraging patterns: Testing resource-concentration and dilution effects with pollinators and seed predators. *Insects*, 2016, vol. 7. Available at: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4931435/pdf/insects-07-00023.pdf> (accessed 28 May 2016).
23. Shuichi M., Arlinghaus R., Dieckmann U. Foraging on spatially distributed resources with suboptimal movement, imperfect information, and travelling costs: departures from the ideal free distribution. *Oikos*, 2010, vol. 119, pp. 1469–1483. doi:10.1111/j.1600-0706.2010.18196.x
24. Kirillov A. N., Danilova I. V. Dynamics of population patch distribution. *Modeling and Analysis of Information Systems*, 2018, vol. 25, no. 3, pp. 268–275 (In Russian). doi:<https://doi.org/10.18255/1818-1015-2018-3-268-275>

УДК 517.977

doi:10.31799/1684-8853-2020-2-71-77

**Функция полезности в задаче фуражирования с неполной информацией**

А. Н. Кириллов<sup>а</sup>, доктор физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник, orcid.org/0000-0002-3356-1846, krllv1812@yandex.ru

И. В. Данилова<sup>а</sup>, аспирант, orcid.org/0000-0001-7031-4580

<sup>а</sup>Институт прикладных математических исследований Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр РАН», Пушкинская ул., 11, Петрозаводск, 185910, РФ

**Введение:** одной из задач теории фуражирования является выбор популяцией наиболее пригодного ареала (участка) как источника энергетических ресурсов (ресурсов питания). Ранее был предложен подход для исследования этой задачи, основанный на идее распределения Больцмана. В статистической физике распределение Больцмана описывает вероятность попадания системы в то или иное энергетическое состояние. **Цель:** развитие данного подхода для решения задачи выбора популяцией наиболее пригодного ареала. При этом решение, в основе которого лежит функция полезности, используется для построения вероятностного распределения. **Методы:** построение и анализ функции полезности ареала, учитывающей время и перемещение популяции. Построение на основе функций полезностей областей, характеризующих вероятность выбора ареала. Для описания вероятностей выбора популяцией ареала используется распределение Больцмана. **Результаты:** предложена и проанализирована функция полезности, зависящая от времени. Предложена мера информированности, характеризующая знание популяции об ареале и зависящая от расстояния до ареала в данный момент времени. Исследованы свойства функции полезности. Проведен анализ влияния информационной составляющей на процесс выбора популяцией ареала. В зависимости от объема пищевых ресурсов, которые в них содержатся, ареалы делятся на «плохие» и «хорошие». В результате исследования выяснилось, что плохой ареал может быть выбран популяцией на некотором промежутке времени. Построены области предпочтительной полезности ареалов при изменении времени и исследована их кинематика. **Практическая значимость:** полученные результаты позволяют прогнозировать поведение популяции при выборе наиболее пригодного ареала.

**Ключевые слова** — функция полезности, область предпочтительной полезности, мера информированности.

**Для цитирования:** Kirillov A. N., Danilova I. V. Utility function in the foraging problem with imperfect information. *Информационно-управляющие системы*, 2020, № 2, с. 71–77. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-71-77

**For citation:** Kirillov A. N., Danilova I. V. Utility function in the foraging problem with imperfect information. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2020, no. 2, pp. 71–77. doi:10.31799/1684-8853-2020-2-71-77

### АЛЁШКИН Андрей Петрович



Профессор Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, заслуженный деятель науки РФ, Санкт-Петербург.

В 1982 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы».

В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций и 10 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория адаптивного смещенного оценивания в условиях плохой наблюдаемости параметров, антенно-фидерные устройства, радиолокация, радионавигация, пространственно-временная обработка сигналов.

Эл. адрес: a\_aleshkin@mail.ru

### БЕЗЗАТЕЕВ Сергей Валентинович



Заведующий кафедрой технологий защиты информации и технологической безопасности Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1980 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Автоматизированные системы управления».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — теория информации, теория кодирования, системы информационной безопасности.

Эл. адрес: bsv@aanet.ru

### ВОСТРИКОВ Антон Александрович



Доцент кафедры вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 2000 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 45 научных публикаций и двух свидетельств о регистрации программного продукта.

Область научных интересов — распределенные и встраиваемые информационно-управляющие системы, обработка визуальной информации, опто-информационные системы.

Эл. адрес: vostricov@mail.ru

### 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

### ВЛАДИМИРОВ Владислав Владимирович



Научный сотрудник Военного института (научно-исследовательского) Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2011 году окончил Военно-космическую академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы».

Является автором 19 научных публикаций.

Область научных интересов — пространственно-временная обработка сигналов, радиолокация, унифицированные технологии фonoцелевого обеспечения.

Эл. адрес: v.vladimirov87@mail.ru

### ГЕЙДАРОВ Полад Шахмалы оглы



Доцент, ведущий научный сотрудник Института систем управления НАН Азербайджана, Баку.

В 1996 году окончил Азербайджанский политехнический институт им. Н. Туси по специальности «Инженер системотехник».

В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 45 научных публикаций.

Область научных интересов — распознавание образов, нейросетевые технологии и модели, опто-информационные системы, ГИС-системы, электронное правительство, электронная наука.

Эл. адрес: plbaku2010@gmail.com

**ГОРБУНОВА**  
**Мария**  
**Вячеславна**



Магистрант факультета бизнеса и менеджмента Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва.

В 2018 году окончила Российский экономический университет им. Г. В. Плеханова по специальности «Менеджмент организаций».

Является автором семи научных публикаций.

Область научных интересов — управление проектов, информационные технологии, блокчейн, IoT.

Эл. адрес:  
mygorbunova@edu.hse.ru

**ДАНИЛОВА**  
**Инна**  
**Владимировна**



Аспирант лаборатории информационных компьютерных технологий Института прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, Петрозаводск.

В 2010 году окончила магистратуру математического факультета Петрозаводского государственного университета им. О. В. Куусинена по специальности «Математика».

Область научных интересов — математическое моделирование в экологии и социальных науках.

Эл. адрес:  
danilovainna1987@mail.ru

**ДЕМЬЯНОВ**  
**Владислав**  
**Владимирович**



Профессор кафедры автоматизации, телемеханики и связи Иркутского государственного университета путей сообщения.

В 1993 году окончил Иркутское высшее военное авиационное инженерное училище по специальности «Авиационное радиоэлектронное оборудование».

В 2011 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций и восьми патентов на изобретение и свидетельств на полезные модели и программы для ЭВМ.

Область научных интересов — глобальные спутниковые радионавигационные системы, алгоритмы контроля доступности требуемых навигационных характеристик и др.

Эл. адрес:  
sword1971@yandex.ru

**ИМАРОВА**  
**Ольга**  
**Борисовна**



Магистрант кафедры информационных систем и защиты информации Иркутского государственного университета путей сообщения.

В 2013 году окончила Иркутский государственный университет путей сообщения по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

Является автором восьми научных публикаций и одного патента на изобретение.

Область научных интересов — обеспечение безопасности движения на неохраемых и необслуживаемых железнодорожных переездах и др.

Эл. адрес:  
imarova2010@mail.ru

**КИРИЛЛОВ**  
**Александр**  
**Николаевич**



Ведущий научный сотрудник Института прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН, Петрозаводск, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1976 году окончил Ленинградский государственный университет им. А. А. Жданова по специальности «Прикладная математика».

В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 140 научных публикаций.

Область научных интересов — теория управления нелинейными динамическими системами, гибридные системы и др.

Эл. адрес:  
kirillov@krc.karelia.ru

**КОМАРОВ**  
**Михаил**  
**Михайлович**



Профессор кафедры инноваций и бизнеса в сфере информационных технологий Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва.

В 2010 году окончил Московский государственный институт электроники и математики по специальности «Информатика и вычислительная техника».

В 2012 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук, в 2016 году — Doctor of Science (Technology) Технического университета Тампере, Финляндия. Является автором более 50 научных публикаций и шести патентов на изобретения, полезные модели и свидетельства на программы для ЭВМ.

Область научных интересов — беспроводные сенсорные сети, технологии передачи данных и др.

Эл. адрес: mkomarov@hse.ru

**ЛЕВАШОВА**  
Татьяна  
Викторовна



Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1986 году окончила Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 2009 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — управление знаниями, инженерные онтологии, управление онтологиями, управление контекстом, социоконвергентные системы.

Эл. адрес:  
tatiana.levashova@iias.spb.ru

**НЕВЗОРОВ**  
Валерий  
Иванович



Доцент Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, почетный работник высшего образования РФ, Санкт-Петербург.

В 1960 году окончил Ленинградскую Краснознаменную военную воздушно-инженерную академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы».

В 1967 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций и 10 патентов на изобретения.

Область научных интересов — антенно-фидерные устройства, радиолокация, пространственно-временная обработка сигналов.

Эл. адрес:  
nevzorov1938@mail.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 50 научных публикаций.

Область научных интересов — компьютерное моделирование, системы навигации и радиолокации, статистический анализ, электродинамика.

Эл. адрес: granat89@mail.ru

**ОМЁТОВ**  
Александр  
Ярославич



Научный сотрудник Университета Тампере, Финляндия.

В 2013 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Комплексная защита объектов информатизации».

В 2018 году защитил диссертацию на соискание ученой степени Doctor of Science (Technology), Технологический университет Тампере, Финляндия.

Является автором более 70 научных публикаций.

Область научных интересов — информационная безопасность, беспроводные сети, межмашинное взаимодействие, распределенные системы.

Эл. адрес:  
aleksandr.ometov@tuni.fi

**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@iias.spb.ru

**САВОЧКИН**  
Павел  
Владимирович



Заместитель начальника кафедры, доцент Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 1999 году окончил Военную инженерно-космическую Краснознаменную академию им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 30 научных публикаций.

Область научных интересов — антенно-фидерные устройства, распространение радиоволн, радиолокация.

Эл. адрес: p\_gehon@mail.ru

**СЕРГЕЕВ**  
**Михаил**  
**Борисович**



Профессор, директор Института вычислительных систем и программирования, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ.

В 1980 году окончил ЛЭТИ по специальности «Электронные вычислительные машины».

В 2001 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций и 14 патентов на изобретения.

Область научных интересов — теория разрядных вычислений, методы проектирования спецпроцессоров для систем контроля и управления и др.

Эл. адрес: mbse@mail.ru

**СМИРНОВ**  
**Александр**  
**Викторович**



Профессор, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1979 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Системы автоматического управления».

В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 350 научных публикаций.

Область научных интересов — концептуальное моделирование, управление знаниями, управление контекстом, конфигурирование систем, системы поддержки принятия решений, социоклибер-физические системы.

Эл. адрес: smir@ias.spb.su

**ФЕДОРОВ**  
**Марк**  
**Эдуардович**



Старший преподаватель кафедры автоматизации, телемеханики и связи Иркутского государственного университета путей сообщения.

В 2013 году окончил Иркутский государственный университет путей сообщения по специальности «Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте».

Область научных интересов — глобальные спутниковые радионавигационные системы, алгоритмы контроля доступности требуемых навигационных характеристик, повышение качества работы спутниковых радионавигационных систем в условиях воздействия неблагоприятных гелиогеофизических факторов.

Эл. адрес: metalgear@inbox.ru

**ХАЛИМАНОВ**  
**Данила**  
**Сергеевич**



Аспирант кафедры автоматизации, телемеханики и связи Иркутского государственного университета путей сообщения.

В 2018 окончил Иркутский государственный университет путей сообщения по специальности «Системы обеспечения движения поездов».

Является автором четырех научных публикаций и одного свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Область научных интересов — глобальные спутниковые радионавигационные системы, алгоритмы контроля доступности требуемых навигационных характеристик СРНС, системы интервального регулирования движения поездов и автоматической локомотивной сигнализации.

Эл. адрес: dan\_haliman@mail.ru

**ШЕПЕТА**  
**Александр**  
**Павлович**



Профессор кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, академик Международной академии наук высшей школы, Заслуженный деятель науки РФ.

В 1972 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиоэлектронные устройства».

В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 170 научных публикаций.

Область научных интересов — обработка информации в условиях априорной неопределенности, математическое моделирование стохастических процессов и полей.

Эл. адрес: alex@shepeta.com

## 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, ORCID и электронный адрес одного из авторов. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы. Предоставляйте подрисовочные 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.

**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 подрисовочных подписей и названий таблиц на русском и английском языках 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>): Литература и References.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Правила для авторов».

### 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: [ius.spb@gmail.com](mailto:ius.spb@gmail.com)

Сайт: [www.i-us.ru](http://www.i-us.ru)