

ISSN 1684–8853

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

4(83)/2016

4(83)/2016

REFEREED EDITION

INFORMATSIONNO- UPRAVLIAYUSHCHIE SISTEMY (INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS)

Founder

«Information and Control Systems», Ltd.

PublisherSaint-Petersburg State University
of Aerospace Instrumentation**Editor-in-Chief**

M. Sergeev

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

Deputy Editor-in-Chief

E. Krouk

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

Executive secretary

O. Muravtsova

Editorial Council

C. Christodoulou

PhD, Professor, Albuquerque, New Mexico, USA

L. Chubraeva

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

L. Fortuna

PhD, Professor, Catania, Italy

A. Fradkov

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

V. Kozlov

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

B. Meyer

Dr. Sc., Professor, Zurich, Switzerland

A. Ovodenko

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

Y. Podoplyokin

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

Yu. Shokin

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

V. Simakov

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

V. Vasilev

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

R. Yusupov

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

Editorial Board

V. Anisimov

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

B. Bezruchko

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

N. Blaunstein

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

A. Dudin

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

I. Dumer

PhD., Professor, Riverside, USA

V. Khimenko

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

G. Maltsev

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

G. Matvienko

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

V. Melekhin

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

A. Shalyto

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

A. Shelupanov

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

A. Shepeta

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

A. Smirnov

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

Z. Yuldashev

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

A. Zeifman

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

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

The Editorial and Publishing Center, SUAI

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

Website: <http://i-us.ru/en/>, E-mail: ius.spb@gmail.com

Tel.: +7 - 812 494 70 02

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

© Corporate authors, 2016

THEORETICAL AND APPLIED MATHEMATICS**Balonin N. A., Jennifer Seberry.** *Cretan $(4t + 1)$ Matrices* 2**INFORMATION AND CONTROL SYSTEMS****Kashevnik A. M., Baraniuc O. A., Gordeev B. R.** *Competency Management System for Technoparks* 10**Michurin S. V., Ivakin Ya. A.** *The Effectiveness and Quality of Situational Management Software for Automated Dispatching of Air Transport Spatial Processes* 19**SYSTEM AND PROCESS MODELING****Balonin N. A., Sergeev M. B., Suzdal V. S.** *Matrix Models of Generalized Crystallography* 26**Maltsev G. N., Nazarov A. V., Yakimov V. L.** *Simulation Modeling of Diagnostics of a Highly Autonomous Complex Technical System* 34**Pyataeva A. V., Favorskaya M. N.** *Background Model for Video-Based Smoke Detection in Outdoor Scenes* 44**Tregybov R. B., Oreshin A. N.** *Traffic Source Model with Changeable Transmission Rate* 51**Solov'eva T. N., Perevoryukha A. Yu.** *Dynamic Model of Depletion of Sturgeon Stocks with Complex Intrapopulation Structure* 60**HARDWARE AND SOFTWARE RESOURCES****Shpakov V. M.** *Computer Implementation of Processes on the Base of Their Logic-Dynamic Specification* 68**INFORMATION SECURITY****Abramov M. V., Azarov A. A., Tulupyeva T. V., Tulupyev A. L.** *Model of Malefactor Competencies Profile for Analyzing Information System Personnel Security from Social Engineering Attacks* 77**STOCHASTIC DYNAMICS AND CHAOS****Khimenko V. I.** *Scatterplots in Analysis of Random Streams of Events* 85**INFORMATION CHANNELS AND MEDIUM****Pavlov V. S.** *Spatial-Frequency Method for Estimating Angular Coordinates of a Radar Object* 94**Koucheryavy Y. A., Yartsev S. V.** *Epidemic Theory as a Tool for Analysis of Broadcasting Process in VANET* 101**INFORMATION ABOUT THE AUTHORS** 108

Submitted for publication 04.07.16. Passed for printing 22.08.16. Format 60×84_{1/8}.
Offset paper. Phototype SchoolBookC. Offset printing.

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

The journal is distributed by subscription. Subscription can be made in the Editorial and publishing center, SUAI as well as in any post office based on «Rospechat» catalogue:
№ 48060 — annual subscript, № 15385 — semiannual subscript.

4(83)/2016

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., С.-Петербург, РФ

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

Ответственный секретарь
О. В. Муравцова

Редакционный совет:
Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

К. Кривошолому,
д-р наук, проф., Альбукерке, Нью-Мексико, США
Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария

Ю. Ф. Подоллэкин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортун,
д-р наук, проф., Катания, Италия
А. Л. Фрадков,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ
Ю. И. Шокин,
акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ
Р. М. Юсупов,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:
В. Г. Анисимов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Б. П. Безручко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ
Н. Блаунштейн,
д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль
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

Г. Н. Мальцев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
Г. Г. Матвиенко,
д-р физ.-мат. наук, проф., Томск, РФ

В. Ф. Мелехин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. В. Смирнов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. И. Хименко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ
А. А. Шальто,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. А. Шелупанов,
д-р техн. наук, проф., Томск, РФ
А. П. Шепета,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

З. М. Юлдашев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

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

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ
Тел.: (812) 494-70-02, e-mail: ius.spb@gmail.com, сайт: http://i-us.ru

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.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий,
в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций
на соискание ученой степени доктора и кандидата наук».

© Коллектив авторов, 2016

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ И ПРИКЛАДНАЯ МАТЕМАТИКА

Balotin N. A., Jennifer Seberry. Cretan (4t + 1) Matrices 2

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Кашевник А. М., Баранюк О. А., Гордеев Б. Р. Система управления компетенциями резидентов технопарков 10

Мичурин С. В., Ивакин Я. А. Результативность и качество программных комплексов ситуационного управления для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов авиатранспорта 19

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Балонин Н. А., Сергеев М. Б., Суздаль В. С. Матричные модели обобщенной кристаллографии 26

Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л. Имитационное моделирование процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования 34

Пятаева А. В., Фаворская М. Н. Модель фона при детектировании дыма по видеопоследовательностям на открытых пространствах 44

Трегубов Р. Б., Орешин А. Н. Модель источника трафика с изменяющейся скоростью передачи 51

Соловьева Т. Н., Переварюха А. Ю. Динамическая модель деградации запасов осетровых рыб со сложной внутрипопуляционной структурой 60

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Шпаков В. М. Компьютерная реализация процессов на основе их логико-динамической спецификации 68

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Абрамов М. В., Азаров А. А., Тулупьева Т. В., Тулупьев А. Л. Модель профиля компетенций злоумышленника в задаче анализа защищенности персонала информационных систем от социоинженерных атак 77

СТОХАСТИЧЕСКАЯ ДИНАМИКА И ХАОС

Хименко В. И. Диаграммы рассеяния в анализе случайных потоков событий 85

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Павлов В. С. Пространственно-частотный метод определения угловых координат локационного объекта 94

Кучерявый Е. А., Ярцев С. В. Теория эпидемий как инструмент анализа распространения широкополосного трафика в сетях VANET 101

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

108

Сдано в набор 04.07.16. Подписано в печать 22.08.16. Формат 60×84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 13,0. Уч.-изд. л. 16,3. Тираж 1000 экз (1-й завод 150 экз). Заказ 339.
Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.
Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.
190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить
через редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:
№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

UDC 004.438

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.2

CRETAN ($4t + 1$) MATRICES

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

Jennifer Seberry^b, PhD, Emeritus Professor, jennifer_seberry@uow.edu.au

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

^bDepartment of Computing and Information Technology, University of Wollongong, NSW 2522, Australia

Purpose: We tried to obtain a Cretan($4t+1$) matrix of order $4t+1$, i.e. an orthogonal matrix whose elements have moduli ≤ 1 . The only Cretan($4t+1$) matrices previously published were of orders 5, 9, 13, 17 and 37. **Results:** In the paper, we give an infinite number of new Cretan($4t+1$) matrices constructed by the use of regular Hadamard matrices, SBIBD($4t+1; k; \lambda$), weighing matrices, generalized Hadamard matrices and Kronecker product. We introduce an inequality for the matrix radius and give a construction for a Cretan matrix of any order $n \geq 5$. **Practical relevance:** Cretan($4t+1$) matrices have direct practical applications to the problems of noise-immune coding, compression and masking of video information.

Keywords – Hadamard Matrices, Regular Hadamard Matrices, Orthogonal Matrices, Symmetric Balanced Incomplete Block Designs (SBIBD), Cretan Matrices, Weighing Matrices, Generalized Hadamard Matrices, 05B20.

Introduction

An application in image processing (compression, masking) led to the search for orthogonal matrices, all of whose elements have modulus ≤ 1 and which have maximal or high determinant.

Cretan matrices were first discussed, per se, during a conference in Crete in 2014. This paper follows closely the joint work of N. A. Balonin, Jennifer Seberry and M. B. Sergeev [1–3].

The orders $4t$ (Hadamard), $4t - 1$ (Mersenne), $4t - 2$ (Weighing) are discussed in [4–6]. This present work emphasizes the $4t + 1$ (Fermat type) orders with real elements ≤ 1 . Cretan matrices which are complex, based on the roots of unity or are just required to have at least one 1 are mentioned.

Preliminary Definitions

The absolute value of the determinant of any matrix is not altered by 1) interchanging any two rows, 2) interchanging any two columns, and/or 3) multiplying any row/or column by -1 . These equivalence operations are called *Hadamard equivalence operations*. So the absolute value of the determinant of any matrix is not altered by the use of Hadamard equivalence operation.

Write \mathbf{I}_n for the identity matrix of order n , \mathbf{J} for the matrix of all 1's and let ω be a constant. An orthogonal matrix, \mathbf{S} , of order n , is square, has real entries and satisfies $\mathbf{S}\mathbf{S}^T = \omega\mathbf{I}_n$. The core of a matrix is formed by removing the first row and column.

A Cretan matrix, \mathbf{S} , of order n has entries with modulus ≤ 1 and at least one 1 per row and column. It satisfies $\mathbf{S}\mathbf{S}^T = \omega\mathbf{I}_n$ and so it is an orthogonal matrix. A Cretan($n; \tau; \omega$) matrix, or CM($n; \tau; \omega$) has τ levels or values for its entries [1].

An Hadamard matrix of order n has entries ± 1 and satisfies $\mathbf{H}\mathbf{H}^T = n\mathbf{I}_n$ for $n = 1, 2, 4t, t > 0$ an integer. Any Hadamard matrix can be put into *normalized form*, that is having the first row and column all plus 1s using Hadamard equivalence operations: that is it can be written with a core. A regular Hadamard matrix of order $4m^2$ has $2m^2 \pm m$ elements 1 and $2m^2 \mp m$ elements -1 in each row and column (see [7, 8]).

Hadamard matrices and weighing matrices are well known orthogonal matrices. We refer to [2, 7–10] for more details and other definitions. The reader is pointed to [11–13] for details of generalized Hadamard matrices, Butson — Hadamard matrices and generalized weighing matrices.

For the purposes of this paper we will consider an SBIBD(v, k, λ), \mathbf{B} , to be a $v \times v$ matrix, with entries 0 and 1, k ones per row and column, and the inner product of distinct pairs of rows and/or columns λ . This is called the *incidence matrix* of the SBIBD. For these matrices $\lambda(v - 1) = k(k - 1)$, $\mathbf{B}\mathbf{B}^T = (k - \lambda)\mathbf{I} + \lambda\mathbf{J}$ and $\det\mathbf{B} = k(k - \lambda)^{\frac{v-1}{2}}$.

For every SBIBD(v, k, λ) there is a complementary SBIBD($v, v - k, v - 2k + \lambda$). One can be made from the other by interchanging the 0's of one with the 1's of the other. The usual SBIBD convention that $v > 2k$ and $k > 2\lambda$ is followed.

We now define our important concepts the *orthogonality equation*, the *radius equation(s)*, the *characteristic equation(s)* and the *weight* of our matrices.

Definition 1 (orthogonality equation, radius equation(s), characteristic equation(s), weight). Consider the matrix $\mathbf{S} = (s_{ij})$ of order n comprising the variables x_1, x_2, \dots, x_r .

The matrix orthogonality equation

$$\mathbf{S}^T\mathbf{S} = \mathbf{S}\mathbf{S}^T = \omega\mathbf{I}_n \quad (1)$$

yields two types of equations: the n equations which arise from taking the inner product of each row/column with itself (which leads to the diagonal elements of $\omega \mathbf{I}_n$ being ω) are called *radius equation(s)*, $g(x_1, x_2, \dots, x_n) = \omega$, and the $n^2 - n$ equations, $f(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$, which arise from taking inner products of distinct rows of \mathbf{S} (which leads to the zero off diagonal elements of $\omega \mathbf{I}_n$ are called *characteristic equation(s)*). *Cretan* matrices must satisfy the three equations: the orthogonality equation (1), the radius equation and the characteristic equation(s).

Notation: We use $\mathbf{CM}(n; \tau; \omega; \det(\text{optional}); (t_1, t_2, \dots, t_\tau))$, or just $\mathbf{CM}(n; \tau; \omega)$, where t_1, t_2, \dots, t_τ are the possible values (or levels) of the elements in \mathbf{CM} .

Inequalities

Some inequalities are known for matrices which have real entries ≤ 1 . Hadamard matrices, $\mathbf{H} = (h_{ij})$, which are orthogonal and with entries ± 1 satisfy the equality of Hadamard's inequality (2) [9]

$$\det(\mathbf{H}\mathbf{H}^T) \leq \prod_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |h_{ij}|^2, \quad (2)$$

have determinant $\leq n^{\frac{n}{2}}$. Further Barba [14] showed that for matrices, \mathbf{B} , of order n whose entries are ± 1 :

$$\det \mathbf{B} \leq \sqrt{2n-1} (n-1)^{\frac{n-1}{2}}$$

or asymptotically $\approx 0.858(n)^{\frac{n}{2}}$.

For $n = 9$ Barba's inequality gives $\sqrt{17} \times 8^4 = 16\,888.24$. The Hadamard inequality gives 19 683 for the bound on the determinant of the ± 1 matrix of order 9. So the Barba bound is better for odd orders. We thank Professor Christos Koukouvinos for pointing out to us that the literature, see Ehlich and Zeller, [15], yields a ± 1 matrix of order 9 with determinant 14 336. These bounds have not been met for $n = 9$.

Koukouvinos also pointed out that in Raghavarao [16] a ± 1 matrix of order 13 with determinant 14 929 920 $\approx 1.49 \times 10^7$ is given. This is the same value given for $n = 13$ given by Barba's inequality. The Hadamard inequality gives 1.74×10^7 for the bound on the determinant of the ± 1 matrix of order 13.

These bounds have been significantly improved

by Brent and Osborn [17] to give $\leq (n+1)^{\frac{(n-1)}{2}}$.

Wojtas [18] showed that for matrices, \mathbf{B} , whose entries are ± 1 , of order $n \equiv 2 \pmod{4}$ we have

$$\det \mathbf{B} \leq 2(n-1)(n-2)^{\frac{n-2}{2}}$$

or asymptotically $\approx 0.736(n)^{\frac{n}{2}}$.

This gives a determinant bound $\leq 73\,728$ for order 10 whereas the weighing matrix of order 10 has determinant $9^5 = 59\,049$.

We observe that the determinant of a $\mathbf{CM}(n; \tau; \omega; \det)$ is always $\omega^{\frac{n}{2}}$.

Hence we can rewrite the known inequalities of this subsection noting that only the Hadamard inequality applies generally for elements with modulus ≤ 1 . Thus we have:

Theorem 1. Hadamard — Cretan Inequality. *The radius of a Cretan matrix of order n is $\leq n$.*

Two Trivial Cretan(n) Families

The next two families are included for completeness.

The Basic Family

Lemma 1. *Consider $\mathbf{C} = a\mathbf{I} + b(\mathbf{J} - \mathbf{I})$ of order n , a, b*

variables. This gives a $\mathbf{CM}\left(n; 2; 1 + \frac{4(n-1)}{(n-2)^2}\right)$ matrix

of order n , i.e. a $\mathbf{CM}\left(n; 2; 1 + \frac{4(n-1)}{(n-2)^2}; \det; \left(1, \frac{-2}{n-2}\right)\right)$.

Proof. Writing \mathbf{C} with a on the diagonal and other elements b , the radius and characteristic equations become

$$a^2 + (n-1)b^2 = \omega \text{ and } 2a + (n-2)b = 0.$$

Hence with $a = 1$ and $b = \frac{-2}{n-2}$ we have $\omega = 1 + \frac{4(n-1)}{(n-2)^2}$ for the required $\mathbf{CM}(n)$ matrix.

Remark 1. For $n = 7, 9, 11, 13$ this gives $\omega = 1\frac{24}{25}, 1\frac{32}{49}, 1\frac{40}{81}$ and $1\frac{48}{121}$ respectively. These

determinants are very small. However they do give a $\mathbf{CM}(n; 2)$ for all integers $n > 0$.

Known Families

The following results may be found in [19] and [6].

Proposition 1. [*Cretan*($4t$)]. *There is a Cretan($4t; 2; 4t$) for every integer $4t$ for which there exists an Hadamard matrix.*

Proposition 2. [*Cretan*($4t - 1$)]. *There are Cretan($4t - 1; 2; \omega$), $\omega = 4t + 1 - \sqrt{t}$ and $\omega = \frac{2t^3 + t - 2t(2t-1)\sqrt{t}}{(t-1)^2}$ for every integer $4t$ for*

which there exists an Hadamard matrix.

The next two results are easy for the knowledgeable reader and merely mentioned here.

Proposition 3. [*Cretan*($4t - 2$)]. *There are Cretan($4t - 2; 3; k$) whenever there is a $\mathbf{W}(4t - 2, k)$*

weighing matrix. For $k = 4t - 3$, the sum of two squares, and a $W(4t - 2, 4t - 3)$ is known, the complex Cretan matrix $CM(4t - 2; 3; 4t - 2)$ has elements $i = \sqrt{-1}, 1$ or -1 .

Proposition 4. [Cretan(np)]. There are complex Cretan $(np; p; n)$, when ever there exists a generalized Hadamard matrix based on the p th roots of unity.

The Additive Families

We will illustrate this construction using two Cretan matrices to give a Cretan matrix whose order is the sum of their orders. This shows how many possible matrices we might find for any n but again all the determinants are small.

Lemma 2. Let A and B be $CM(n_1; 3; \omega_1)$ and $CM(n_2; 3; \omega_2)$ respectively. Then $A \oplus B$ given by

$$\begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix}$$

is a $CM(n_1 + n_2; 4; \omega)$ matrix of order $n_1 + n_2$ with $\omega = \min(\omega_1, \omega_2)$. (Note it does not have one 1 per row and column.)

Remark 2. We note using smaller $CM(n_i; \tau; \omega_i)$ gives many inequivalent $CM(n; \tau; \omega)$ for any order $n = \sum_i n_i$ but the elements of all but the smallest sub matrix will not contribute 1 to the resulting Cretan matrix.

Now with $n = n_1 + n_2$ for $21 = 4 + 17, 5 + 16, 6 + 15, 7 + 14, 8 + 13, 9 + 12, 10 + 11$ plus other combinations, the sub matrices of orders n_1 and n_2 contribute differently to τ and ω . This means

Proposition 5. There is a Cretan $(n; \tau; \omega)$ for every integer n .

In the section on Kronecker product of Cretan matrices we explore the same Proposition 5 for more interesting τ .

Constructions for Cretan(4t + 1; τ) Matrices

We now describe a number of constructions for Cretan(4t + 1) matrices.

Constructions using SBIBD

• 2-level Cretan(4t + 1) matrices via SBIBD(v = 4t + 1, k, λ)

The following Theorem is a special case of the construction for 2-level Cretan(v = 4t + 1) given in [6]. It also yields a valid $CM(37; 2)$.

Theorem 2 [6]. Let S be a $CM(v = 4t + 1; 2; \omega)$; (a, b) based on $SBIBD(v = 4t + 1, k, \lambda)$ then $a = 1$,

$$b = \frac{(k - \lambda) \pm \sqrt{k - \lambda}}{v - 2k + k} \text{ and } \omega = ka^2 + (v - k)b^2, \text{ provided } |b| \leq 1.$$

Example 1. Using the La Jolla Repository <http://www.ccrwest.org/ds.html> of difference sets we obtain an $SBIBD(37, 9, 2)$. Using Theorem 2 we obtain $CM(37; 2; 12.325; (1, 0.345))$ and $CM(37; 2; 9.485;$

$(1, 0.132)$). The complementary $SBIBD(37, 28, 21)$ does not give any Cretan matrix as $|b| \geq 1$.

We especially note the (45, 12, 3) difference set, where the occurrence of the Cretan $(45; 2; 20\frac{1}{4})$ matrix and the Cretan $(45; 2; 14\frac{1}{16})$ matrices both arise from the $SBIBD(45, 12, 3)$; the complementary $SBIBD(45, 33, 24)$ does not yield any Cretan matrix.

Example 2. Orthogonal matrices of orders 13 and 21 may be constructed by using the $SBIBD(13, 4, 1)$ and $SBIBD(21, 5, 1)$ given in [20]. $CM(13; 2; 9; 60; (1, \frac{3 \pm \sqrt{3}}{6}))$ and $CM(21; 2; 10; (1, -\frac{1}{6}))$ are given in Fig. 1, a, b.

All the examples of $SBIBD(4t + 1, k, \lambda)$ that we have given from the La Jolla Repository have been constructed using difference sets. Most of those we give arise from Singer difference sets and finite geometries: these $SBIBD((p^{n+1} - 1)/(p - 1), (p^n - 1)/(p - 1), (p^{n-1} - 1)/(p - 1))$ difference sets are denoted as $PG(n, p)$. The bi-quadratic type constructions are due to Marshall Hall [21]. There are many $SBIBD$ constructed without using difference sets.

• Bordered Constructions

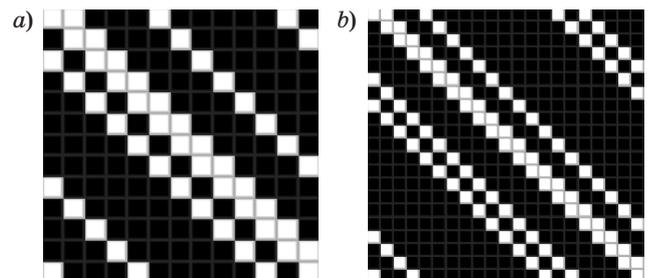
We do not elaborate on the next theorem here but note it gives many Cretan matrices $CM(v + 1)$.

Theorem 3. The matrix C below can be used to construct many $CM(v + 1; \tau; \omega)$ with borders by replacing the matrix B by an $SBIBD(v, k, \lambda)$.

When a matrix C is written in the following form

$$C = \begin{bmatrix} x & s & \dots & s \\ s & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & B & \vdots \\ s & \dots & \dots & \vdots \end{bmatrix}$$

B is said to be the core of C and the s 's are the borders of B in C . C is said to be in bordered form. The variables s and x can be realized in the cases described below.



■ Fig. 1. 2-level Cretan matrices of order 13 and 21: a — $CM(13; 2; 9.60)$; b — $CM(21; 2; 10)$

• Using Regular Hadamard Matrices

For details and constructions many of the known Regular Hadamard Matrices the interested reader is referred to [8, 7, 22].

Lemma 3. Let \mathbf{M} be a regular Hadamard matrix of order $4m^2$ with $2m^2 + m$ positive elements per row and column. Then forming \mathbf{C} as follows

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & s & \dots & s \\ s & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \frac{1}{2m}\mathbf{M} & \vdots \\ s & \dots & \dots & \vdots \end{bmatrix}$$

gives a $Cretan(4n^2 + 1; 4; 1)$ matrix or $\mathbf{CM} \left(4m^2 + 1; 4; 1; \left(0, 1, \frac{1}{2m}, \frac{-1}{2m} \right) \right)$.

Proof. For \mathbf{C} to be a $Cretan$ matrix it must satisfy the orthogonality, radius and characteristic equations. These are

$$\mathbf{C}\mathbf{C}^T = (1 + 4m^2s^2)\mathbf{I}_{4m^2+1} = (s^2 + 4m^2)\mathbf{I}_{4m^2+1} = \omega\mathbf{I}_{4m^2+1}$$

for the orthogonality equation, giving $s = 0$, $\omega = 1$ for the radius equation and 0 for the characteristic equations.

Hence we have a matrix of order $4m^2 + 1$ with elements $0, 1, \pm \frac{1}{2m}$ satisfying the required $Cretan$ equations.

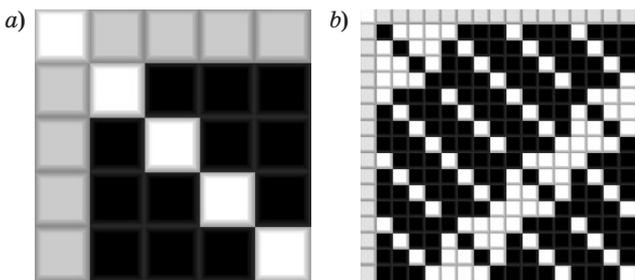
Corollary 1. Since there exists a regular (symmetric) Hadamard matrix of order $4 = 2^2, 4^2 = 2^{2^2}, 4^{4^2} = 2^{2^{2^2}}, \dots$, there is a $Cretan = (2^{2^{2^2}} \dots + 1; 4; 1)$ for a Fermat number.

Proof. Let \mathbf{S} be the regular symmetric Hadamard matrix of order 4. Then the Kronecker product

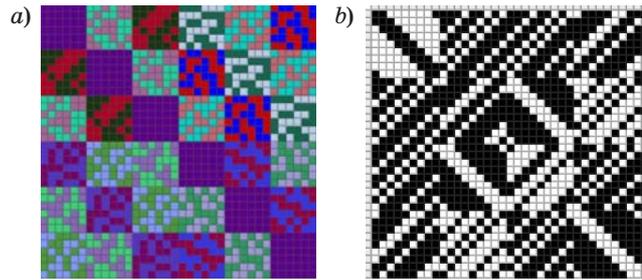
$$\mathbf{S} \times \mathbf{S} \times \dots \times \mathbf{S}$$

is the required core for the construction in Lemma 3.

Example 3. Purported examples of pure Fermat matrices in Fig. 2, *a, b* for orders 5 and 17: levels *a, b* are white and black colours, the border level *s* is given in grey. However the reader is cautioned that though the figures appear to be $Cretan$ matrices



■ Fig. 2. Orthogonal $Cretan$ (Fermat) matrices for Fermat numbers 5 (*a*) and 17 (*b*)



■ Fig. 3. Regular Hadamard matrix of order 36 (*a*) and a 3-level $Cretan(37)$ (*b*)

they are not. They are based on SBIBD, including the regular Hadamard matrix $SBIBD(4m^2, 2m \pm m, m \pm m)$ and require $c = a$. We note though that when $c = a \neq 1$ the radius and characteristic equations do not give meaningful real solutions.

Example 4. See Fig. 3, *a, b* for examples of a regular Hadamard matrix of order 36 and a purported new Balonin — Seberry type of 3-level $Cretan(37)$ with complex entries that is a orthogonal matrix of order 37. A real $Cretan(37; 2)$ does exist from Theorem 2 above (see example).

Using Normalized Weighing Matrix Cores

The next construction is not valid in the real numbers. However we can allow $Cretan$ matrices to have complex elements and choose the diagonal to be $i = \sqrt{-1}$.

Lemma 4. Suppose there exists a normalized conference matrix, \mathbf{B} , of order $4t + 2$, that is a $\mathbf{W}(4t + 2, 4t + 1)$. Then \mathbf{B} may be written as

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} i & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \dots & \dots & \vdots \\ \vdots & \dots & \mathbf{F} & \vdots \\ 1 & \dots & \dots & \vdots \end{bmatrix}$$

This is a $Cretan$ matrix.

Removing the first row and column of \mathbf{B} to study the core \mathbf{F} is unproductive.

Generalized Hadamard Matrices and Generalized Weighing Matrices

We first note that the matrices we study here have elements from groups, abelian and non-abelian, (see [11–13, 23, 24] for more information) and may be written in additive or multiplicative notation. The matrices may have real elements, elements $\{1, -1\}$, elements $|n| \leq 1$, elements $\{1, i, i^2 = -1\}$, elements $\{1, i, -1, -i, i^2 = -1\}$, integer elements $\{a + ib, i^2 = -1\}$, n -th roots of unity, the quaternions $\{1$ and $i, j, k, i^2 = j^2 = k^2 = -1, ijk = -1\}$, $(a + ib) + j(c + id)$, a, b, c, d , integer and i, j, k quaternions or otherwise as specified.

We use the notations B^T for the transpose of G , B^H for the group transpose, B^C for the complex conjugate of B^T , B^Q for the quaternion conjugate and B^V for the quaternion conjugate transpose.

In all of these matrices the inner product of distinct rows a and b is $a - b$ or ab^{-1} depending on whether the group is written in additive or multiplicative form.

• **Generalized orthogonality:** A *generalized Hadamard matrix*, or *difference matrix*, $GH(gn, g)$, of order $h = gn$, over a group of order g , has the inner product of distinct rows the whole group the same number of n times. The inner product is $\{g_{i1}g_{j1}^{-1}, \dots, g_{ih}g_{jh}^{-1}\}$. For example

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & b & ab \\ 1 & b & ab & a \\ 1 & ab & a & b \end{bmatrix}; GG^H = (\text{group})I_4 = (Z_2 \times Z_2)I$$

orthogonality is because of the definition of the inner product.

• **Butson Hadamard matrix** [11]

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \omega & \omega^2 \\ 1 & \omega^2 & \omega \end{bmatrix}; BB^C = 3I_3, \omega^3 = 1, 1 + \omega + \omega^2 = 0$$

is said to be a Butson Hadamard matrix. Orthogonality depends on the fact that the n n th roots of unity add to zero.

• **A generalized Hadamard matrix** [11, 12, 13], $GH(np, G)$, where G is a group of order p ,

can also be written in additive form for example:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 2 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 2 & 2 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 2 & 2 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 2 & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ is a } GH(6, Z_3).$$

• **A generalized weighing matrix**, $W = GW(np, G, k)$ [23], where G is a group of order p , has w non-zero elements in each column and W is orthogonal over G . The following two matrices are additive and multiplicative $GW(5, Z_3)$, respectively:

$$\begin{bmatrix} * & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & * & 1 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & * & 0 & 2 \\ 0 & 2 & 0 & * & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 1 & * \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & \omega & \omega^2 & 1 \\ 1 & \omega & 0 & 1 & \omega^2 \\ 1 & \omega^2 & 1 & 0 & \omega \\ 1 & 1 & \omega^2 & \omega & 0 \end{bmatrix}.$$

* is zero but not the zero of the group.

Theorem 4. Any generalized Hadamard matrix or generalized weighing matrix is a $CM(n; g)$ over the group G , of order g , which may be the roots of unity.

The Kronecker Product of Cretan Matrices

Lemma 5. Suppose A and B are $CM(n_1; \tau_1; \omega_1)$ and $CM(n_2; \tau_2; \omega_2)$ then the Kronecker product of A and B written $A \times B$ is a $CM(n_1 n_2; \tau; \omega_1 \omega_2)$ where τ depends on τ_1 and τ_2 .

■ **Table 1.** Some Cretan $CM(4t + 1)$, $3 \leq 4t + 1 \leq 199$

From Regular Hadamard Matrices ($\omega = 1$)		5	17	37	65	101	145	197
From Difference Sets (ds)								
v	k	λ	Existence	Difference set	Comment			
13	4	1	All known	PG(2, 3)	Unique Hall [28]			
21	5	1	All known	PG(2, 4)	Unique Hall [28]			
37	9	2	Exists	Biquadratic residue ds	Hall [28]			
45	12	3	All known	—	La Jolla [20]			
57	8	1	All known	PG(2, 7)	Unique Hall [28]			
73	9	1	All known	PG(2, 8)	Unique Hall [28]			
85	21	5	Exists	PG(3, 4)	[20]			
101	25	6	Exists	Biquadratic residue ds	Hall [28]			
109	28	7	Exists	Biquadratic residue ds	Hall [28]			
121	40	13	Exists	PG(4, 3)	[20]			
133	33	8	Exists	—	La Jolla [20]			
197	49	12	Exists	Biquadratic residue ds	Hall [28]			
Kronecker Product			All orders which are the product a known order and of prime power $\equiv 3 \pmod{4}$					

Example 5. From [6, 25] we see that $CM(3; 2; 2.25)$, $CM(7; 2; 5.03)$ and $CM(7; 2; 3.34)$ exist so there exist $CM(21; 3; 11.32)$ and $CM(21; 3; 7.52)$. The Hadamard — Cretan bound gives, for $n = 21$, radius ≤ 21 .

From Balonin and Seberry [6] we have that since an $SBIBD\left(p^r, \frac{p^r-1}{2}, \frac{p^r-3}{4}\right)$ exists for all prime powers $p^r \equiv 3 \pmod{4}$ there exist $CM(p^r; 2; \omega)$ for all these prime powers (see Proposition 2). Hence using Kronecker products in the previous theorem and writing n as a product of prime powers we have.

Theorem 5. *There exists a $CM(n; \tau; \omega)$ $\omega > 1$ for all odd orders n , $n = \prod \rho \times p^i p^{j_2} \dots$, where ρ is an order for which a Cretan $CM(\rho = 4t + 1)$ is known and $p^i p^{j_2}, \dots$ are any prime powers $\equiv 3 \pmod{4}$, for some τ and ω .*

Table 1 gives the integers for which ρ is presently known. Similar theorems can be obtained for all even n .

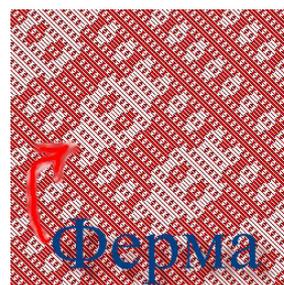
Remark 3. We note that τ depends on the actual construction used. Combining $CM(n_1; 2; \omega_1 : (a, b))$ and $CM(n_2; 2; \omega_1 : (a, b))$ gives $CM(n_1 n_2; 3; \omega_{12} : (a^2, ab, b^2))$. General formulae for τ from CM with different levels are left as an exercise.

The Difference between $Cretan(4t + 1; \tau)$ Matrices and Fermat Matrices

The first few pure Fermat numbers are $v = 3, 5, 17, 257, 65537, 4294967297, \dots$. We note these are all $\equiv 1 \pmod{4}$ and may be constructed using Corollary 1. Fig. 4 gives an early example of a Fermat matrix.

Finding 3-level orthogonal matrices of order $\equiv 1 \pmod{4}$ for non-pure Fermat numbers has proved challenging. Orders $n = 9$ and $n = 13$ are given in [4].

Orders $v = 2^{even} + 1$ called Fermat type matrices, pose an interesting class to study.



■ Fig. 4. Core of Russian Fermat Matrix from mathscinet.ru

Orders $4t + 1$, t is odd, are $Cretan(4t + 1)$ — matrices; their order is neither a Fermat number ($2 + 1 = 3, 2^2 + 1 = 4 + 1, 2^{2^2} + 1 = 16 + 1, 2^{2^{2^2}} + 1 = 256 + 1, \dots$) nor a Fermat type number ($2^{even} + 1$). Examples of regular Hadamard matrices of order 36, giving the first $CM(37; 3; 1)$ matrix of order 37 [3] where 37 is not a Fermat number or Fermat type number, have been placed at [26]. They use regular Hadamard matrices as a core and have the same, as any other Hadamard matrix, level functions. We call them $Cretan(4t + 1)$ matrices and will consider them further in our future work.

Matrices of the $Cretan(4t + 1)$ family made from Singer difference sets (see [21]) also have orders belonging to the set of numbers $4t + 1$, t odd: these are different from the three-level matrices of Balonin — Sergeev (Fermat) family [27, 19] with orders $4t + 1$, t is 1 or even.

Summary

In this paper we have given new constructions for $CM(4t + 1)$. These are summarised in Table 1 for $4t + 1 < 200$. Table 2 gives 2-level and 3-level $CM(4t \pm 1)$.

■ Table 2. Cretan 2-level and 3-level $CM(4t \pm 1)$, $3 \leq 4t + 1 \leq 199$

v	Method	v	Method	v	Method
3	BM [4] + Prop. 2	5	BM [4]	7	BM [4] + Prop. 2
9	BM [4]	11	BM [4] + Prop. 2	13	BM [4]
15	Kronecker	17	—	19	Prop. 2
21	From SBIBD Table 1	23	Prop. 2	25	Kronecker
27	Prop. 2	29	—	31	Prop. 2
33	Kronecker	35	Kronecker	37	—
39	Kronecker	41	—	43	Prop. 2
45	From SBIBD Table 1	47	Prop. 2	49	Kronecker
51	—	53	—	55	Kronecker
57	From SBIBD Table 1	59	Prop. 2	61	—

■ *Finish of table 2*

ν	Method	ν	Method	ν	Method
63	Kronecker	65	Kronecker	67	Prop. 2
69	Kronecker	71	Prop. 2	73	From SBIBD Table 1
75	Kronecker	77	Kronecker	79	Prop. 2
81	Prop. 2	83	—	85	From SBIBD Table 1
87	—	89	—	91	Kronecker
93	Kronecker	95	Kronecker	97	—
99	Kronecker	101	From SBIBD Table 1	103	Prop. 2
105	Kronecker	107	Prop. 2	109	From SBIBD Table 1
111	—	113	—	115	Kronecker
117	Kronecker	119	—	121	From SBIBD Table 1
123	—	125	Kronecker	127	Prop. 2
129	Kronecker	131	Prop. 2	133	From SBIBD Table 1
135	Kronecker	137	—	139	Prop. 2
141	Kronecker	143	—	145	—
147	Kronecker	149	—	151	Prop. 2
153	—	155	Kronecker	157	—
159	—	161	Kronecker	163	Prop. 2
165	Kronecker	167	Prop. 2	169	Kronecker
171	Prop. 2	173	—	175	Kronecker
177	Kronecker	179	Prop. 2	181	—
183	—	185	—	187	—
189	Kronecker	191	Prop. 2	193	—
195	Prop. 2	197	From SBIBD Table 1	199	Prop. 2

Conclusions

Cretan matrices are a very new area of study. They have many research lines open: what is the minimum number of variables that can be used; what are the determinants and radii that can be found for *Cretan*($n; \tau$) matrices; why do the congruence classes of the orders make such a difference to the proliferation of *Cretan* matrices for a given order; find the *Cretan* matrix with maximum and minimum determinant for a given order; can one be found with fewer levels?

References

- Balonin N. A., Seberry J. Remarks on Extremal and Maximum Determinant Matrices with Moduli of Real Entries ≤ 1 . *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 5(72), pp. 2–4.
- Balonin N. A., Seberry J. A Review and New Symmetric Conference Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 4 (71), pp. 2–7.

Acknowledgements

We thank Professors Richard Brent, Christos Koukouvinos and Ilias Kotsireas for their valuable input to this paper. The authors also wish to sincerely thank Mr Max Norden, BBMgt(C.S.U.), for his work preparing the layout and LaTeX version of this article, and Mrs Tamara Balonin for her work preparing the text of the ‘word’ version. We acknowledge <http://www.wolframalpha.com> for the number calculations in this paper and <http://www.mathscinet.ru> for the graphics.

- Balonin N. A., Seberry J., Sergeev M. B. Three-Level *Cretan* Matrices of Order 37. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 2(75), pp. 2–3. doi: 10.15217/issn1684-8853.2015.2.2
- Balonin N. A., Mironovsky L. A. Hadamard Matrices of Odd Order. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2006, no. 3(22), pp. 46–50 (In Russian).
- Balonin N. A., Sergeev M. B., Mironovsky L. A. Calculation of Hadamard — Fermat Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and

- Control Systems], 2012, no. 6(61), pp. 90–93 (In Russian).
6. Balonin N. A., Seberry J. Two-level Cretan Matrices Constructed Using SBIBD. *Special Matrices*, vol. 3, iss 1, pp. 186–192.
 7. Seberry J. Hadamard matrices. In: *Combinatorics: Room Squares, Sum-free Sets, Hadamard Matrices*. Lecture Notes in Mathematics, Springer-Verlag, 1972, vol. 292, p. 508.
 8. Seberry J., Yamada M. Hadamard Matrices, Sequences and Block Designs. In: *Contemporary Design Theory — a Collection of Surveys*. Eds. J. H. Dinitzand, D. R. Stinson. New York, Wiley, 1992. Pp. 431–560.
 9. Hadamard J. Résolution d'une Question Relative aux Déterminants. *Bulletin des Sciences Mathématiques*, 1893, vol. 17, pp. 240–246 (In French).
 10. Geramita A. V., Seberry J. Orthogonal Designs: Quadratic Forms and Hadamard Matrices. *Lecture Notes in Pure and Applied Mathematics*, Marcel Dekker, New York, NY, 1979, vol. 45, p. 460.
 11. Butson A. T. Generalized Hadamard Matrices. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 1962, vol. 3, pp. 894–898.
 12. Drake D. A. Partial λ -geometries and Generalised Hadamard Matrices. *Canadian J. Math.*, 1979, vol. 31, pp. 617–627.
 13. De Launey W. A Survey of Generalised Hadamard Matrices and Difference Matrices $d(k, \lambda; g)$ with Large k . *Utilitas Math.*, 1986, vol. 30, pp. 5–29.
 14. Barba G. Intorno al Teorema di Hadamard sui Determinanti a Valore Massimo. *Giornale di Matematiche di Battaglini*, 1933, vol. 71, pp. 70–86 (In Italian).
 15. Ehlich H., Zeller K. Binaere Maruzen. *Z. Angew. Math. Mech.*, 1962, vol. 42, pp. 20–21.
 16. Raghavarao D. Some Optimum Weighing Designs. *Ann. Math. Stat.*, 1959, vol. 30, pp. 295–303.
 17. Brent R. P., Osborn J-A. H. On Minors of Maximal Determinant Matrices. *ArXiv e-prints*, 2012, 08. Also published: *Journal of Integer Sequences*, 2013, vol. 16, iss. 4, article 13.4.2, p. 30.
 18. Wojtas M. On Hadamard's Inequality for the Determinants of Order Nondivisible by 4. *Colloquium Mathematicum*, 1964, vol. 12, pp. 73–83.
 19. Balonin N. A., Sergeev M. B. On the Issue of Existence of Hadamard and Mersenne Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 5(66), pp. 2–8 (In Russian).
 20. La Jolla Difference Set Repository. Available at: <http://www.ccrwest.org/diffsets.html> (accessed 29 May 2016).
 21. Hall M., Jr. *Combinatorial Theory*. Blaisdell Ginn and Co., 1th ed., 1967. P. 448.
 22. Xia Tianbing, Xia Mingyuan, and Seberry Jennifer. Regular Hadamard Matrix, Maximum Excess and SBIBD. *Australasian Journal of Combinatorics*, 2003, vol. 27, pp. 263–275.
 23. Seberry J. Some Remarks on Generalized Hadamard Matrices and Theorems of Rajkundlia on SBIBDs. A. F. Horadam and W. D. Wallis ed. *Combinatorial Mathematics VI, Lecture Notes in Mathematics*, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg, New York, 1979, vol. 748, pp. 154–164.
 24. Spence Adams Sarah, Wysocki Beata, Wysocki Tadeusz, Seberry Jennifer, Finlayson Ken and Xia Tianbing. The Theory of Quaternion Orthogonal Designs. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2008, vol. 56, no. 1, pp. 256–265.
 25. Balonin N. A., Sergeev M. B., Hadar O., Seberry J. Three Level Cretan Matrices Constructed via Conference Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2015, no. 2(75), pp. 4–6. doi: 10.15217/issn1684-8853.2015.2.4
 26. Seberry J. Regular Hadamard Matrices of Order 36. Available at: <http://www.uow.edu.au/~jennie/matrices/H36/36R.html> (accessed 29 May 2016).
 27. Balonin N. A., Sergeev M. B. Local Maximum Determinant Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 1(68), pp. 2–15 (In Russian).
 28. Hall M., Jr. A Survey of Difference Sets. *Proc. Amer. Math. Soc.*, 1956, vol. 7, pp. 975–986.

УДК 004.438

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.2

Критские матрицы порядков $4t + 1$ Н. А. Балонин^а, доктор техн. наук, профессорДженнифер Себерри^б, PhD, профессор^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ^бУниверситет Вуллонгонг, Вуллонгонг, Новый Южный Уэльс, Австралия

Цель: дать критские матрицы $Cretan(4t + 1)$ порядков $4t + 1$ — ортогональные матрицы с элементами, ограниченными по модулю ≤ 1 (ранее публиковались критские матрицы типа $Cretan(4t + 1)$ определенных порядков 5, 9, 13, 17 и 37). **Результаты:** приведено неограниченно много новых критских матриц $Cretan(4t + 1)$, конструируемых при помощи регулярных матриц Адамара, симметричного сбалансированного блочного дизайна SBIBD($4t + 1; k; \lambda$), взвешенных матриц, обобщенных матриц Адамара и произведения Кронекера. Предложено неравенство для радиуса матриц и дана конструкция критской матрицы для каждого порядка $n \geq 5$. **Практическая значимость:** критские матрицы $Cretan(4t + 1)$ имеют непосредственное практическое применение к проблемам помехоустойчивого кодирования, сжатия и маскирования видеoinформации.

Ключевые слова — матрицы Адамара, регулярные матрицы Адамара, ортогональные матрицы, симметричный сбалансированный блочный дизайн (SBIBD), критские матрицы, взвешенные матрицы, обобщенные матрицы Адамара, 05B20.

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕТЕНЦИЯМИ РЕЗИДЕНТОВ ТЕХНОПАРКОВ

А. М. Кашевник^{а, б}, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

О. А. Баранюк^б, аспирант

Б. Р. Гордеев^б, студент

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: управление компетенциями сотрудников и компаний в целом является популярным направлением исследований в последние годы. Сегодня преимущество в глобальной конкурентной борьбе определяется не уровнем запасов природных ресурсов и размерами страны, а в первую очередь скоростью освоения и внедрения новых знаний и инноваций в самые современные технологии и продукцию. Для создания инноваций наметилась тенденция к образованию технопарков, нацеленных на аккумуляцию инновационных стартапов — резидентов, ведущих инновационную деятельность. **Цель:** создание системы управления компетенциями резидентов технопарка для автоматизации процесса поиска резидентов, удовлетворяющих тем или иным задачам потенциального заказчика. **Результаты:** сделан обзор современных систем управления компетенциями; сформулированы основные требования к системам управления компетенциями: управление профилями резидентов, поддержка трех ролей пользователей (пользователь, резидент и администратор), поддержка веб-интерфейса для взаимодействия с пользователями, полнотекстовый поиск, сравнение профилей резидентов друг с другом, сравнение задачи с профилями, поиск профилей по компетенциям; разработана архитектура системы; описаны и реализованы основные сценарии использования системы управления компетенциями для резидентов технопарков: сценарий поиска резидента по компетенциям, сценарий агрегирования возможностей резидента по его профилю, сценарий сравнения двух профилей резидентов или профиля резидента с задачей пользователя. **Практическая значимость:** предложенная система позволяет агрегировать и использовать информацию о резидентах для представления их потенциальным заказчикам.

Ключевые слова — управление компетенциями, профиль компании, веб-приложение, технопарк.

Введение

Управление компетенциями сотрудников и компаний в целом является популярным направлением исследований в последние годы. В настоящее время успех в глобальной конкурентной борьбе зависит не от объема запасов природных ресурсов и масштаба страны, а в первую очередь от скорости освоения и внедрения новых знаний и достижений в современные технологии и продукцию [1].

В данной статье рассмотрены ведущие научные работы по тематике управления компетенциями за последние 10 лет. Анализ этих работ позволил выделить основные технологии для построения систем такого класса. Важно строить точные модели компетенций как сотрудников, так и компаний в целом для дальнейшего удобства поиска необходимого сотрудника/компании и определения степени сходства требуемых компетенций и компетенций, которыми обладает сотрудник/компания. Также необходимо уделять особое внимание удобству и простоте интерфейса пользователя для мотивации использования им системы и поддержания в актуальном состоянии профиля своих компетенций.

В результате анализа работ были выделены основные требования к системе управления ком-

петенциями. В статье представлена архитектура и реализация системы управления компетенциями для резидентов Технопарка Университета ИТМО.

Обзор литературы

В статье [2] представлены результаты исследований, в рамках которых была создана информационная система для хранения и оценки компетенций студентов вузов. Система основана на мелкоструктурном представлении навыков и компетенций посредством онтологии. Она поддерживает студентов в планировании своих курсов и создает профили компетенций для форм заявления о поступлении на работу. Представление профилей основано на XML HR для того, чтобы происходил обмен данными. Например, если студенты предоставляют возможность доступа к своим профилям рекрутинговым компаниям, это позволяет специалистам по персоналу быстрее находить необходимые кадры.

В рамках университетского курса было отобрано около 60 студентов с соответствующими компетенциями в области ЭВМ для работы с экономическими задачами/информационными системами. Каждый студент смоделировал для себя три курса, которые позже они сами и прошли.

Для каждого курса был перечислен ряд компетенций, которые явились предпосылками для создания курса, и ряд компетенций, которые были получены в ходе имплементации курса.

В статье [3] представлены результаты исследований, проводимых на протяжении 10 лет, которые привели к созданию онтологии приложений для обучения на основе компетенций и управления знаниями. На базе этой онтологии представлена структура программного обеспечения для основанных на онтологии систем электронного обучения.

Исследователи пришли к выводу, что для решения проблем информационного общества следует поддерживать процесс наработки компетенций в контексте непрерывного обучения. Необходимы более гибкие, адаптивные системы обучения, в рамках и вне рамок общественного образования, до, после и во время работы.

В статье рассказывается об опыте применения метода MISA (Learning Systems Engineering Method) — учебного инженерного метода разработки. Он впервые был использован в 1992 году в целях интеграции моделирования знаний и компетенций.

Также исследователи предлагают систему TELOS (TeleLearning Operating System), представляющую собой обучающую операционную систему с онтологически управляемой архитектурой. Система объединяет человека и компьютерных агентов, используя два основных процесса: семантическое представление ресурсов и агрегацию ресурсов.

Исследователями была поставлена важная задача управления компетенциями, так как приобретение новых компетенций является основной целью любого образовательного процесса, который должен быть встроен в систему программного обеспечения, позволяющего информировать оперативные средства о новых обретенных качествах и их влиянии на достижение цели.

Авторы статьи [4] обращаются к проблеме моделирования знаний в мультиагентных системах, позволяющего агентам и пользователям одинаково воспринимать и принимать концепции предметной области. Онтологии предлагаются в качестве решения, позволяющего разработать когерентные нормы для определенных доменов. Исследователями представлена мультиагентная система, основанная на соответствующих онтологиях, обозначенных определенным доменом, дающая возможность осуществлять управление, поиск и сопоставление существующих компетенций пользователя с представленными.

Авторами были рассмотрены примеры использования компетенций в отношениях между университетами и будущими студентами, между компаниями и будущими сотрудниками.

Предложенная модель позволила университетам, студентам и сотрудникам компаний построить и поддерживать свои собственные компетенции, оценивать свои знания, чтобы отвечать своим полномочиям и осуществлять поиск желаемых компетенций в соответствующих областях.

Направление, которое исследователи планируют расширить в рамках следующей работы, — уточнение онтологий компонента. Это важно для сопоставления запросов и предложений. Долгосрочные исследования будут сосредоточены на способности модели соответствовать двум различным онтологиям одного домена.

Авторы статьи [5] обращают внимание на отсутствие в настоящее время успешных показателей в области управления компетенциями, которые могли бы предложить перспективные инструменты для более эффективного распределения ресурсов, управления знаниями, поддержки в обучении и развитии человеческих ресурсов в целом, особенно на уровне индивидуальных предпринимателей.

В целях преодоления этой проблемы ученые предложили подход совместного управления компетенциями. В этом подходе они объединили в технологии Web 2.0 процессы, выполняемые снизу вверх, с организационными процессами, выполняемыми сверху вниз. Они решили эту проблему как задачу построения совместной онтологии, основой которой является модель процесса вызревания онтологии. Для того чтобы реализовать модель процесса вызревания онтологии для управления компетенциями, исследователи построили семантически-социальное приложение SOBOLEO, которое предлагает вызревание онтологии компетенции и простой в использовании интерфейс.

Исследователи показывают [5], каким образом онтологии компетенций могут быть разработаны для охвата менее формализованных тем. Простота в использовании SOBOLEO в повседневной деятельности мотивирует сотрудников к внесению данных в систему.

В статье [6] представлены общие основы для интеллектуально-информационной системы управления компетенциями на основе онтологий для IT-компаний. На первом этапе она тестировалась на малых предприятиях, работающих в области информационных технологий, а затем применялась в других организациях такого же типа. Система управления компетенциями (CMS — Competencies Management System), по мнению авторов статьи, должна достичь следующих основных целей: а) поддерживать полное и систематическое приобретение знаний о компетенциях сотрудников предприятия; б) обеспечивать доступ к знаниям о компетенциях и их

владельцах; в) применять имеющиеся знания для достижения цели. Ядром информационной системы управления компетенциями является онтология, которая играет роль хранилища декларативной базы знаний, содержит основные понятия (такие как компания, компетенция, домен, группа, человек и т. д.), экземпляры, свойства и их отношения друг с другом. Среда Protégé была использована для создания такой онтологии. Структура онтологии задумана таким образом, что описание логики может быть использовано для представления концепции определенной предметной области в структурированном и широко распространенном виде. Приобретение знаний в данном подходе осуществляется за счет обогащения онтологии в соответствии с требованиями ИТ-компания. По мнению авторов статьи, преимуществом использования системы на основе онтологии является возможность выявления новых отношений среди концепций, основанных на логических выводах, начиная с существующих знаний. Пользователь может выбрать для запроса примеры одного типа концепции. В статье представлены некоторые примеры использования этой системы.

В работе [7] авторы сфокусировались на анализе системы управления динамическими компетенциями. Система учитывает изменения компетенций с течением времени, вызванные диффузными процессами в проектных группах. Авторы подчеркивают, что управление и контроль знаний и умений, а в последнее время и управление компетенциями компаний превратились в существенный фактор производственных процессов в части стратегических целей управления человеческим капиталом. Управление знаниями и компетенциями становится все более актуальным предметом исследований как для образовательных организаций, где необходимо сосредоточиться на детальном описании достижений учащегося в виде его компетенций, так и для компаний, где интеллектуальный капитал приравнивается к вложениям в компетенции, что позволяет работодателю принимать решения относительно тренингов, привлечения в проекты и найма на работу.

В работе [7] описана концепция системы управления динамическими компетенциями (DCMS — Dynamic Competencies Management System), которая способствует лучшей обработке компетенций динамического характера. Авторы приводят несколько доводов в пользу использования DCMS в организации: 1) система обеспечивает идентификацию навыков, знаний, поведения и возможностей, необходимых для удовлетворения текущих и будущих кадровых нужд; 2) система может сосредоточиться на индивидуальных и групповых планах развития.

Предложив формальный подход к построению системы управления компетенциями, автор работы [8] обращается к проблеме управления профилями компетенций. Управление компетенциями в последние годы стало очень актуальным, так как оно способствует достижению организационных целей и решает такие задачи, как улучшение информационного потока или выработка компетенций. В рамках статьи предложено множество подходов моделирования компетенций и использования моделей компетенций. Было выявлено, что не проведено исследование структур и не использовались профили компетенций в системе управления компетенциями.

Автор представил онтологическую реализацию абстрактной модели, включая программную архитектуру системы управления компетенцией профиля. Основным вкладом данной работы автор считает формализацию операций по компетенциям профилей и онтологическую реализацию этих операций. Предложенная архитектура реализации может способствовать, по мнению исследователя, построению системы управления компетенциями профилей.

В работе [9] рассматривается роль моделирования поведения пользователя и семантически усовершенствованные представления для персонализации его взаимодействия с системой. Работа включает общие онтологические основы моделирования пользователя OntobUMf (Ontology-based User Modeling framework), их компоненты и процессы, связанные с моделированием поведения пользователя. Авторы представляют эти онтологические основы в виде каркасных моделей, формирующих поведение пользователей и классифицирующих пользователей в соответствии с их поведением. Базой OntobUMf является пользовательская онтология, которая была разработана в соответствии с информационной системой управления информационным пакетом (IMS LIP — Information Management System Learning Information Package).

Пользовательская онтология включает в себя поведенческую концепцию, распространяется на IMS LIP спецификацию, определяет характеристики пользователей, взаимодействующих с системой. В статье приводятся примеры использования OntobUMf в контексте системы управления знаниями, а также обсуждаются предпосылки создания онтологического моделирования поведения пользователя для семантически улучшенных систем управления знаниями.

По мнению автора статьи, результаты данного исследования могут внести свой вклад в развитие других основ для моделирования поведения пользователей, других семантически усовершенствованных систем моделирования пользователя или других семантически усовершенствованных информационных систем.

Система управления обучением Moodle (Modular Object-Oriented Dynamic Learning Environment) в настоящее время является самым популярным программным решением, которое обеспечивает множество модулей для различных образовательных целей, утверждается в работе [10]. Тем не менее есть некоторые аспекты, имеющие отношение к управлению компетенциями, которые отсутствуют в Moodle. Авторы предлагают приложение, которое разработано как расширение Moodle для поддержки развития и оценки компетенций внутри курса.

В статье представлена подробная информация об онтологии компетенции, адаптированной для разработки структуры курса, а также об особенностях управления компетенциями, встроенными в Moodle. Показано, как встраивание этих функций в систему управления обучением позволяет управлять целевыми компетенциями вместе с ассоциированными элементами и оценивать уровни навыков, достигнутых студентами в рамках каждой целевой компетенции. Кроме того, можно генерировать различные типы отчетов по компетенциям в зависимости от целевой роли (учителя, студента или администратора). Предлагаемое авторами приложение позволяет удовлетворить потребность в практическом и удобном способе управления и оценки компетенций, связанных с системой управления обучением Moodle.

В работе [11] проведен анализ различных подходов, представленных в литературе, относящихся к моделированию компетенций, и предложена онтология компетенции для формального описания характеристик компетенций агентов и ресурсов в образовательных сетях. Предлагаемая авторами онтология моделирует аспекты, связанные с информационным управлением компетенциями и отслеживанием в целях поддержки развития компетенций в образовательных сетях. Авторы полагают, что с появлением парадигмы непрерывного образования и распространением терминов «общество знаний», «гражданская мобильность», «глобализация», «обучение

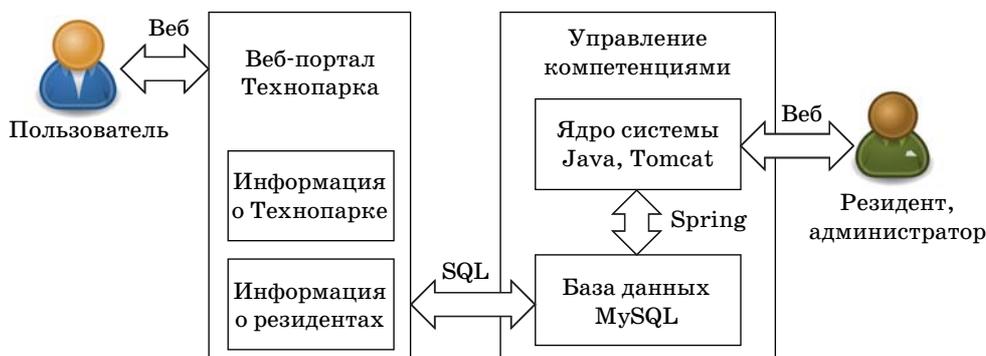
на основе компетенций» и «профессиональная подготовка» растет интерес к технологиям повышения качества образования, поскольку оно обеспечивает важное преимущество для индивидумов и организаций, поддерживая трансформацию результатов обучения в постоянные и ценные активы — знания. В этом контексте в целях содействия приобретению и непрерывному развитию новых компетенций образовательные сети выявили необходимость предоставления различных возможностей для обучения в течение всей жизни.

Анализ научных работ позволил выделить следующие основные требования к разрабатываемой системе управления компетенций резидентов технопарков:

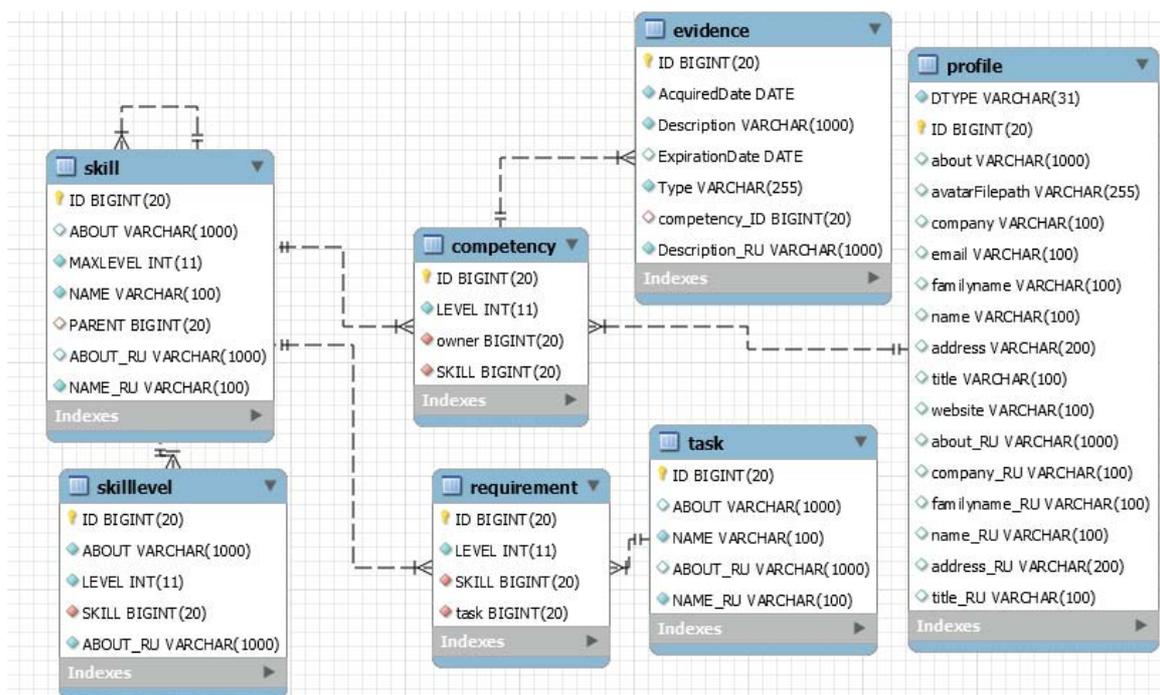
- хранение профилей компаний-резидентов, информации о решаемых ими задачах и умениях, которыми они обладают в системе управления компетенциями;
- разделение прав пользователей для следующих основных ролей: пользователь, резидент, администратор;
- поддержка веб-интерфейса для взаимодействия с пользователями;
- создание в системе заявок для резидентов на внесение своей информации в систему;
- полнотекстовый поиск;
- сравнение профилей между собой;
- сравнение задачи с профилями;
- поиск профилей по компетенциям.

Архитектура системы управления компетенциями

Архитектура системы управления компетенциями (рис. 1), разработанная для Технопарка Университета ИТМО, состоит из ядра системы и базы данных. Ядро системы реализует основную логику, обеспечивающую наполнение базы данных резидентами и управление системой администратором. По сути, ядро системы обеспечивает удобный доступ к информации, управление ею,



■ Рис. 1. Архитектура системы управления компетенциями



■ **Рис. 2.** Модель данных системы управления компетенциями

а также презентацию их резидентам и администратору. В ядре системы реализованы требуемые операции взаимодействия с профилями компетенций и поиска по ним, а также политика безопасности и ограничение прав пользователей. Пользователь (потенциальный клиент) взаимодействует с веб-порталом Технопарка. В том случае, когда его интересует информация о резидентах Технопарка, данная информация запрашивается из базы данных системы управления компетенциями Технопарка посредством SQL-запросов.

Модель данных (рис. 2) реализована в виде реляционной базы данных MySQL и состоит из следующих основных таблиц: *skill* (лексикон умений), *skilllevel* (уровни владения для каждого умения из лексикона), *competency* (совокупность умений, отражающая наличие компетенции для резидента), *evidence* (информация о подтверждающем сертификате для указанной компетенции), *profile* (профиль компании, характеризующийся множеством компетенций), *task* (задача пользователя — клиента, состоящая из множества *requirement* — требований, которые необходимо удовлетворить для решения задачи пользователя).

Реализация системы управления компетенциями

Рассмотрим основные сценарии использования системы.

1. Пользователь знает, какие компетенции ему потребуются. В этом случае он может прове-

сти поиск по компетенциям, в результате которого будут найдены все похожие профили резидентов (рис. 3).

2. Пользователь знает резидента и хочет узнать его возможности. В этом случае он может воспользоваться функцией «агрегация возможностей», позволяющей узнать все задачи, которые может выполнить резидент (рис. 4).

3. Пользователь знает либо два профиля, которые он хочет сравнить, либо профиль и задачу. В данном случае его действия сводятся к тому, чтобы сохранить в системе один из сравниваемых объектов, после чего найти второй, нажать на кнопку «сравнить» и получить результат (рис. 5).

Веб-интерфейс взаимодействия с пользователем был реализован на базе фреймворка Spring MVC. Методы Spring MVC возвращают строку, которая указывает имя шаблона представления. Этот шаблон необходимо найти обработчику представлений и сгенерировать из него полноценную веб-страницу, после чего передать ее клиенту.

В качестве обработчика представлений был выбран Thymeleaf как наиболее современный и рекомендованный командой разработки Spring.

Ниже приводятся основные пути реализованного веб-приложения и дается краткое описание его функционала:

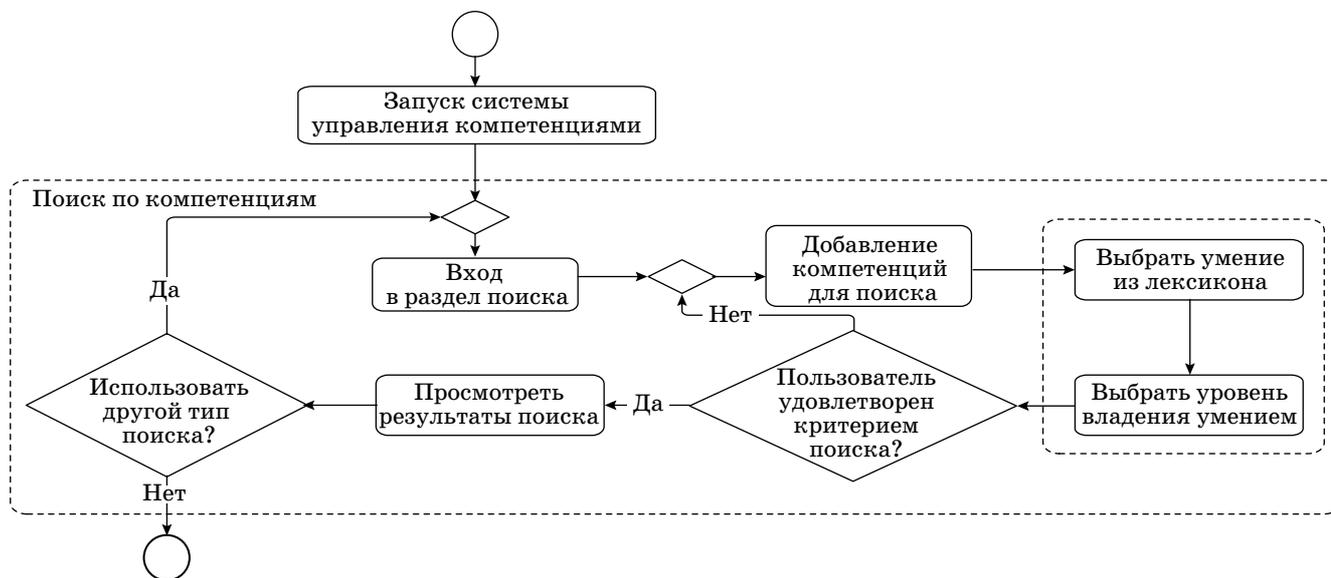
— “/” (корень приложения). Начальная страница системы управления компетенциями (рис. 6) — объясняет пользователю основы работы с системой и показывает, куда далее он может

пойти и как пользоваться навигационной панелью (navbar);

— “/viewer/”. Содержит списки основных сущностей — профилей, задач и умений, а также реализует полнотекстовый поиск;

— “/editor/”. Содержит формы для создания и изменения сущностей, а также POST-адреса для них же;

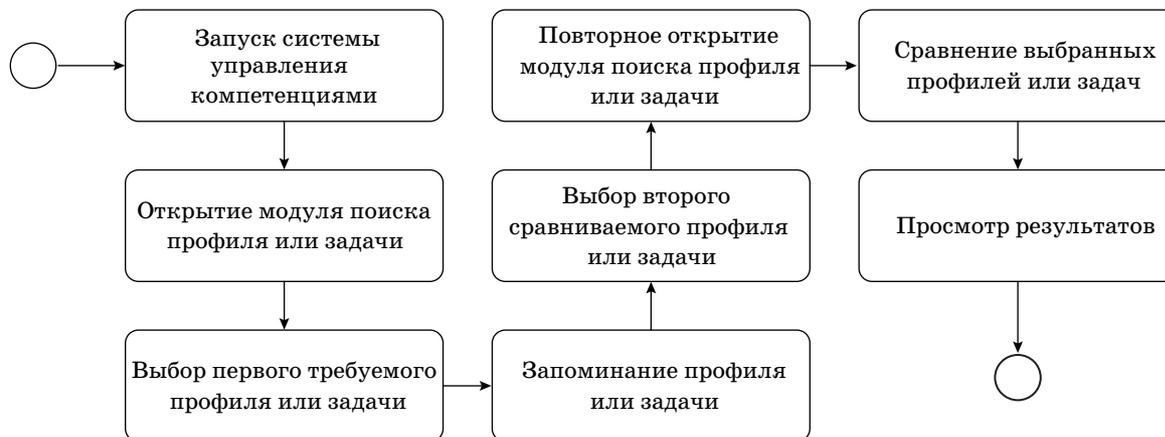
— “/security/”. Содержит набор инструментов по работе с пользователями. Позволяет любому



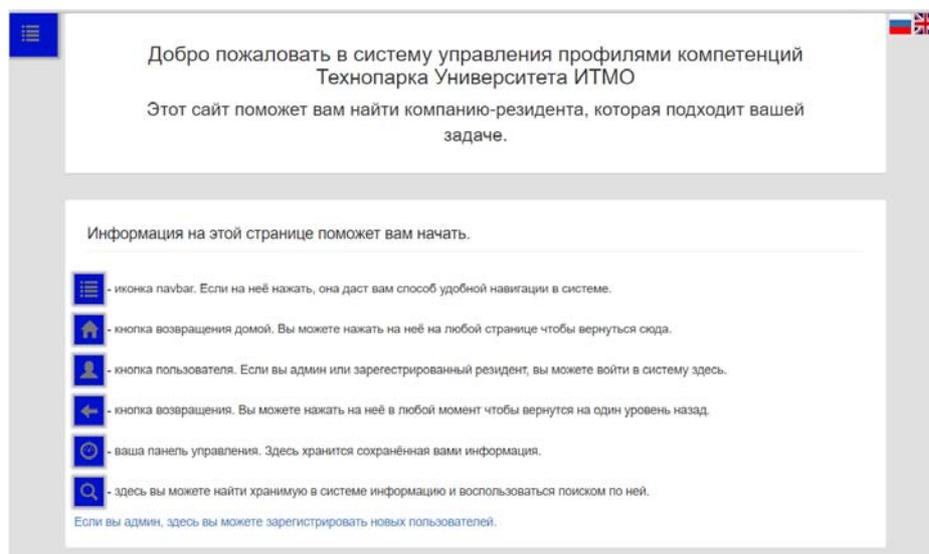
■ Рис. 3. Сценарий поиска по компетенциям



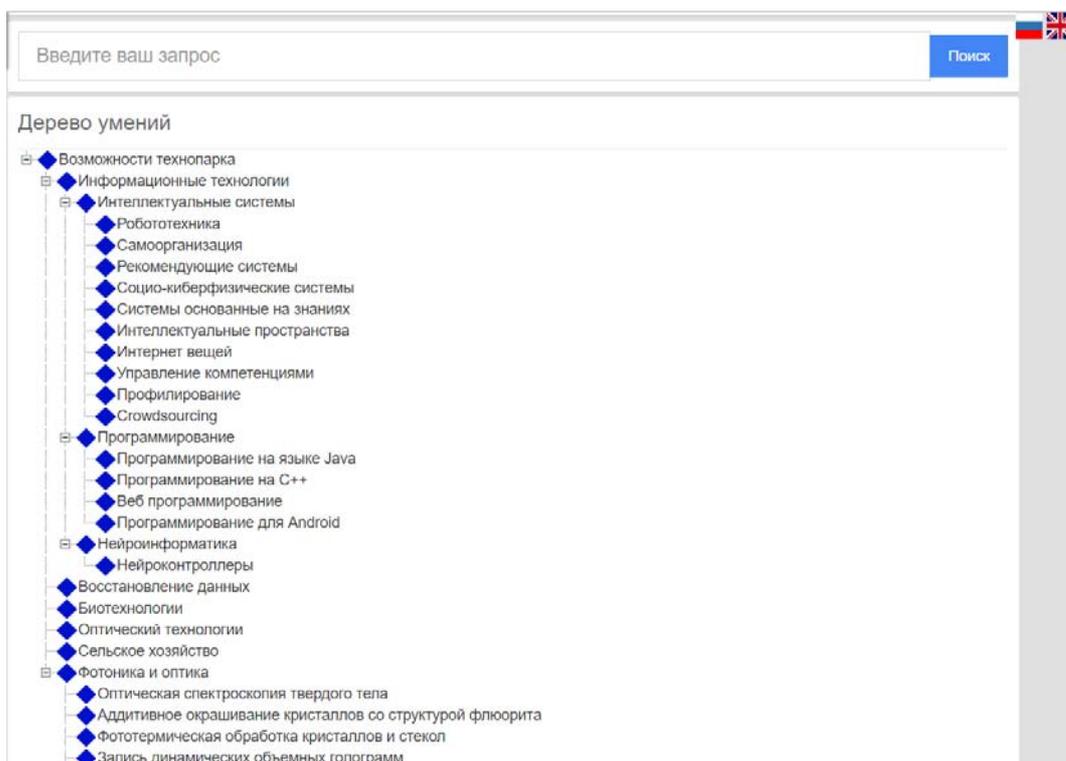
■ Рис. 4. Сценарий агрегирования возможностей резидента по его профилю



■ Рис. 5. Сценарий сравнения двух профилей резидентов или профиля резидента с задачей пользователя



■ Рис. 6. Начальная страница системы управления компетенциями



■ Рис. 7. Лексикон умений с возможностью их редактирования в виде дерева

пользователю аутентифицироваться и выходить из системы, а администратору — создавать новых пользователей. На страницу аутентификации можно попасть, нажав на ссылку на профиль пользователя, не войдя в систему. В профиле пользователя находится ссылка на выход из аккаунта;

— `"/skillTree"`. Содержит лексикон умений с возможностью их редактирования в виде дерева

(рис. 7). Для этого использовался открытый код `dtree.js`;

— `"/dashboard"`. Функционал, для которого было нецелесообразно создавать отдельные страницы, был помещен на страницу `"dashboard"`. Здесь пользователи могут просмотреть сущности, сохраненные в их контекстах пользователя, выполнить с ними некоторые операции поиска. Именно здесь находится возможность для ре-

зидентов подать заявки на добавление к их профилю новых компетенций, а для администратора — эти заявки просматривать и принимать/отклонять их.

Заключение

В статье проведен обзор современных систем управления компетенциями, сформулированы основные требования к системам такого класса,

представлена разработанная архитектура системы, описаны основные сценарии использования и реализация системы управления компетенциями для резидентов Технопарка ИТМО. В настоящий момент система развернута на серверах Технопарка и производится ее тестирование резидентами.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 16-29-12866, 16-07-00462 и 16-07-00375) и бюджетной темы № 0073-2014-0005.

Литература

1. Чеберко Е., Казаков В. Проблемы теории и практики предпринимательства // Проблемы современной экономики. 2012. № 3(43). С. 128–132.
2. Dorn J., Pichlmair M. A Competence Management System for Universities // Proc. European Conf. on Information Systems (ECIS), St. Gallen, Switzerland. 2007. P. 759–770.
3. Paquette G. An Ontology and a Software Framework for Competency Modeling and Management // Educational Technology & Society. 2007. N 10(3). P. 1–21.
4. Jordan V., Cicortas A. Ontologies Used for Competence Management // Acta Polytechnica Hungarica. 2008. N 5(2). P. 133–144.
5. Schmidt A., Braun S. People Tagging & Ontology Maturing: Towards Collaborative Competence Management // 8th Intern. Conf. on the Design of Cooperative Systems (COOP 08). 2010. P. 1–10.
6. Niculescu C., Trausan-Matu S. An Ontology-centered Approach for Designing an Interactive Competence Management System for IT Companies // Informatica Economică. 2009. N 13(4). P. 159–167.
7. Różewski P., Malachowski B., Jankowski J. Preliminaries for Dynamic Competence Management System Building // Proc. of the 2013 Federated Conf. on Computer Science and Information Systems. 2013. P. 1279–1285.
8. Tarasov V. Ontology-based Approach to Competence Profile Management // Universal Computer Science. 2012. N 18(20). P. 2893–2919.
9. Razmerita L. An Ontology-based Framework for Modeling User Behavior — A Case Study in Knowledge Management Systems // Man and Cybernetics. Part A: IEEE Transactions on Systems and Humans. 2011. N 41(4). P. 772–783.
10. Rezgui K., Mhiri H., Ghédira K. Extending Moodle Functionalities with Ontology-based Competency Management // Procedia Computer Science. 2014. N 35. P. 570–579.
11. Rezgui K., Mhiri H., Ghédira K. An Ontology-based Approach to Competency Modeling and Management in Learning Networks // Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications. 2014. N 296. P. 257–266.

UDC 004.8

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.10

Competence Management System for Technoparks

Kashevnik A. M.^{a,b}, PhD, Tech., Senior Researcher, alexey@iias.spb.su

Baraniuc O. A.^b, Post-Graduate Student, ob@itc.vuztc.ru

Gordeev B. R.^b, Master Student, gordeevbr@gmail.com

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

^bSaint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, 49, Kronverkskii St., 197101, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Competency management of employees and companies is now a popular research direction. Advantages in the global competition are determined today by the speed of mastering new knowledge and innovations in modern technologies and production. Nowadays, there is a tendency to organize technoparks aimed at accumulating innovative startups. **Purpose:** We develop a competency management system for technoparks which would automatize the process of searching for residents who satisfy the tasks from potential customers. **Results:** We have reviewed modern competency management systems and formulated the main requirements to such systems: resident profile management, supporting three user roles (user, resident and administrator), supporting a web interface for the interaction with the users, full text search, resident profile comparison, comparison of a user task with the resident profiles, resident profile search by competencies. A system architecture has been developed. The major scenarios have been described and implemented: searching for residents by competencies, aggregating the skills

of a resident by the resident's profile, comparison of two resident profiles or a resident profile with a user task. **Practical relevance:** The proposed system allows you to aggregate the information about residents and use it to introduce the residents to potential customers.

Keywords — Competency Management, Company Profile, Web Application, Technopark.

References

1. Cheberko E., Kazakov V. Problems of Entrepreneurship Theory and Practice. *Problemy sovremennoi ekonomiki*, 2012, no. 3(43), pp. 128–132 (In Russian).
2. Dorn J., Pichlmair M. A Competence Management System for Universities. *Proc. European Conf. on Information Systems (ECIS)*, St. Gallen, Switzerland, 2007, pp. 759–770.
3. Paquette G. An Ontology and a Software Framework for Competency Modeling and Management. *Educational Technology & Society*, 2007, no. 10(3), pp. 1–21.
4. Jordan V., Cicortas A. Ontologies used for Competence Management. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2008, no. 5(2), pp. 133–144.
5. Schmidt A., Braun S. People Tagging & Ontology Maturing: Towards Collaborative Competence Management. *8th Intern. Conf. on the Design of Cooperative Systems (COOP 08)*, 2010, pp. 1–10.
6. Niculescu C., Trausan-Matu S. An Ontology-centered Approach for Designing an Interactive Competence Management System for IT Companies. *Informatica Economică*, 2009, no. 13(4), pp. 159–167.
7. Rózewski P., Małachowski B., Jankowski J. Preliminaries for Dynamic Competence Management System Building. *Proc. of the 2013 Federated Conf. on Computer Science and Information Systems*, 2013, pp. 1279–1285.
8. Tarasov V. Ontology-based Approach to Competence Profile Management. *Universal Computer Science*, 2012, no. 18(20), pp. 2893–2919.
9. Razmerita L. An Ontology-based Framework for Modeling User Behavior — A Case Study in Knowledge Management Systems. *Man and Cybernetics, Part A: IEEE Transactions on Systems and Humans*, 2011, no. 41(4), pp. 772–783.
10. Rezgui K., Mhiri H., Ghédira K. Extending Moodle Functionalities with Ontology-based Competency Management. *Procedia Computer Science*, 2014, no. 35, pp. 570–579.
11. Rezgui K., Mhiri H., Ghédira K. An Ontology-Based Approach to Competency Modeling and Management in Learning Networks. *Agent and Multi-Agent Systems: Technologies and Applications*, 2014, no. 296, pp. 257–266.

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, имеющихся в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 681.51

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.19

РЕЗУЛЬТАТИВНОСТЬ И КАЧЕСТВО ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ СИТУАЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ АВИАТРАНСПОРТА

С. В. Мичурин^а, канд. техн. наук, доцент

Я. А. Ивакин^{а, б}, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: активный рост интенсификации транспортных потоков и опережающий рост потребности в автоматизации диспетчерских пунктов приводят к эмпирическому характеру внедрения принципов и средств ситуационного управления, используемых при построении автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов на авиатранспорте. Соответственно, существует необходимость разрешения объективного противоречия между потребностью в улучшении качества программных комплексов ситуационного управления пространственными процессами автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов на авиатранспорте на основе целостного научно-методологического аппарата и эмпирическим характером этого процесса в текущий момент. **Цель:** определение путей разрешения сформулированных противоречий между объективной потребностью в улучшении качества программных комплексов и эмпирическим характером процесса ситуационного управления. **Результаты:** сформулированы задачи повышения результативности программных комплексов ситуационного управления, что следует рассматривать как базовый фактор улучшения качества автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов на авиатранспорте. Этот факт диктуется значительным ростом интеллектуально-управленческой нагрузки на авиадиспетчеров. Пути повышения результативности могут выступать методы последовательного квалиметрического оценивания, анализа и совершенствования соответствующего программного обеспечения в процессе его разработки — от логико-математической постановки до внедрения в эксплуатацию. Новизна подхода состоит в том, что он позволяет развить известный методический аппарат совершенствования программных комплексов диспетчеризации путем обобщения квалиметрических методов на основе принципов ситуационного управления. Для решения поставленных задач разработана система требований к типовой архитектуре программных комплексов ситуационного управления пространственными процессами для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов авиатранспорта. **Практическая значимость:** предложенная системологическая постановка задачи разработки комплексного методологического аппарата позволяет значительно усовершенствовать процесс оценки и системного улучшения качества программных комплексов автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов. Это стало возможным за счет внедрения в практику их создания средств обеспечения рационализации усилий разработчиков соответствующего программного обеспечения, основанного на принципах ситуационного управления. Как следствие, это позволит добиться уменьшения трудозатрат на разработку указанных комплексов (среднего времени разработки программного модуля реализации типовой прикладной функции на 12–16 %).

Ключевые слова — ситуационное управление, результативность и качество управления пространственными процессами, геоинформационные системы.

Введение

Активное развитие сферы авиасообщений, интенсивности и плотности полетов, а также современных технологий и возможностей вычислительной техники предопределило внедрение в их состав средств и методов ситуационного управления. Одной из основных особенностей построения современных автоматизированных систем управления пространственными процессами на авиатранспорте является неуклонное возрастание числа задач, в которых принятие предметных решений в тех или иных видах ситуаций возлагается на средства прикладного программного обеспечения. Разработка программных комплексов (ПК) для автоматизированных систем диспетчеризации пространственных процессов (АСДПП)

на авиатранспорте в настоящее время представляет собой достаточно сложный и наукоемкий вид деятельности, связанный с необходимостью моделировать не только пространственные процессы как таковые, но и соответствующие подсистемы мониторинга, сопутствующие гидрометеорологические, физические и прочие процессы.

Актуальность разработки АСДПП на основе принципов ситуационного управления

Традиционная теория управления, основанная на теории автоматического регулирования, имеет дело с такими объектами, для которых процедура управления в самом общем виде представляется контуром управления: субъект управ-

ления, управляющее воздействие, объект управления, обратная связь. Однако сложные объекты управления, в качестве которых могут выступать слабо структурируемые организационно-технические или социальные системы, явления и их адекватные многоуровневые программные модели (в том числе и АСДПП на авиатранспорте), приводят к необходимости учета в ходе управления сотен параметров, тысячи фактов, огромного числа критериев и решающих правил. Это ведет к тому, что свести процедуру управления к контуре управления не получается, так как не представляется возможным описать все состояния объекта управления, ограничить число управляющих воздействий и показать их связь с обратной реакцией на управление.

Развитие объектно-ориентированного подхода к проектированию и созданию прикладного программного обеспечения дало возможность многократно усложнить программно-аналитические модели управляемых объектов, отказаться от их строгой детерминированности, придать им стохастический характер и значительно расширить их адаптивность. Номенклатура параметров, описывающих управляемый объект и окружающую его среду, увеличилась настолько, что возможности восприятия диспетчера в оперативной обработке информации перестали ей соответствовать [1]. Другими словами, диспетчер-оператор перестал быть способен оперативно анализировать и корректировать все параметры процесса, контролируемого и моделируемого программными средствами АСДПП, а значит, перестал быть способен адекватно управлять всей совокупностью

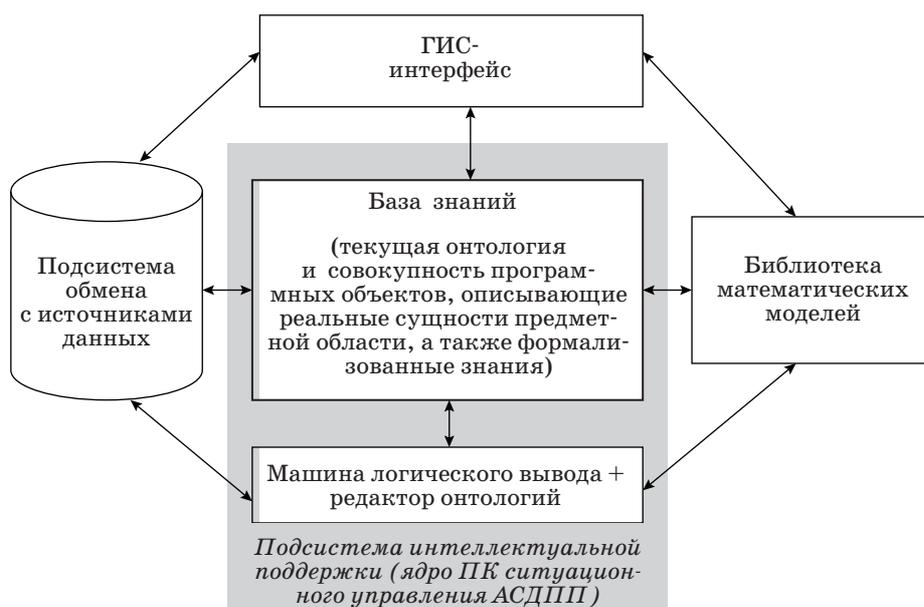
пространственных процессов [2–4]. Указанное противоречие было обострено фактом бурного роста объема авиационных перевозок на рубеже XX–XXI вв. Это явилось причиной начала разработки АСДПП на принципах ситуационного управления.

Ситуационное управление пространственными процессами

Программные комплексы ситуационного управления пространственными процессами для АСДПП на авиатранспорте представляют собой сложные комплексы программных средств и подсистем. Как правило, они в себя включают:

- 1) геоинформационную подсистему;
- 2) инструмент управления базами данных и редактирования онтологии;
- 3) сервер картографической информации;
- 4) подсистему интеллектуальной поддержки;
- 5) сервер администрирования;
- 6) подсистему обмена данными с взаимодействующими системами;
- 7) сервер объектов;
- 8) сервер гидрометеороинформации (гидрометеосервер);
- 9) совокупность программных моделей аналитической поддержки.

Структура взаимосвязей приведенного состава элементов ПК ситуационного управления пространственными процессами для АСДПП показана на рис. 1. Геоинформационные системы (ГИС) в сочетании с СУБД и подсистемами интеллектуальной поддержки являются основой



■ **Рис. 1.** Типовая архитектура ПК ситуационного управления пространственными процессами для АСДПП авиатранспортом

компьютерных инструментальных средств реализации информационных технологий (ИТ) для АСДПП. Эффективность использования ПК во многом зависит от организации процессов ввода-вывода, хранения, обработки разнородных данных, а также от эргономичности информационных моделей, отображаемых на видеомониторах, предъявляемых пользователю АСДПП. Одной из особенностей ПК ситуационного управления пространственными процессами для АСДПП является одновременное использование как картографических, так и некартографических данных, для обработки которых требуется применение принципиально различных методов.

Очевидно, что в рамках ПК ситуационного управления пространственными процессами для АСДПП должны осуществляться процедуры моделирования реальной пространственной ситуации на основе электронной карты. Информация, участвующая в моделировании пространственной ситуации, условно может быть разделена на реально существующую и отображаемую на электронной карте в явном виде и неявно существующую без ее графического представления.

Информационные технологии ПК для АСДПП на авиатранспорте, в ходе которых реализуются операции ввода-вывода, обработки, хранения и отображения геоинформации, можно разделить на базовые и прикладные [2, 5, 6]. Базовая ИТ представляется в виде инвариантной к предметной области совокупности средств преобразования первичной и вторичной картографической информации на этапах ее сбора, обработки, хранения, передачи и отображения.

В состав базовой ИТ для АСДПП обычно включают следующую последовательность операций:

- 1) сбор (получение, извлечение) первичных данных об активных объектах, действующих в рамках сложившейся пространственной ситуации;
- 2) первичная обработка данных об активных и пассивных географических объектах (сбор данных, их группировка, первичная классификация объектов, их растеризация и (или) векторизация);
- 3) построение моделей пространственных или атрибутивных данных;
- 4) хранение полученных данных о текущей пространственной ситуации;
- 5) транспортировка полученных данных по компьютерным сетям и (или) на физических носителях;
- 6) геоинформационный анализ и картографическое моделирование пространственной ситуации (вторичная обработка данных);
- 7) представление результатов анализа и моделирования;
- 8) верификация и коррекция результатов.

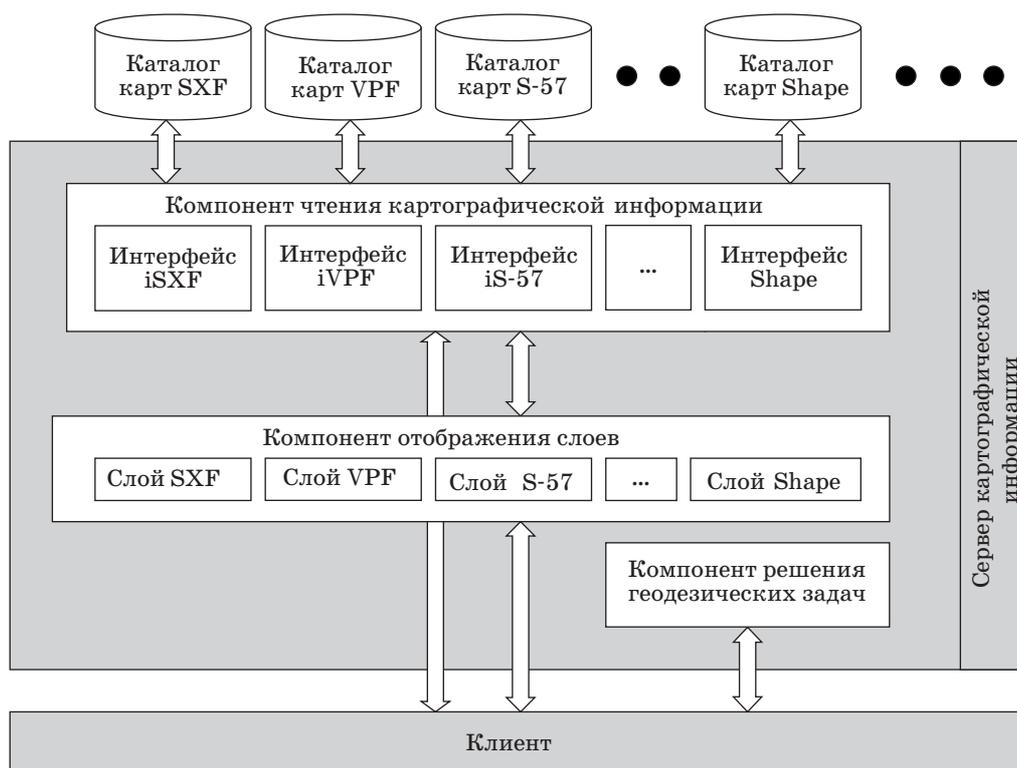
Эффективность извлечения и представления оператору АСДПП результатов вторичной об-

работки существенно зависит от совершенства описания предметной области, в которой функционирует ПК, на концептуальном, логическом и физическом уровнях с учетом специфики географических данных. Иными словами, эффективность обработки вторичной информации в результате реализации ИТ прямо определяется качеством онтологии предметной области, к которой относится некоторый класс пространственных ситуаций. Онтология — это система понятий, характеризующих предметную область, и отношений между ними.

Прикладные ИТ ПК для АСДПП являются инструментальным средством, обеспечивающим для описания географического объекта два различных вида информации, имеющих пространственный и описательный характер. В зависимости от своего назначения прикладная ИТ для ПК ситуационного управления в АСДПП может быть направлена на обработку либо пространственной, либо описательной информации. В последнее время исследуются возможности интеграции этих двух видов информации и создания интегрированных прикладных ИТ. В основу разработки как базовых, так и прикладных ИТ ПК АСДПП должны быть поставлены адекватные онтологии описания предметных областей их применения.

Реализация базовых и прикладных геоинформационных технологий (ГИТ) осуществляется в рамках соответствующих ГИС, которые являются программными комплексами, обеспечивающими сбор, обработку, хранение и визуализацию различной картографической информации для ее анализа, оценки и моделирования. При этом необходимо отметить, что собственно ГИС реализует базовые ГИТ, а прикладные ГИТ обеспечивают функционирование систем геоинформационной поддержки принятия решений при управлении (диспетчеризации) пространственными процессами. Названные системы поддержки принятия решений могут быть как встроены в ГИС, так и сопрягаться с ГИС в интересах решения задач диспетчеризации пространственных процессов. Структура типовой ГИС в составе ПК АСДПП ситуационного управления на авиатранспорте представлена на рис. 2.

В ходе первичной обработки поступившие на вход ГИС разнородные данные корректируются и частично унифицируются, в результате чего формируется унифицированное подмножество данных, часть которых хранится в виде архивов. Первичная обработка связана с решением задач распознавания, структуризации, декомпозиции, компоновки, изменения, сжатия, контроля и унификации. Вторичная обработка данных включает анализ унифицированной информации, установление связи между частями модели пространственной ситуации, устранение избы-



■ **Рис. 2.** Структура типовой ГИС в составе ПК для АСДПП

точности за счет исключения irrelevantной информации, определение первичных и внешних ключей, формирование метаданных.

Инструментальные средства ГИТ, реализуемые в рамках современных ГИС, базируются на традиционных ГИС-технологиях и на технологиях обработки данных радиолокационного освещения обстановки и дистанционного зондирования. В настоящее время созданы предпосылки для объединения названных технологий (ERDAS, Imagine, ER-Mapper, EASI/PASE). Практическая реализация промышленно выпускаемых (серийных) ГИС для нужд диспетчеризации осуществляется на всех компьютерных платформах от ПЭВМ, обычно совместимых с IBM PC или Macintosh, до суперсерверов и почти для любых операционных систем. К настоящему времени для специализированных ГИТ разработано несколько тысяч ГИС-пакетов, а для ГИС общего назначения — не более 20, которые ориентированы на рабочие станции с операционной системой UNIX [5, 6].

С помощью перечисленных инструментальных средств реализуется функциональность представления пространственно-географических данных. Кроме пространственных данных диспетчеру в АСДПП предоставляются и описательные (атрибутивные) данные, ассоциированные с географическими объектами пространственной

ситуации. Набор атрибутов для каждого географического объекта хранится в файле данных (атрибутивной таблице). При этом пространственный объект и относящаяся к нему запись в таблице связываются по уникальному идентификатору, образуя соединение типа «один — один».

Эффективность эксплуатации ПК АСДПП с точки зрения возможностей анализа пользователем пространственных ситуаций во многом определяется степенью интеграции пространственных и атрибутивных данных. ПК с использованием растровых ГИС имеют столь простую организацию, что сама модель данных (онтология) дает относительно полное описание предметной области и не требует специальных приемов по интеграции пространственных и атрибутивных данных на концептуальном, логическом и физическом уровнях. Прикладное программное обеспечение с использованием векторных ГИС требует специальной организации пространственных и атрибутивных данных на концептуальном, логическом и физическом уровнях. При этом используют три вида моделей данных: геоинформационную, интегрированную и объектно-ориентированную. В геоинформационной модели пространственная и атрибутивная части организованы самостоятельно, а связи между ними устанавливаются и программно поддерживаются

через идентификатор объекта. Интегрированная модель предусматривает использование средств СУБД для хранения пространственной и атрибутивной компонент. Объектно-ориентированная модель включает язык пространственных запросов и требует объектно-ориентированного доступа как к базам данных, так и к выполняемым операциям обработки данных.

В состав подсистем типовой архитектуры ПК АСДПП (см. рис. 1) входит набор базовых средств, обеспечивающих реализацию следующих групп функций: выполнение арифметических и геометрических операций, сетевой анализ, анализ наложений, выделение географических объектов в новый слой картографической модели и операции работы с полями баз данных. Перечисленные группы функций позволяют диспетчеру осуществлять анализ сложившейся пространственной ситуации. Процедуры анализа пространственных ситуаций, как правило, предшествуют процедурам выработки вариантов решений по поведению активных объектов, являющихся элементами пространственной ситуации. В качестве основного базового средства в существующем ПК АСДПП, обеспечивающего автоматизированную генерацию конкурирующих вариантов решений, обычно рассматривают картографическое моделирование. Это процесс использования комбинаций запросов (команд) пользователя и ответов на вопрос о параметрах пространственной ситуации, особенно о тех, которые угрожают безопасности перемещения активных объектов. Математическая сложность как постановки, так и решения задачи обеспечения безопасности (безаварийности) активных объектов в конкретной пространственной ситуации в большинстве случаев приводит к приближенным решениям в ходе диспетчеризации пространственных процессов, даже при использовании современных вычислительных средств. Картографические модели в ПК ситуационного управления АСДПП позволяют:

1) иллюстрировать (описывать) сложившуюся пространственную ситуацию выделением некоторых объектов или параметров и показом результатов в виде, позволяющем пользователю в целом охватить эти объекты (параметры) и установить их взаимосвязи;

2) прогнозировать пользователю развитие пространственной ситуации, определять факторы, влияющие на это развитие, и устанавливать функциональную и пространственную связь между этими факторами.

Как описательные, так и прогнозные картографические модели разрабатываются на основе:

— индуктивного метода — движение от состояния конкретных элементов пространственной ситуации к общему утверждению о ее развитии,

особенно с позиций безопасности действующих в ее рамках активных объектов;

— дедуктивного метода — движение от цели развития пространственной ситуации (безопасности) к отдельным фактам поведения конкретных активных объектов.

На основе указанных методов разрабатывается и отлаживается картографическая модель, а затем начинается этап ее верификации, т. е. проверка адекватности модели реальным процессам, протекающим в конкретной пространственной ситуации. При этом необходимо получить ответы на три вопроса:

1. Действительно ли используемые в модели данные отражают суть моделируемой пространственной ситуации? Основной проблемой при этом является выявление переменных и проверка их на полноту. Чаще всего выявляется ряд недостающих переменных, которые из-за своей недоступности должны быть из модели исключены. Ряд переменных может не иметь ясной трактовки или они могут быть плохо определены для их использования.

2. Корректно ли определено поле значимых факторов модели для представления их реального взаимодействия и правильно ли описывается процесс принятия решений?

3. Является ли конечный результат картографического моделирования приемлемым для диспетчера АСДПП в качестве средства для принятия решений в данной пространственной ситуации? Особенно важным при ответе на этот вопрос является представление выходной информации, поскольку неадекватная картографическая форма может привести к ошибочным выводам диспетчера.

На основании вышесказанного можно сделать следующие основные выводы.

1. В настоящее время проектируется и разрабатывается ПК ситуационного управления пространственными процессами на авиатранспорте для АСДПП, реализующие базовые ГИТ. В ходе функционирования таких ПК и реализации ГИТ используются следующие виды информации, участвующие в картографическом моделировании пространственных ситуаций на земле, на воде и в воздухе: о географических объектах, метрическая, пространственная и описательная (атрибутивная).

2. В типовую структуру ПК ситуационного управления пространственными процессами на авиатранспорте для АСДПП входит ряд подсистем, основными из которых являются подсистемы первичной и вторичной обработки картографических и пространственных данных, их визуализации в интересах пользователя. ГИТ реализуется с использованием комплекса инструментальных средств, базирующихся на всех

компьютерных платформах от ПЭВМ до рабочих станций почти для всех операционных систем.

3. В состав ПК ситуационного управления пространственными процессами на авиатранспорте для АСДПП также входит набор базовых средств, обеспечивающих выполнение ряда групп функций: выполнение арифметических и геометрических операций, сетевой анализ, анализ положений, выделение объектов пространственной ситуации в новый слой и операции работы с полями баз данных. Перечисленные функции позволяют диспетчеру проводить анализ пространственной ситуации, который предшествует процедурам принятия управленческих решений.

4. В ходе создания ПК ситуационного управления пространственными процессами на авиатранспорте для АСДПП разрабатываются и отлаживаются картографические модели, которые позволяют иллюстрировать пользователю сложившиеся пространственные ситуации, осуществлять анализ ситуаций и принятие управленческих решений. Одной из главных задач при разработке картографических моделей является их квалиметрический анализ и верификация.

Заключение

Одним из направлений повышения эффективности эксплуатации промышленно производимого программного обеспечения для АСДПП на авиатранспорте является разработка и внедрение

в процесс его проектирования методов и средств оценки и контроля качества. В этой связи особый статус приобретают возможности методов, моделей и методик оценки качества и результативности ПК автоматизированных систем ситуационного управления пространственными процессами на авиатранспорте, применяемых в вышеописанных АСДПП.

Единой, взаимосвязанной квалиметрической теории результативности ситуационного управления пространственными процессами и улучшения качества соответствующих программных комплексов не существует. Научно-методологические основы столь сложного процесса как улучшение качества программных комплексов АСДПП строго не структурированы и формируются по междисциплинарному принципу, во многом носят не системный характер. Именно этим определяется эмпирический путь развития многих современных прикладных программно-информационных технологий ситуационного управления пространственными процессами. Повышение результативности ситуационного управления сегодня следует рассматривать как базовый фактор улучшения качества программных комплексов АСДПП, что диктуется значительным ростом интеллектуально-управленческой нагрузки на диспетчеров. Такого повышения можно добиться методами последовательного квалиметрического оценивания, анализа и совершенствования соответствующего программного обеспечения в процессе его разработки.

Литература

1. Ивакин Я. А., Мичурин С. В., Смирнова М. С. Автоматизированные системы ситуационного управления и диспетчеризации пространственных процессов на авиатранспорте // Радиопромышленность. 2015. № 4. С. 56–64.
2. Jiang B. A Shot Note on Data-Intensive Geospatial Computing // Proc. Intern. Workshop Information Fusion and Geographic Information Systems: Towards the Digital Ocean, Brest, France, May 10–11, 2011. P. 12–17.
3. Thill J.-C. Is Spatial Really That Special? A Tale of Spaces // Proc. Intern. Workshop Information Fusion and Geographic Information Systems: Towards the Digital Ocean, Brest, France, May 10–11, 2011. P. 3–12.
4. Renteria-Agualimpia W., Levashkin S. Multi-criteria Geographic Information Retrieval Model Based on Geospatial Semantic Integration // Proc. 4th Intern. Conf. GeoSpatial Semantics, Brest, France, May 12–13, 2011. P. 166–181.
5. Smirnov A., Ponomarev A. Crowd Computing Framework for Geoinformation Tasks // Proc. Intern. Workshop Information Fusion and Geographic Information Systems: Deep Virtualization for Mobile GIS, Grenoble, France, May 18–20, 2015. P. 109–125.
6. Basma H. A. Semantic Trajectories: A Survey from Modeling to Application // Proc. Intern. Workshop Information Fusion and Geographic Information Systems: Deep Virtualization for Mobile GIS, Grenoble, France, May 18–20, 2015. P. 59–77.

UDC 681.51

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.19

The Effectiveness and Quality of Situational Management Software for Automated Dispatching of Air Transport Spatial ProcessesMichurin S. V.^a, PhD, Tech., Associate Professor, michurin@aanet.ruIvakin Ya. A.^{a,b}, Dr. Sc., Tech., Professor, ivakin@oogis.ru^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The growing intensification of traffic flows and the faster growth of the demand for automation of control centers lead to the empirical nature of the implementation of the principles and situational management tools used in the construction of automated dispatching systems for spatial processes in air transport. Therefore, we have to resolve the objective contradiction between the need to improve the quality of the situational management software on the base of a holistic scientific and methodological approach, and the empirical nature of this process at the moment. **Purpose:** The goal is to identify the ways to resolve the formulated contradiction between the objective need to improve the software quality and the empirical nature of the situational management process. **Results:** We have formulated the problems of increasing the effectiveness of situational management software systems. This should be considered a basic factor in improving the quality of automated dispatching systems for spatial processes in air transport. This fact is determined by the significant growth of the intellectual and administrative load on the air traffic controllers. The ways to improve the effectiveness are the methods of consistent qualimetric evaluation, analysis and upgrading of the software during its development, starting from the logical-mathematical formulation down to the usage. The novelty of our approach is that it allows you to build up the available methodological tools for the improvement of scheduling software systems by compiling qualimetric methods of enhancing their effectiveness, including all the components, on the base of the principles of situational management. We have developed a system of requirements for a typical architecture of software systems of situational management of spatial processes for automated air transport dispatching systems. **Practical relevance:** The proposed systemological formulation of the problem of developing integrated methodological tools can significantly improve the process of assessing and raising the quality of software for automated systems of spatial process dispatching. It became possible due to the introduction of the instruments which rationalize the efforts of the software developers on the base of situational management. As a consequence, this will lead to the reduction of the labor costs for the development of this software (average design time for a software module implementing a sample application function is reduced by 12-16%).

Keywords — Situational Management, Effectiveness and Quality of Spatial Process Management, Geoinformation Systems.

References

1. Ivakin Ya. A., Michurin S. V., Smirnova M. S. Automated Systems for Situational Management and Dispatching of Air Transport Spatial Processes. *Radiopromyshlennost'*, 2015, no. 4, pp. 56–64 (In Russian).
2. Bin Jiang. A Shot Note on Data-Intensive Geospatial Computing. *Proc. Intern. Workshop Information Fusion and Geographic Information Systems: Towards the Digital Ocean*, Brest, France, May 10–11, 2011, pp. 12–17.
3. Thill J.-C. Is Spatial Really That Special? A Tale of Spaces. *Proc. Intern. Workshop Information Fusion and Geographic Information Systems: Towards the Digital Ocean*, Brest, France, May 10–11, 2011, pp. 3–12.
4. Renterial-Agualimpia W., Levashkin S. Multi-criteria Geographic Information Retrieval Model Based on Geospatial Semantic Integration. *Proc. 4th Intern. Conf. GeoSpatial Semantics*, Brest, France, May 12–13, 2011, pp. 166–181.
5. Smirnov A. and Ponomarev A. Crowd Computing Framework for Geoinformation Tasks. *Proc. Intern. Workshop Information Fusion and Geographic Information Systems: Deep Virtualization for Mobile GIS*, Grenoble, France, May 18–20, 2015, pp. 109–125.
6. Basma H. A. Semantic Trajectories: A Survey from Modeling to Application. *Proc. Intern. Workshop Information Fusion and Geographic Information Systems: Deep Virtualization for Mobile GIS*, Grenoble, France, May 18–20, 2015, pp. 59–77.

МАТРИЧНЫЕ МОДЕЛИ ОБОБЩЕННОЙ КРИСТАЛЛОГРАФИИ

Н. А. Балонин^а, доктор техн. наук, профессор

М. Б. Сергеев^а, доктор техн. наук, профессор

В. С. Суздаль^б, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бХарьковский институт сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, Украина

Цель: формирование общих подходов к получению матричных моделей обобщенной кристаллографии. **Результаты:** подтверждена гипотеза о том, что каждому квазикристаллу отвечает ассоциированная с ним квазиортогональная матрица. Квазикристаллу Д. Шехтмана соответствует матрица золотого сечения. Сделан вывод, что для упорядоченных структур, состоящих из двух бесконечно повторяющихся фрагментов, моделью, отражающей детали строения, может являться модульно двухуровневая матрица золотого сечения. **Практическая значимость:** определены перспективы дальнейших исследований: и материалы, и матрицы в состоянии имеют еще и другие виды, причем матрицы могут привлекаться для предсказания существования и затем — для анализа материалов. Разработано соответствующее программное обеспечение для математической сети Интернет.

Ключевые слова — кристаллические структуры, квазикристаллы, ортогональные матрицы, золотое сечение, матрица золотого сечения, матрицы Белевича, матрицы Мерсенна, динамические системы, странный аттрактор.

Введение

Наука соткана из открытий, и особое значение в ней имеют те, которые затрагивают основы устоявшихся представлений. Так, математическое сообщество Древней Греции было потрясено открытием несоизмеримых величин, которое пришло в противоречие с пифагорейской теорией целых чисел. Учение о целочисленной основе всего сущего перестало быть истинным. Осенью 1772 года эксперименты А. Лавуазье по сжиганию фосфора и серы в герметически запаянных сосудах привели к ниспровержению господствовавшей тогда теории флогистона и к замене ее кислородной теорией горения и прокаливания. С этого момента, в рамках «химической революции», началось формирование новых представлений об агрегатных состояниях вещества. Закон сохранения массы обрел химический смысл закона сохранения элементов.

В число выдающихся научных открытий следует включить и результаты работы израильского физика Д. Шехтмана из Национального бюро стандартов США, сообщившего в декабре 1984 года о получении кристаллоподобного сплава $Al_{86}Mn_{14}$ с необычными свойствами и удостоенного за свои работы Нобелевской премии 2011 года [1]. С этого момента стало бурно развиваться новое направление физики конденсированного состояния — область квазикристаллографических структур, принципиально отличающаяся от области не только кристаллов, но и аморфных тел и жидкостей.

Это направление мы намерены рассмотреть в статье подробнее с указанием математических моделей квазикристаллов.

Симметрии кристаллов

Согласно традиционным представлениям, структура твердого вещества, находящегося в кристаллическом состоянии, характеризуется двумя важнейшими особенностями — упорядоченностью и периодичностью. В кристаллах естественные плоские грани и ровные ребра отражают их внутреннюю структуру, являются внешним выражением упорядоченного расположения ионов, атомов, молекул или их групп, входящих в химическую формулу кристалла. Эти упорядоченные структурные частицы, расположенные правильными рядами в строгой иерархической последовательности, определяют пространственную кристаллическую решетку. Для строгого описания кристаллической решетки, которая, вообще говоря, представляет собой математическую абстракцию, выработана особая терминология. Среди ее терминов самым фундаментальным понятием является симметрия.

Знаменитый минералог и математик Евграф Степанович Федоров произвел строгий вывод всех возможных пространственных групп, тем самым описал симметрии всего разнообразия кристаллических структур. В 1918 году немецкий математик Нетер доказала теорему, согласно которой каждой непрерывной симметрии физической системы соответствует некоторый закон сохранения, включая закон сохранения энергии.

Известны две специфические операции симметрии — трансляционная (переносная) и поворотная (вращательная). Трансляционная симметрия — повторяемость объекта в пространстве через определенное расстояние вдоль прямой,

называемой осью трансляции. Кристаллическая решетка строится путем периодической трансляции частиц вдоль осей переноса (координатных осей). При трансляционном перемещении частицы вдоль трех осей переноса образуется трехмерная решетка. В общем случае векторы трансляции образуют между собой неперпендикулярные и неравные углы. Периоды трансляции по разным направлениям также могут отличаться друг от друга.

Поворотная симметрия — свойство кристалла совмещаться с самим собой при вращении на некоторый определенный угол вокруг оси симметрии.

Трансляционная и поворотная симметрии не всегда уживаются одна с другой. При наличии трансляционной симметрии возможны только оси симметрии, отвечающие поворотам на 180, 120, 90 и 60°. Эти оси обозначают символами 2, 3, 4 и 6. Строго математически доказано, что отмеченные порядки осей в том или ином сочетании для кристаллов единственно возможны. Других порядков осей симметрии, поворот вокруг которых переводил бы решетку кристалла саму в себя, в классической кристаллографии не существует.

Дальний порядок в квазикристаллах

Трансляционная и поворотная симметрии порождают, в свою очередь, важное понятие дальнего порядка, который бывает двух типов — дальний трансляционный порядок и дальний ориентационный порядок.

Полученный Д. Шехтманом металлический сплав $Al_{86}Mn_{14}$ создавался быстрым охлаждением расплава. Электронограмма полученного образца показывала резкие регулярные максимумы, обладавшие поворотной симметрией 5-го порядка. Обнаруженная структура казалась парадоксальной. Наличие резких дифракционных максимумов свидетельствовало об упорядоченном расположении атомов в структуре, характерной для кристаллов, а наличие наблюдавшейся оси симметрии 5-го порядка противоречило фундаментальным представлениям классической кристаллографии и говорило о том, что исследуемое вещество не кристалл.

Квазикристаллы, открытые Шехтманом, упорядочены, но не периодичны, т. е. у них отсутствует трансляционная симметрия. В квазикристаллах очень причудливое заполнение пространства, на самом деле там два или три типа элементарных ячеек, которые причудливым образом друг с другом комбинируются, не производя трансляционной периодичности. Тем не менее структура обладает дальним порядком. Дифракционная картина, т. е. рассеяние рентгеновского луча структурой квазикристалла, будет

состоять из четких, острых, строго определенно расположенных пятен. Точно так же, как в случае кристалла. К настоящему времени обнаружено и синтезировано множество аналогичных структур, состоящих, как правило, из атомов металлов и (иногда) кремния. Каждый год появляются сообщения и о новых по составу квазикристаллах, и о новых вариантах структур, существование которых ранее нельзя было даже предположить. В большинстве синтезированных квазикристаллов обнаружены оси симметрии 5-, 7-, 8-, 10-, 12-го и еще более высоких порядков, запрещенные для идеальных кристаллов.

Итак, открыто новое состояние вещества, обладающее дальним порядком, а также элементами симметрии, запрещенными для кристаллов. Это состояние было названо квазикристаллическим, и оно найдено для нескольких сот веществ, и во всех случаях это металлические сплавы, а также коллоидные системы. Вы никогда не увидите квазикристаллы из известных ныне, скажем, в ионном веществе типа хлорида натрия. В оксидах, сульфидах, сульфатах и так далее нет таких квазикристаллов. Это всегда металлические сплавы, очень часто на основе алюминия. Еще одна особенность квазикристаллов: их химические формулы крайне странные. Например, $Al_{86}Mn_{14}$, т. е. это не $AlMn$, не $AlMn_2$, а очень странные, диковинные пропорции химических элементов.

Как понять существование, как описать структуру такого рода веществ? В книге физика-теоретика из Оксфордского университета Р. Пенроуза «Новый ум короля» говорится, что процесс роста квазикристаллов обусловлен нелокальным механизмом, когда наращиваются сразу целые группы частиц, которые как бы заранее договариваются подойти к поверхности в нужный момент времени. «Наличие такого свойства, — пишет автор, — одна из причин серьезных разногласий, возникающих сегодня в связи с вопросом о квазикристаллических структурах и их выращивании, так что было бы неразумно пытаться делать окончательные выводы до тех пор, пока не будут разрешены некоторые основополагающие вопросы» [3].

Математические подходы к описанию квазикристаллов

Сегодня понятно, что описать структуру квазикристаллов можно двумя разными способами. Первый — это мозаики Пенроуза, которые являются классическим примером двумерного квазикристалла [4], второй — это многомерное описание [5].

Предварительно рассмотрим одномерную идеализированную модель. Пусть в равновесном

состоянии частицы квазикристалла расположены вдоль оси переноса z и образуют линейную цепочку с переменным периодом, изменяющимся по закону геометрической прогрессии:

$$a_n = a_1 D^{n-1},$$

где a_1 — начальный период между частицами; n — порядковый номер периода, $n=1, 2, \dots$; $D = (1 + \sqrt{5})/2 = 1,6180339\dots$ — иррациональное число золотой пропорции.

Построенная цепочка частиц служит примером одномерного квазикристалла с дальним порядком симметрии. Структура абсолютно упорядочена, наблюдается систематичность в расположении частиц на оси — их координаты определяются одним законом. Вместе с тем нет повторяемости — периоды между частицами различны и все время возрастают. Поэтому полученная одномерная структура не обладает трансляционной симметрией, и вызвано это не хаотическим расположением частиц (как в аморфных структурах), а иррациональным отношением двух соседних периодов.

Логическим продолжением рассмотренной выше одномерной структуры квазикристалла служит двумерная структура, которую можно описать методом построения непериодических мозаик (узоров), состоящих из двух различных элементов, двух элементарных ячеек — утолщенного и утонченного ромбов строго определенных пропорций, да не просто пропорций, а пропорций «золотого сечения» или $1,618\dots$. Такую мозаику разработал в 1974 году Пенроуз [2]. На основе его мозаики с двумя «элементарными ячейками», соединенными друг с другом по определенным правилам стыковки, может быть создана модель квазикристалла. Эти специальные правила намного сложнее, чем примитивное транслирование одинаковых ячеек в классических кристаллах. Модель Пенроуза хорошо описывает некоторые основные свойства квазикристаллов, но недостаточно объясняет реальные процессы их атомного роста, носящие явно нелокальный характер. Например, трудно понять, как мозаика может отражать устойчивость процесса получения квазикристалла.

Многомерный подход (higher-dimensional approach) базируется на информации о распределении интенсивности в обратном пространстве, т. е. он применим непосредственно для описания экспериментальных дифракционных данных. Он основан на том, что с математической точки зрения построение аперидической функции может быть сведено к сумме гармонических функций с числом линейно независимых волновых векторов, большим, чем размерность реального пространства. Квазипериодические функции в s -мерном пространстве можно рассматривать

как иррациональные сечения n -мерных периодических функций ($n > s$), где n определяет минимальную размерность пространства вложения, а s — размерность собственно квазикристалла.

Структурный фактор квазикристалла в многомерном подходе рассчитывается на основе распределения гиператомов в элементарной ячейке n -мерной решетки. Метод позволил провести классификацию возможных точечных групп симметрии аксиальных квазикристаллов, установить размерность пространства вложения и соответствующие n -мерные пространственные группы для каждого случая [6, 7].

Неожиданное появление золотой пропорции в структуре квазикристаллов говорит о присутствии в их симметрии живого «мотива», так как в отличие от искусственных кристаллов только живой мир допускает замечательные соотношения золотой пропорции. Запрещенные в кристаллографии симметрии 5-го, 7-го и других порядков являются самыми распространенными в живой природе. Поворотная симметрия 5-го порядка (угол 72°) наиболее эффективно представлена в мире растений и в простейших живых организмах, в частности в отдельных разновидностях вирусов и организмах некоторых обитателей морей (морских звезд, морских ежей, колоний зеленых водорослей, радиолярий и др.). Цветки многих растений обладают поворотной симметрией 5-го порядка, которая до последнего времени не наблюдалась в неживой природе. Чешуйки у еловой шишки, зерна у подсолнуха или ячейки у ананаса также образуют некоторое квазирегулярное покрытие поверхности, в котором соседние ячейки организуются в хорошо различимые спирали.

Как видим, поворотная симметрия 5-го порядка, играющая важную роль в квазикристаллах, наиболее ярко проявляется как бы в переходной области между статично неживым и гибким живым миром природы. И вот здесь-то напрашивается мысль о том, что внутреннее строение квазикристаллов служит своеобразным началом движения от застывших кристаллических форм к подвижным живым структурам. Другими словами, квазикристаллы можно рассматривать как переходную форму от устойчивых и предсказуемых трансляционных конструкций, несущих малый объем информации, к подвижности, к свободному движению, к более информационно насыщенным структурам.

Как отмечает Д. Гратиа в статье «Квазикристаллы», понятие квазикристалла представляет фундаментальный интерес, потому что оно обобщает и завершает определение кристалла. Теория, основанная на этом понятии, заменяет извечную идею о «структурной единице, повторяемой в пространстве строго периодическим образом» ключевым понятием дальнего поряд-

ка. Это понятие привело к расширению кристаллографии, вновь открытые богатства которой мы только начинаем изучать. Его значение в мире минералов можно поставить в один ряд с добавлением понятия иррациональных чисел к рациональным в математике [8]. Таким образом, сегодня в кристаллографии активно формируется непротиворечивый переход от кристаллических структур, описываемых традиционной кристаллографией, к квазикристаллическим, подчиняющимся определенным математическим законам в рамках своеобразной обобщенной кристаллографии. В обобщенном определении кристалла вместо элементарной ячейки, повторяющейся в пространстве строго периодически образом, ключевым понятием становится дальний порядок. Локальная структура определяется уже не только ближайшими соседями, но и более удаленными частицами. Исходя из вышесказанного следует отметить, что в рамках формирующейся обобщенной кристаллографии интересные результаты могут дать информационно-емкие матричные модели.

Матричные модели

Предварительно приведем ряд определений из области матричного исчисления.

Определение 1. Значения, которым равны элементы матрицы, будем называть ее уровнями. Так, матрица Адамара с элементами $\{1, -1\}$ имеет два уровня (двухуровневая), а матрица Белевича с элементами $\{0, 1, -1\}$ — трехуровневая.

Определение 2. Будем называть квазиортогональной квадратную матрицу A порядка n с приведенными к единице максимумом абсолютных значений ее элементов, удовлетворяющую квадратичному условию связи

$$A^T A = \omega I,$$

где I — единичная матрица; ω — вес матрицы.

Вообще говоря, квазиортогональными в широком смысле этого слова можно было бы назвать любые ортогональные по столбцам (и строкам) матрицы. В таком случае они включили бы в себя ортогональные матрицы с весом $\omega=1$ и максимальным по модулю элементом $m < 1$. Однако в данном случае нас интересуют матрицы, экстремальные по детерминанту при ограничении на значения ее элементов, — они должны быть не большими 1. Очевидно, что элементарным умножением на $1/m$ любая ортогональная матрица с детерминантом, равным 1, сводится к квазиортогональной, причем ее детерминант увеличивается в $1/m^n$ раз.

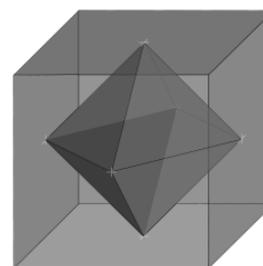
Дальнейшее увеличение детерминанта масштабированием невозможно, поскольку это сделает элементы матрицы большими 1. Из $\det(A)^2 = \omega^n$ и $|\det(A)| = 1/m^n$ следует, что $\omega = 1/m^2$.

Геометрическая интерпретация детерминанта матрицы связана с объемом тела, построенного на вектор-столбцах матрицы. Отсюда лежит прямой путь к формулировкам задач о плотной упаковке. Например, в трехмерном случае три ортогональных между собой единичных по длине вектор-столбца ортогональной матрицы представляют собой оси, ведущие к вершинам октаэдра (они задают его положение). Допустим теперь, что октаэдр находится в кубе с координатами вершин, равными 1 или -1 .

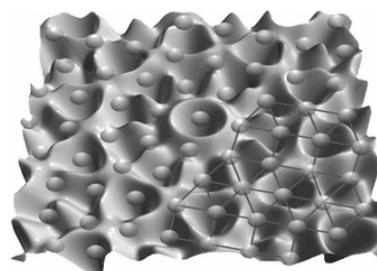
Очевидно, что показанное на рис. 1 положение октаэдра не оптимально с точки зрения его объема. Наклоняя октаэдр, мы лишаем его соприкосновения со стенками ограничения и, соответственно, можем увеличить его объем масштабированием. Вопрос заключается в том, каково оптимальное положение увеличиваемого октаэдра, при котором его объем невозможно увеличить уже никакими поворотами? Эта чисто геометрическая задача эквивалентна также поиску оптимального положения противотанкового ежа, для которого возможно построить минимальный сарай. То есть одна и та же геометрическая фигура может занимать больший или меньший объем — все зависит от ее положения.

Теперь вспомним, что объем октаэдра равен детерминанту квазиортогональной матрицы. Отсюда следует вывод, что экстремальные квазиортогональные матрицы описывают точные решения задач о плотной упаковке.

К задачам о плотной упаковке относятся также физические задачи размещения микрочастиц в ячейках силового поля (рис. 2). Примером



■ Рис. 1. Октаэдр в кубе



■ Рис. 2. Микрочастицы в ячейках поля

являются положения намагниченных стрелок в магнитном поле. Стрелки стремятся занимать не любое, а некоторое компактное с точки зрения ориентации их вдоль силовых линий положение.

Геометрические, физические и абстрактные математические модели типа октаэдра в стесненном пространстве могут иметь между собой весьма мало общего. Однако вспомним, что таблица химических элементов Менделеева построена по принципу, которому подчиняются и квазиортогональные матрицы. В частности, хорошо известный период таблицы соотносится с кратностью четырем порядкам матриц Адамара — квазиортогональных матриц с элементами 1 и -1 .

С ростом порядка n экстремальные матрицы ведут себя достаточно экзотично. В частности, если порядок матрицы не кратен четырем, то значений 1 и -1 достигает только часть элементов. Остальные элементы не равны столь большим по амплитуде значениям, но они равны между собой. Иными словами, экстремальные квазиортогональные матрицы — малоуровневые.

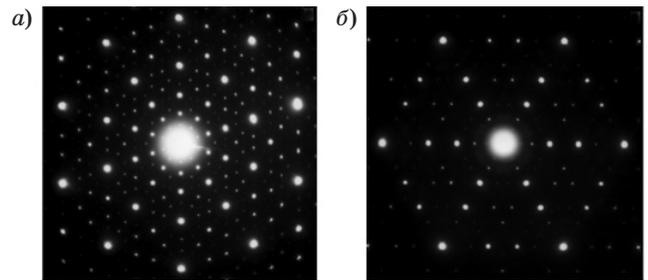
Максимальный элемент m связанной с ними ортогональной матрицы, той матрицы, из которой они получаются масштабированием, называется их m -нормой. Параметр m -норма экстремальных решений минимален. В самом деле, $|\det(\mathbf{A})|=1/m^n$, чем меньше значение m , тем выше детерминант. Следовательно, им соответствуют минимаксные матрицы — ортогональные матрицы заданного порядка с минимальным максимальным по модулю элементом.

В 2013 году авторы статьи выдвинули гипотезу: каждому квазикристаллу отвечает ассоциированная с ним квазиортогональная матрица, квазикристаллу Д. Шехтмана отвечает матрица золотого сечения [9]. Какие есть на то основания?

С ростом нечетного порядка n число уровней матриц линейно растет, напоминая бифуркацию (расщепление уровней) в хаотических задачах. Есть и критический порядок — 13, на котором число уровней растет уже взрывным образом. Казалось бы, на этом особенно экстремальных задач заканчиваются. Но тут мы подходим к центральной точке нашего исследования. Как известно, экстремумы бывают двух типов — глобальные (абсолютные) и локальные (относительные).

Оказывается, что матрицы локального максимума детерминанта — не с самым большим значением детерминанта, но все же экстремальным — остаются малоуровневыми. Более того, часто такие матрицы являются двухуровневыми матрицами со значениями элементов 1 и $-b$ [10].

Почему это так важно? Потому, что неперIODическая мозаика Пенроуза как модель квазикристалла Шехтмана — двумерная модель. Между тем физическая задача — это задача трехмерная. На рис. 3, *a* приведена дифракция от квазикри-



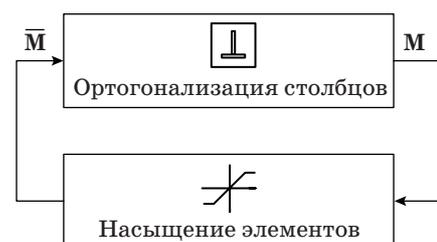
■ Рис. 3. Дифракции квазикристалла Шехтмана (*a*) и обычного кристалла (*b*)

сталла вдоль оси симметрии 5-го порядка, а на рис. 3, *b* — привычная дифракция от кристалла с разрешенной симметрией 6-го порядка.

Теперь представим себе, что существует квазиортогональная матрица порядка 10 с элементами 1 и $-b$, $b=0,618\dots$ — одно из чисел золотого сечения. Во-первых, такого типа матрицы ранее никогда не сопоставляли с квазикристаллами, во-вторых, едва ли значение ее уровня случайно.

Перед нами новая десятимерная абстрактная математическая модель квазикристалла Шехтмана, и, что важно подчеркнуть, модель не статическая, как модель Пенроуза. Матрицы локального максимума детерминанта — естественный продукт рекурсивных оптимизационных процедур, точно так же, как квазикристалл — продукт «итераций» сходного, но физического характера. Кроме тождества (в некоторых, разумеется, чертах) результирующих объектов существует и тождество в поведении приводящих к результату процедур.

Квазикристаллы — продукт весьма экстремальных условий, их получают сверхбыстрым охлаждением. Квазиортогональная матрица золотого сечения с уровнями 1 и 0,618... тоже продукт специфичного процесса. На порядке 10 глобальный максимум детерминанта среди квазиортогональных матриц наблюдается у S -матрицы — матрицы с элементами 1, -1 и нулем на диагонали. Ни к какому золотому сечению эта матрица не причастна, и итерационная процедура, изображенная на рис. 4, ведет именно к ней. Любая неортогональная матрица M (неортогональность помечается чертой сверху) ортогонализуется, например, алгоритмом Грамма — Шмидта [9].



■ Рис. 4. Процедура поиска матрицы

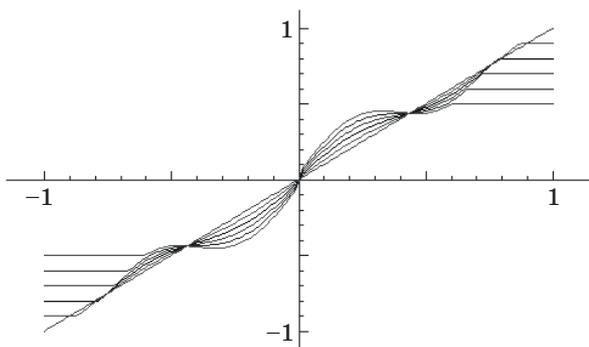
Далее, поскольку мы заинтересованы в росте детерминанта матрицы, а он обратно пропорционален степени от величины максимального элемента, матрица насыщается (обычная нелинейная операция). Этот циклически повторяющийся процесс ведет к экстремуму детерминанта квазиортогональной матрицы.

Для того чтобы экстремум был не глобальным, а локальным, необходимо изменить функцию насыщения, например, сильно увеличивать малые элементы (рис. 5). Сказать, что этим именно моделируется разогрев вещества, нельзя, но избежать матрицы с нулевыми элементами этим мы можем. При желании можно ввести и гистерезисные зависимости.

Таким образом, от статической модели мы пришли к динамической модели, той, которую изучает теория динамических систем. Матрица на выходе этой системы — аттрактор, это то состояние, которое получается по завершении динамического процесса. Параметр, ведущий к бифуркациям, т. е. к увеличению числа уровней, довольно специфичен. Это порядок матрицы. В целом это квадратичная задача, поскольку речь идет об оптимизации детерминанта на квадратичном уравнении связи.

Низ функции насыщения (область в окрестности нуля) образует в процессе поиска матрицы своеобразные «числовые фонтаны», восходящие в матрице вверх потоки чисел. Чем интенсивнее настроен этот процесс, тем больше шансов получить модель того физического явления, которое Шехтман получил быстрым замораживанием. И имеется возможность «выключить» (заморозить) на любой стадии рассматриваемую модель.

Модель Пенроуза двумерна, статична и к настоящему моменту хорошо изучена. Совсем иное дело — квазиортогональные матрицы и порождающие их динамические процессы. Это модели новые, и мы призываем их внимательно изучать, поскольку открытия могут быть сделаны на междисциплинарном стыке (потребовалась же для понимания физического результата Д. Шехтмана модель Пенроуза).



■ Рис. 5. Различные функции насыщения

Прогнозирующие модели квазикристаллов

Очевидно, что помимо корня из 5, ведущего к золотому сечению, в этих задачах, связанных с матрицами различных порядков, можно встретить любые иррациональности, построенные на корнях из простых чисел 2, 3, 5, 7 и т. п. Квазикристалл Шехтмана выделен принадлежностью к классу задач, в которых встречается золотое сечение. Другие квазикристаллы вполне могут быть ассоциированы с другими квазиортогональными матрицами. Являются ли динамические процессы, порождающие квазиортогональные матрицы, предсказуемыми? Возможно. Нашлась же матрица с уровнем 0,618... .

Число τ (золотое сечение) является представителем специального класса иррациональных чисел, называемых алгебраическими целыми. Последние определяются как корни алгебраического уравнения

$$x^n + a_{n-1}x^{n-1} + \dots + a_0 = 0,$$

где все a_n — целые числа.

Число τ определяется как решение простейшего квадратного уравнения $\tau^2 = \tau + 1$, которое является уравнением самоподобия. Записав его в виде $1 = 1/\tau + 1/\tau^2$, видим, что оно определяет разбиение отрезка единичной длины на два отрезка с длинами $1/\tau$ и $1/\tau^2$, пропорциональное отношение которых и есть $\tau = (1 + \sqrt{5})/2 = 1,618\dots$, $1/\tau = 0,618\dots$. Что касается самоподобия, то это своеобразная характеристика симметрии системы относительно однородного растяжения размеров системы — масштабная инвариантность или скейлинг. Самоподобие квазикристаллов, как и кристаллов, состоит в том, что есть такие точки в пространстве, относительно которых при увеличении растяжения до любой другой точки решетки в q раз попадаешь опять в точку решетки. Квазикристаллы с симметрией 5-го и 10-го порядков самоподобны относительно растяжения в τ раз, т. е. икосаэдрическому квазикристаллу отвечает матрица золотого сечения. Предположительно у квазикристаллов с симметрией 8-го и 12-го порядков коэффициентами растяжения самоподобия являются числа $\xi = (1 + \sqrt{2})/2 = 1,207$ и $\psi = (2 + \sqrt{3})/2 = 1,866$ соответственно [11].

Числа τ , ξ , ψ — иррациональные. Матрицы с иррациональными уровнями — сравнительно новый объект [12]. Для их нахождения используется алгоритм «утряски» детерминанта, описанный нами выше. Помимо матриц 5-го и 10-го порядков с золотым сечением, есть и другие матрицы небольших порядков (например, матрица Пифагора) с другими иррациональными числами-уровнями, возможно, отвечающими свойствам существующей линейки квазикристаллов.

Матрица золотого сечения G_{10} — модульно-двухуровневая матрица с модулями уровней $a=1$ и $g=0,618\dots$, она представлена на рис. 6, а и б. Яркость клетки отражает величину уровня ее элемента в пределах от 0 (белый цвет) до -1 (красный цвет). Как видно, уровни дискретны.

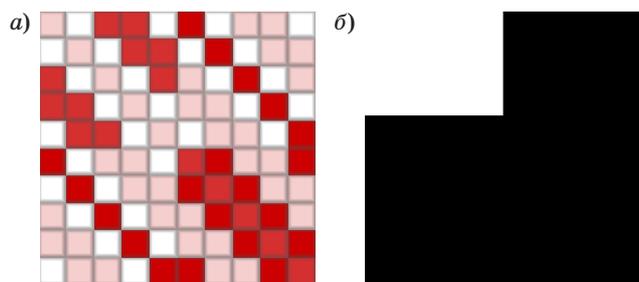
Вид матрицы золотого сечения зависит от сортировки строк и столбцов, существует бициклическая форма, показанная на рисунке. Циклические и бициклические формы сопоставимы с моделями, в которых просматривается дальняя упорядоченность, как это имеет место быть с линиями магнитного поля, чьими отдаленными моделями циклические матрицы являются (сочетание хаоса в знаках элементов вдоль строк и жесткой упорядоченности вдоль «диагоналей»). Ветвь матриц золотого сечения определена на порядках $n=10 \times 2^k$. Для них справедлива следующая логика построения (сходная с логикой построения матриц Адамара): матрица G_{10} является стартовой для всей последовательности матриц, находимой итерациями, представимыми

$$G_{nk} = \begin{bmatrix} G_{nk} & G_{nk} \\ G_{nk} & -G_{nk} \end{bmatrix}. \text{ Значение функции}$$

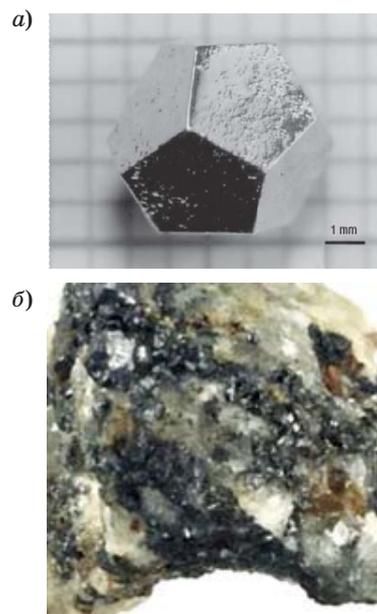
уровня матриц этой ветви — константа $g=1/\tau$. Область приложения математических моделей в виде компактных в точном математическом смысле базисов велика [13].

С 1984 года в лабораториях было получено более 100 различных квазикристаллов, и считалось, что в природе образование таких веществ невозможно из-за крайне нестабильной их структуры. Природный образец на основе $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$ был найден российским геологом Валерием Крячко на Корякском нагорье; в музее, куда он попал из окрестностей Анадыря, где встречается хатырkit, его обнаружил Стейнхардт.

Хатырkit — природный немагнитный металлический минерал, содержащий примерно 25 % меди, 25 % цинка и 50 % алюминия. В образце были обнаружены совсем крохотные — около 100 мкм в диаметре — включения другого минерала. Его состав: 63 % алюминия, 24 % меди



■ Рис. 6. Матрица золотого сечения G_{10} (а) и гистограмма модулей элементов с уровнем $g=1,618\dots$ (б)



■ Рис. 7. Но-Mg-Zn квазикристалл (а) и хатырkit (б)

и 13 % железа — оказался очень близок к одному из наиболее известных и хорошо изученных квазикристаллов, открытых в 1987 году японской группой под руководством Ань Пан Цай (рис. 7, а и б).

Полученная в экспериментах [10] квазиортогональная матрица 5-го порядка имеет максимальный на классе квазиортогональных матриц детерминант, уровни гистограммы модулей ее элементов соотносимы друг с другом как 6:3:2 (напоминает состав включения в хатырkit $Al_{63}Cu_{24}Fe_{13}$). Порядок 5 здесь играет, очевидно, большую роль.

Заклучение

Для упорядоченных структур, состоящих из двух бесконечно повторяющихся фрагментов, моделью, отражающей детали строения, может являться модульно двухуровневая матрица золотого сечения. Здесь просматриваются одни и те же особенности решаемой задачи — дихотомия элементов, связанная с золотой пропорцией. Интерес состоит не столько в констатации этой, безусловно, важной зависимости, сколько в указании перспектив: ведь и материалы, и матрицы в состоянии иметь еще и другие, кроме известных, виды, причем вторые могут привлекаться для предсказания существования, а затем и для анализа первых.

Динамическая модель нова, она указывает на полезную связь с теориями динамических систем, линейных операторов, случайных аттракторов и т. п. с их математическим аппаратом, столь необходимым в развитии взглядов на материалы в обобщенной кристаллографии.

Литература

1. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. Metallic Phase with LongRange Orientational Order and No Translational Symmetry // *Physical Review Letters*. 1984. Vol. 53. P. 1951–1953.
2. Penrose R. Pentaplexity // *Eureka*. 1978. Vol. 39. P. 16–22.
3. Penrose R. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics*. — Oxford University Press, 1989. — 480 p.
4. Мадисон А. Е. Симметрия квазикристаллов // *Физика твердого тела*. 2013. Т. 55. Вып. 4. С. 784–796.
5. Steurer W., Deloudi S. *Crystallography of Quasicrystals. Concepts, Methods and Structures*. — Springer, 2009. — 384 p.
6. Hyde S., et al. *The Language of Shape. The Role of Curvature in Condensed Matter Physics, Chemistry and Biology*/ S. Hyde, S. Andersson, K. Larsson, Z. Blum, T. Landh, S. Lidin, B. W. Ninham. — Elsevier, 1997. — 383 p.
7. Lord E. A., Mackay A. L., Ranganathan S. *New Geometries for New Materials*. — Cambridge University Press, 2006. — 235 p.
8. Грациа Д. Квазикристаллы // *УФН*. 1988. Т. 156. Вып. 2. С. 112–124.
9. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. М-матрицы и кристаллические структуры // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г. И. Носова*. 2013. № 3. С. 58–61.
10. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрицы локального максимума детерминанта // *Информационно-управляющие системы*. 2014. № 1. С. 2–14.
11. Вехилов Ю. Х., Черников М. А. Квазикристаллы // *Успехи физических наук*. 2010. Т. 180. № 6. С. 561–586.
12. Балонин Н. А., Сергеев М. Б. Матрица золотого сечения G10 // *Информационно-управляющие системы*. 2013. № 6(67). С. 2–5.
13. Балонин Н. А. Матрицы золотого сечения. <http://mathscinet.ru/catalogue/gold/> (дата обращения: 05.04.2016).

UDC 519.614

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.26

Matrix Models of Generalized Crystallography

Balonin N. A.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, korbendfs@mail.ruSergeev M. B.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, mbse@mail.ruSuzdal V. S.^b, Dr. Sc., Tech., Professor, suzdal@isma.kharkov.ua^aSaint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, 67, B. Morskaya St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation^bInstitute for Scintillation Materials National Academy of Sciences of Ukraine, 60, Lenin ave., 61001, Kharkiv, Ukraine

Purpose: We develop common approaches to building matrix models of generalized crystallography. **Results:** The conjecture was proved that each quasicrystal meets an associated quasiorthogonal matrix. D. Shechtman's quasicrystal corresponds to the golden ratio matrix. It is concluded that for ordered structures consisting of two endlessly repeating units, a model which would reflect the details of the structure may be a modularly two-leveled golden ratio matrix. **Practical relevance:** The prospects of further research have been determined. Both the materials and the associated matrices can have a few modifications. Quasiorthogonal matrices can be involved to predict the existence of materials and, after that, for their analysis. The corresponding software has been developed for mathematical Internet.

Keywords — Crystalline Structures, Quasicrystals, Orthogonal Matrices, Golden Ratio, Golden Ratio Matrix, Belevitch Matrix, Mersenne Matrix, Dynamical Systems, Strange Attractor.

References

1. Shechtman D., Blech I., Gratias D., Cahn J. W. Metallic Phase with LongRange Orientational Order and No Translational Symmetry. *Physical Review Letters*, 1984, no. 53, pp. 1951–1953.
2. Penrose R. Pentaplexity. *Eureka*, 1978, no. 39, pp. 16–22.
3. Penrose R. *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds and the Laws of Physics*. Oxford University Press, 1989. 480 p.
4. Madison A. E. The Symmetry of Quasicrystals. *Fizika tverdogo tela*, 2013, no. 4 (55), pp. 784–796 (In Russian).
5. Steurer W., Deloudi S. *Crystallography of Quasicrystals. Concepts, Methods and Structures*. Springer, 2009. 384 p.
6. Hyde S., Andersson S., Larsson K., Blum Z., Landh T., Lidin S., Ninham B. W. *The Language of Shape. The Role of Curvature in Condensed Matter Physics, Chemistry and Biology*. Elsevier, 1997. 383 p.
7. Lord E. A., Mackay A. L., Ranganathan S. *New Geometries for New Materials*. Cambridge University Press, 2006. 235 p.
8. Gratia D. Quasi-Crystals. *UFN*, 1988, no. 2 (156), pp. 11–124 (In Russian).
9. Balonin N. A., Sergeev M. B. M-Matrices and Crystal Structures. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G. I. Nosova*, 2013, no. 3, pp. 58–61 (In Russian).
10. Balonin N. A., Sergeev M. B. Local Maximum Determinant Matrices. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 1(68), pp. 2–14 (In Russian).
11. Vekhilov Yu. Kh., Chernikov M. A. Quasi-Crystals. *Uspekhi fizicheskikh nauk*, 2010, no. 6 (180), pp. 561–586 (In Russian).
12. Balonin N. A., Sergeev M. B. Matrix of Golden Ratio G10. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2013, no. 6(67), pp. 2–5 (In Russian).
13. Balonin N. A. *Matritsy zolotogo secheniia* [Golden Ratio Matrices]. Available at: <http://mathscinet.ru/catalogue/gold/> (accessed 5 April 2016).

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ СЛОЖНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ВЫСОКИМ УРОВНЕМ АВТОНОМНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Г. Н. Мальцев^а, доктор техн. наук, профессор

А. В. Назаров^а, доктор техн. наук, доцент

В. Л. Якимов^а, канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры

^аВоенно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, РФ

Цель: разработать имитационную модель процесса диагностирования технического состояния сложной технической системы, обладающей высоким уровнем автономности функционирования, с учетом возможности нахождения системы в частично работоспособном состоянии и ошибок при автономном контроле технического состояния и диагностировании. **Результаты:** разработан граф состояний сложной технической системы с высоким уровнем автономности функционирования, обоснована структура имитационной модели процесса ее диагностирования с использованием встроенных средств текущего контроля технического состояния и самодиагностирования и внешней подсистемы диагностирования, выполняющей периодический углубленный контроль технического состояния системы. Проведен анализ влияния достоверности диагностирования на величину интервала надежного автономного функционирования анализируемой системы. Представлен пример имитационного моделирования процесса диагностирования бортовой аппаратуры космического аппарата в среде AnyLogic. Показана важность совершенствования встроенных систем самодиагностирования сложных технических систем с высоким уровнем автономности и методов углубленного анализа их технического состояния. **Практическая значимость:** разработанная имитационная модель может быть использована для оценки требуемой периодичности проведения углубленного контроля технического состояния сложных технических систем с высоким уровнем автономности функционирования при заданных показателях достоверности самодиагностирования.

Ключевые слова — сложная техническая система, техническое состояние, диагностирование, автономное функционирование.

Введение

Одним из способов обеспечения высокого уровня эксплуатационной надежности сложных технических систем (СТС) является контроль и диагностирование их технического состояния (ТС) [1, 2]. Для широкого класса СТС характерно наличие ситуаций штатного и нештатного функционирования, причем именно последние в большинстве случаев приводят к неблагоприятным последствиям с точки зрения выполнения СТС стоящих перед ними задач по предназначению [2, 3]. Реализация диагностирования и восстановления работоспособности СТС с высоким уровнем автономности функционирования встроенными средствами текущего контроля ТС и самодиагностирования позволяет значительно продлить их жизненный цикл.

Очевидно, что с расширением возможностей подсистем текущего контроля ТС и самодиагностирования СТС по выявлению нештатных ситуаций и их парированию будет увеличиваться время автономного функционирования, характеризующее способность технической системы функционировать самостоятельно без взаимодействия с внешними системами. В то же время внешние управляющие системы, как правило, обладают более широкими возможностями по решению задач диагностирования и управления

ТС, чем средства самодиагностирования управляемых систем, и в меньшей степени подвержены влиянию эффектов накопления последствий отказов. Отсюда следует взаимосвязь достоверности диагностирования с длительностью интервала автономного функционирования (ИАФ) и задача рационального распределения функций встроенных и внешних средств контроля ТС СТС с высоким уровнем автономности.

В настоящей статье рассмотрено влияние характеристик встроенной системы самодиагностирования СТС на интервал ее надежного автономного функционирования с учетом накопления последствий отказов и увеличения интенсивности их возникновения. Показана важность внешней подсистемы диагностирования при проведении углубленного анализа ТС СТС.

Формализация процесса диагностирования сложной технической системы с высоким уровнем автономности

Согласно требованиям современных стандартов, средства контроля и диагностики технических систем должны строиться на основе открытой модульной архитектуры и включать в свой состав модули (подсистемы) сбора информации, контроля ТС и диагностирования [4]. Модуль сбора информации обеспечивает сбор данных

о параметрах технической системы, по которым проводится контроль ее ТС и диагностирование. Модуль контроля ТС осуществляет сравнение значений контролируемых параметров со значениями допусков и формирует сигнал оповещения при превышении соответствующих границ. Модуль диагностирования использует экспертные правила и вычислительные процедуры для определения текущего состояния системы и выявления вероятных неисправностей. Возможно также включение в состав средств контроля и диагностики модуля прогноза, осуществляющего прогнозирование ТС в последующие моменты времени с заданным упреждением на основе прогностических моделей, включая модели развития будущих отказов [5, 6].

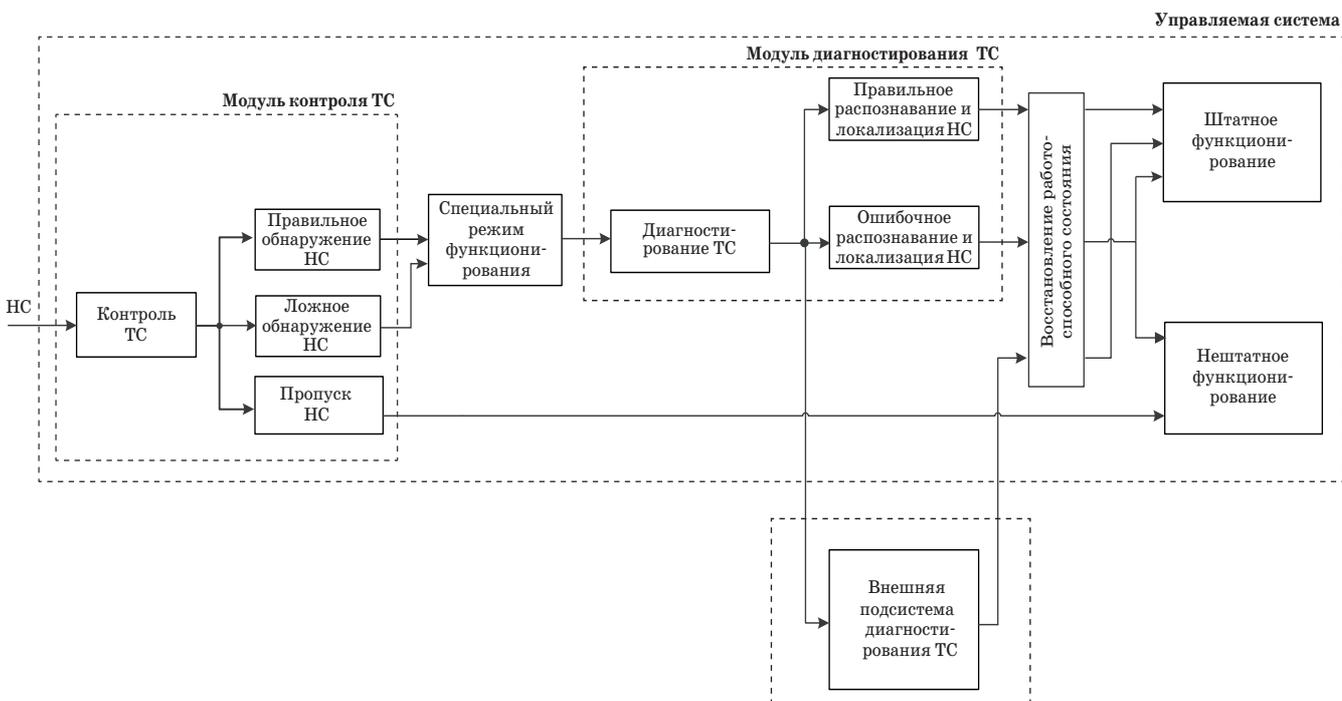
Указанные функции в процессе автономного функционирования СТС решаются встроенными средствами контроля текущего ТС и самодиагностирования, а при взаимодействии с внешней управляющей системой — внешними средствами диагностирования и управления ТС. Пропуск неисправностей и (или) их недостоверное распознавание может привести к увеличению интенсивности потока отказов, росту неопределенности определения параметров ТС, снижению достоверности контроля ТС и процедур поиска мест и причин неисправностей [7]. При обнаружении нештатной ситуации (НС) функционирования СТС обычно осуществляется их перевод в специальный режим работы, в котором риск развития

негативных последствий отказов минимален [8]. С учетом того, что внешние управляющие системы, как правило, обладают более широкими возможностями по решению задач диагностирования и управления ТС, чем средства самодиагностирования, при создании СТС с высоким уровнем автономности целесообразно предусмотреть их периодическое взаимодействие с управляющей системой — обращение в целях проведения углубленного анализа ТС. Практика эксплуатации СТС показывает важность проведения такого анализа для их дальнейшего эффективного применения по назначению [5, 9].

Рассмотрим организацию процесса диагностирования СТС с высоким уровнем автономности [8].

Функциональная схема процесса диагностирования управляемой СТС встроенными средствами и средствами внешней управляющей системы представлена на рис. 1. Последняя, наряду с собственно управлением целевым функционированием анализируемой СТС, осуществляет диагностирование и управление ее ТС. На схеме выделены встроенные модули контроля и диагностирования ТС управляемой системы и внешняя управляющая система, в которых принимаются решения о ТС системы и осуществляется обнаружение неисправностей.

Будем понимать под НС функционирования управляемой СТС ее неработоспособное состояние [10]. В соответствии с функциональной схе-



■ **Рис. 1.** Функциональная схема процесса диагностирования управляемой СТС с высоким уровнем автономности встроенными средствами и средствами внешней управляющей системы

мой (см. рис. 1) встроенными средствами контроля ТС и самодиагностирования непрерывно осуществляется решение следующих задач: 1) контроль ТС системы; 2) в случае принятия решения о НС функционирования системы — перевод ее в специальный режим работы; 3) распознавание НС функционирования системы и локализация неисправности; 4) восстановление работоспособного состояния системы.

На практике при проведении контроля ТС СТС существует необходимость не только в определении работоспособности системы, но и в соотношении ее неработоспособного состояния к множеству известных НС [10]. Кроме того, в результате НС сложная система может оказаться в частично работоспособном состоянии. Под частично работоспособным состоянием будем понимать состояние, в котором СТС способна выполнять функциональные задачи по назначению с допустимыми ограничениями. Учет частично работоспособных состояний имеет важное значение при диагностировании СТС с высоким уровнем автономности функционирования. При этом формирование множества частично работоспособных состояний представляет собой отдельную задачу, требующую индивидуального подхода для каждой СТС.

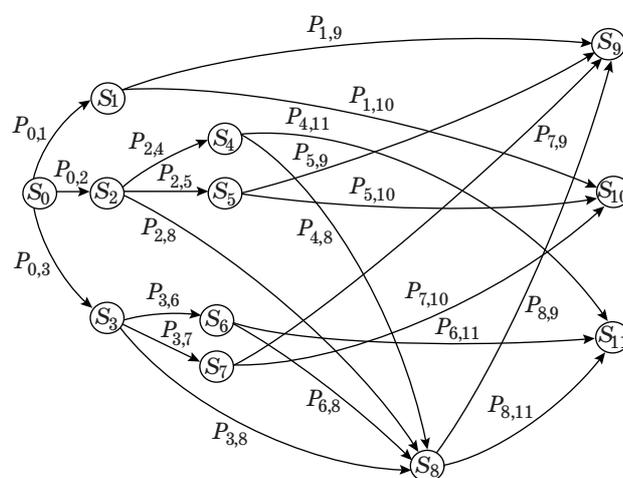
С учетом перечисленных обстоятельств работу модуля контроля ТС будут характеризовать следующие три выходные реакции: правильное обнаружение НС, пропуск НС и ложное обнаружение НС. В последнем случае модулем контроля ТС принимается решение о НС, хотя система находится в частично работоспособном состоянии. Еще одним возможным результатом контроля ТС является правильное необнаружение НС (правильное обнаружение частично работоспособного состояния). Однако вероятностью этой выходной реакции можно пренебречь, что вызвано следующими причинами. Во-первых, контролируемые параметры в частично работоспособном состоянии имеют значения, близкие к предельно допустимым, в гораздо большей степени соответствующие НС, чем работоспособному состоянию. Во-вторых, существенное пересечение множества частично работоспособных состояний в пространстве контролируемых параметров как между собой, так и по отношению к множеству НС не позволяет с высокой достоверностью решить задачу их оперативного обнаружения в модуле контроля ТС управляемой СТС. Как следствие, на модуль контроля ТС нецелесообразно возлагать функцию обнаружения частично работоспособного состояния управляемой СТС. В то же время частичная работоспособность СТС может быть выявлена на этапе диагностирования ТС. При этом обычно количество возможных частично работоспособных состояний значительно больше, чем

рассмотренных НС, что усугубляет проблему их диагностирования с заданной достоверностью. Тем не менее рассмотрение частично работоспособных состояний при моделировании процессов диагностирования СТС требует учета выходной реакции ложного обнаружения НС, как это показано на рис. 1.

После решения задачи обнаружения НС начинается процесс самодиагностирования, в ходе которого осуществляется распознавание НС и локализация неисправности в управляемой СТС, а также оценка работоспособности системы в частично работоспособном состоянии. При невозможности решить задачи распознавания НС и восстановления работоспособного состояния управляемой СТС встроенными средствами контроля ТС и самодиагностирования восстановление ее работоспособного состояния осуществляется после планового или инициируемого средствами самодиагностирования обращения к внешней управляющей системе. Обращение к внешней управляющей системе, как правило, происходит при обнаружении серьезных («тяжелых») отказов, вероятность возникновения которых гораздо ниже и для устранения которых возможностей встроенных средств самодиагностирования недостаточно. На практике количество таких «тяжелых» отказов часто соответствует правилу Парето и составляет порядка 20 % от их общего количества [8].

Функциональной схеме процесса диагностирования ТС СТС с высоким уровнем автономности (см. рис. 1) соответствует граф состояний, представленный на рис. 2.

Число текущих состояний, образующих множество $S = (S_0, S_1, S_2, \dots, S_{11})$, определяется логикой и уровнем описания процесса диагностирования управляемой СТС при возникновении НС.



■ Рис. 2. Граф состояний процесса диагностирования СТС

Интенсивности переходов между состояниями определяются вероятностными и временными характеристиками соответствующих процессов контроля ТС и диагностирования управляемой СТС.

Исходным состоянием графа является состояние S_0 , соответствующее воздействию НС на управляемую СТС, находящуюся в работоспособном состоянии, ТС которой контролируется встроенными средствами диагностирования.

Работу встроенных средств контроля ТС и самодиагностирования управляемой СТС характеризуют следующие текущие состояния:

S_1 — контроль ТС системы проведен, имеет место пропуск НС;

S_2 — контроль ТС системы проведен, НС правильно обнаружена, осуществляется переход в специальный режим работы и распознавание правильно обнаруженной НС;

S_3 — контроль ТС системы проведен, имеет место ложное обнаружение НС, осуществляется переход в специальный режим работы и распознавание ложно обнаруженной НС;

S_4 — НС правильно обнаружена, в результате самодиагностирования распознавание НС выполнено правильно, реализуется правильная процедура восстановления работоспособности системы;

S_5 — НС правильно обнаружена, в результате самодиагностирования распознавание НС выполнено неправильно, реализуется неправильная процедура восстановления работоспособности системы;

S_6 — имеет место ложное обнаружение НС, но в результате самодиагностирования распознавание НС выполнено правильно, реализуется правильная процедура восстановления работоспособности системы;

S_7 — имеет место ложное обнаружение НС, в результате самодиагностирования распознавание НС выполнено неправильно, реализуется неправильная процедура восстановления работоспособности системы.

Работу внешней подсистемы диагностирования управляющей системы характеризует состояние S_8 , соответствующее обращению управляемой системы к внешней управляющей системе после правильного или ложного обнаружения НС и выполнению контроля ТС и диагностирования СТС внешней подсистемой диагностирования управляющей системы.

Состояния S_9, S_{10}, S_{11} являются поглощающими и характеризуются следующим образом:

S_9 — управляемая СТС находится в неработоспособном состоянии вследствие пропуска НС и невыполнения встроенными и внешними средствами диагностирования процедур восстановления работоспособного состояния системы;

S_{10} — управляемая СТС находится в частично работоспособном состоянии и способна выполнять задачи по функциональному назначению с ограничениями вследствие не критичности НС к правильности выполнения встроенными средствами диагностирования процедур восстановления работоспособности системы;

S_{11} — управляемая СТС находится в работоспособном состоянии благодаря работе встроенных и внешних средств диагностирования и выполнению после обнаружения НС правильных процедур восстановления работоспособного состояния системы.

Полагается, что внешняя подсистема диагностирования управляющей системы, обладающая более широкими функциональными возможностями, чем встроенная подсистема самодиагностирования управляемой СТС, при правильном обнаружении НС осуществляет локализацию неисправности и восстановление работоспособного состояния управляемой системы в результате формирования соответствующих управляющих воздействий. Если же НС внешней подсистемой диагностирования управляющей системы не обнаружена, то возможность восстановления работоспособного состояния управляемой системы отсутствует.

Переходы между состояниями являются вероятностными (стационарными и нестационарными во времени). Вероятностные переходы из состояния в состояние описываются матрицей вероятностей переходов P . Для графа состояний, приведенного на рис. 2, она имеет следующий вид:

$$P = \begin{pmatrix} P_{0,1} & P_{0,2} & P_{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{1,9} & P_{1,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & P_{2,4} & P_{2,5} & 0 & 0 & P_{2,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{3,6} & P_{3,7} & P_{3,8} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{4,8} & 0 & 0 & P_{4,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{5,9} & P_{5,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{6,8} & 0 & 0 & P_{6,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{7,9} & P_{7,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{8,9} & 0 & P_{8,11} \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где $P_{q,r}$ — вероятность перехода из текущего состояния q в состояние r , $q = 0...8$, $r = 1...11$ — номера состояний.

Все указанные вероятности можно свести в четыре группы, характеризующие уровни обработки диагностической информации о НС. Первый уровень отвечает за оперативный контроль ТС СТС с использованием встроенных средств диагностирования и характеризуется вероятностями: $P_{0,1}$ — пропуска НС; $P_{0,2}$ — правильного обнаружения НС; $P_{0,3}$ — ложного обнаружения НС.

Второй уровень отвечает за распознавание НС в СТС и локализацию неисправности с использованием встроенных средств диагностирования и характеризуется вероятностями: $P_{2,4}$ — правильного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС; $P_{2,5}$ — ошибочного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС; $P_{3,6}$ — правильного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС; $P_{3,7}$ — ошибочного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС; $P_{2,8}$, $P_{3,8}$ — обращения к внешней подсистеме диагностирования управляющей системы после правильного или ложного обнаружения НС соответственно при наличии значительной неопределенности в значениях контролируемых параметров, не позволяющей задействовать средства самодиагностирования СТС. Третий уровень отвечает за восстановление работоспособности СТС и характеризуется вероятностями: $P_{1,9}$, $P_{1,10}$ — перехода СТС в неработоспособное и частично работоспособное состояние соответственно в результате пропуска НС; $P_{4,11}$, $P_{6,11}$ — восстановления работоспособности СТС с использованием встроенных средств; $P_{4,8}$, $P_{6,8}$ — обращения к внешней подсистеме диагностирования управляющей системы после правильного или ложного обнаружения НС соответственно вследствие невозможности восстановить работоспособность СТС встроенными средствами (случай «тяжелых» отказов); $P_{5,9}$, $P_{7,9}$ — перехода СТС в неработоспособное состояние вследствие неправильного диагностирования НС и реализации неправильных процедур восстановления работоспособности системы; $P_{5,10}$, $P_{7,10}$ — перехода СТС в частично работоспособное состояние после неправильного диагностирования НС и реализации неправильных процедур восстановления работоспособности системы вследствие некорректности НС к правильности выполнения встроенными средствами диагностирования процедур восстановления работоспособности системы. Четвертый уровень отвечает за контроль ТС СТС с использованием внешней подсистемы диагностирования управляющей системы и характеризуется вероятностями: $P_{8,9}$ — необнаружения НС в СТС при углубленном анализе ее ТС средствами управляющей системы; $P_{8,11}$ — правильного обнаружения НС и диагностирования СТС при углубленном анализе ее ТС средствами управляющей системы.

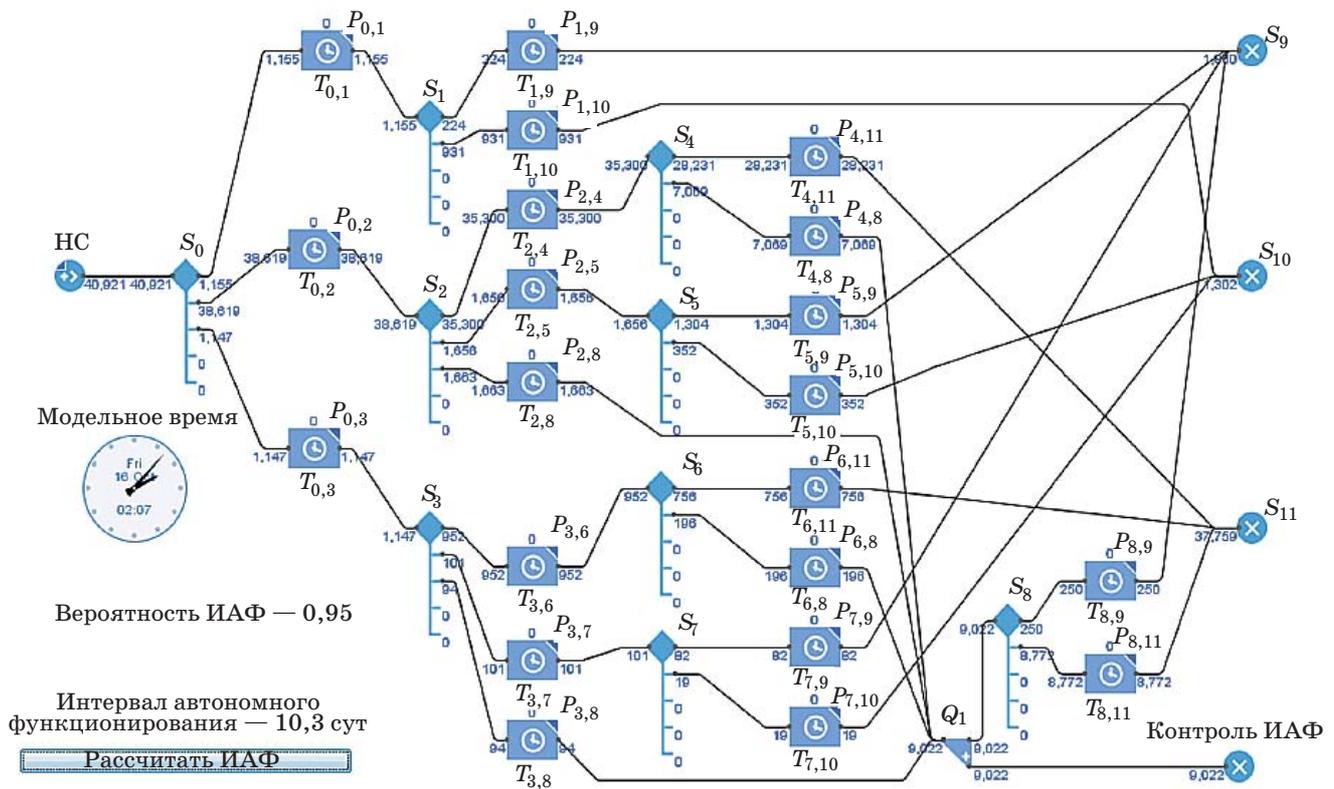
Введем допущение о том, что в модуле диагностирования ТС осуществляется не только процесс распознавания НС, но и процесс тестирования управляемой СТС. На основе принятых допущений о характере частично работоспособных

состояний СТС будем полагать, что вероятность правильного распознавания и локализации неисправности после ложного обнаружения НС $P_{3,6}$ меньше, чем вероятность правильного распознавания и локализации неисправности после правильного обнаружения НС $P_{2,4}$: $P_{3,6} < P_{2,4}$. Также будем полагать, что при пропуске НС, ложном обнаружении НС, ошибочном распознавании и локализации неисправностей вероятность перехода системы в неработоспособное состояние выше, чем в частично работоспособное: $P_{1,10} < P_{1,9}$, $P_{5,10} < P_{5,9}$, $P_{7,10} < P_{7,9}$. В исходном состоянии вероятности $P_{0,2}$, $P_{2,4}$ и $P_{3,6}$ имеют заданные значения $P_{0,2}$, $P_{2,4}$ и $P_{3,6}$. Вероятности переходов для всех состояний, кроме поглощающих, образуют полную группу событий: $P_{0,1} + P_{0,2} + P_{0,3} = 1$, $P_{1,9} + P_{1,10} = 1$, $P_{2,4} + P_{2,5} + P_{2,8} = 1$, $P_{3,6} + P_{3,7} + P_{3,8} = 1$, $P_{4,8} + P_{4,11} = 1$, $P_{5,9} + P_{5,10} = 1$, $P_{6,8} + P_{6,11} = 1$, $P_{7,9} + P_{7,10} = 1$, $P_{8,9} + P_{8,11} = 1$. Произведение вероятностей $P_{0,2}$ и $P_{2,4}$ может быть использовано в качестве показателя достоверности встроенной системы диагностирования: $D = P_{0,2}P_{2,4}$. Вероятность $P_{8,11}$ может быть использована в качестве показателя достоверности внешнего диагностирования: $D_2 = P_{8,11}$.

Результирующая вероятность P_{11} попадания системы в поглощающее состояние S_{11} , соответствующее работоспособному состоянию и штатному функционированию управляемой системы после выполнения цикла процедур контроля и диагностирования ТС и восстановления работоспособности, зависит как от значений показателей достоверности диагностирования D_1 и D_2 , так и от значений других вероятностей, описывающих переходы в графе состояний, приведенном на рис. 2. Трудность разделения переменных и получения аналитической зависимости вероятности работоспособного состояния СТС от показателей достоверности внутреннего и внешнего диагностирования $P_{11}(D_1, D_2)$ приводит к необходимости использовать методы имитационного моделирования для исследования процессов диагностирования СТС.

На основе графа состояний процесса диагностирования (см. рис. 2) в среде AnyLogic [11] была разработана имитационная модель диагностирования СТС с высоким уровнем автономности. Структура модели и форма вывода результатов моделирования представлены на рис. 3.

Для описания состояний от S_0 до S_{11} в имитационной модели используются специальные компоненты S_0-S_{11} , имеющие встроенный механизм изменения значений вероятностей потока событий на их выходах и позволяющие осуществить вероятностные переходы из одного состояния в другое. Компонент Q_1 создает на своих выходах копии входного потока событий обращения к внешней подсистеме диагностирования,



■ Рис. 3. Отображение имитационной модели процесса диагностирования СТС в среде AnyLogic PLE

что позволяет использовать его для контроля текущих значений ИАФ СТС.

На вход модели поступает поток заявок, имитирующих отказы и НС функционирования системы, которые порождают различные события, распространяющиеся в модели от состояния к состоянию. В начальный момент времени анализируемая СТС находится в исходном состоянии S_0 . В последующие моменты времени система подвергается воздействию отказов, возникающих с интенсивностью $\lambda = \lambda_0$. Каждый отказ порождает распространяющуюся в модели заявку на обработку НС встроенными средствами самодиагностирования СТС. В результате обработки этой заявки система попадает в одно из поглощающих состояний S_9, S_{10} или S_{11} .

Интервал автономного функционирования СТС является случайной величиной и определяется как интервал времени между событиями обращения к внешней управляющей системе. Получив определенный объем статистической информации, можно оценить функцию плотности вероятности распределения и вычислить значение ИАФ управляемой системы с заданной вероятностью, а также зависимость его длительности от различных параметров модели.

Все процессы в модели синхронизированы, а их длительность определяется модельным временем. В каждом из состояний происходит за-

держка модельного времени на величину $T_{q,r} \in T$, где T — матрица задержек:

$$T = \begin{pmatrix} T_{0,1} & T_{0,2} & T_{0,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{1,9} & T_{1,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_{2,4} & T_{2,5} & 0 & 0 & T_{2,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{3,6} & T_{3,7} & T_{3,8} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{4,8} & 0 & 0 & T_{4,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{5,9} & T_{5,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{6,8} & 0 & 0 & T_{6,11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{7,9} & T_{7,10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{8,9} & 0 & T_{8,11} \end{pmatrix} \cdot (2)$$

Некоторые задержки являются величинами постоянными, а некоторые — случайными, распределенными по экспоненциальному или по иному закону, в зависимости от наличия экспертной информации о законе распределения.

В имитационную модель диагностирования СТС включен набор правил, в соответствии с которыми происходят изменения характеристик потока отказов и средств диагностирования за счет программного изменения параметров компонентов модели во времени:

1. При обнаружении НС управляемая система переводится в специальный режим, в котором возникновение последующих НС практически

невозможно ($\lambda = 0$), и на вход модели (состояние S_0) отказы не поступают, пока не будут завершены процедуры восстановления работоспособности системы.

2. При пропуске НС (состояние S_1), ошибках распознавания НС и неправильном распознавании неисправностей (состояния S_5 и S_7) происходит увеличение интенсивности отказов λ и уменьшение вероятностей $P_{0,2}$, $P_{2,4}$, $P_{3,6}$ вследствие роста неопределенности значений контролируемых параметров:

$$\begin{aligned} \lambda(k) &= \lambda(k-1) + d\lambda(k), \\ P_{0,2}(k) &= P_{0,2}(k-1) - dP(k), \\ P_{2,4}(k) &= P_{2,4}(k-1) - dP(k), \\ P_{3,6}(k) &= P_{3,6}(k) - dP(k), \end{aligned} \quad (3)$$

где $d\lambda(k)$ — случайная величина, принимающая значение в интервале $0 \dots d\lambda_{\max}$; $dP(k)$ — случайная величина, принимающая значение в интервале $0 \dots dP_{\max}$; k — номер дискретного отсчета модельного времени.

3. При обращении к внешней подсистеме диагностирования управляющей системы осуществляется углубленный анализ ТС управляемой системы, восстановление ее работоспособности и возвращение исходных значений параметров встроенных средств диагностирования: $\lambda = \lambda_0$, $P_{0,2} = P_{0,2}$, $P_{2,4} = P_{2,4}$, $P_{3,6} = P_{3,6}$ — с вероятностью, определяющей показатель достоверности внешней подсистемы диагностирования: $D_2 = P_{8,11}$.

4. При правильном самодиагностировании и выявлении неисправности значение интенсивности отказов и параметров встроенных средств диагностирования не изменяется. С увеличением показателя достоверности встроенной системы диагностирования $D_1 = P_{0,2}P_{2,4}$ эффект накопления последствий отказов в СТС проявляется в меньшей степени, что позволяет увеличить ее ИАФ.

При достижении состояния S_8 фиксируется время обращения к внешней управляющей системе $t_B(j)$ и вычисляется время автономного функционирования управляемой системы $T_a(j)$:

$$\begin{aligned} t_B(j) &= f(\lambda(k), T_q(k), P_{q,r}(k), t_B(j-1)); \\ T_a(j) &= t_B(j) - t_B(j-1) - T_d(j), \end{aligned} \quad (4)$$

где $t_B(j)$, $t_B(j-1)$ — модельное время двух последовательных обращений к управляющей системе; j — номер обращения; $T_a(j)$ — интервал времени между j -м и $(j-1)$ -м обращениями. Величина $T_d(j)$ представляет собой время диагностирования ТС управляемой системы с использованием внешней подсистемы диагностирования: $T_d(j) = T_{8,11}(j)$ при правильном обнаружении НС

и восстановлении работоспособного состояния СТС и $T_d(j) = T_{8,9}(j)$ при необнаружении НС и невозможности восстановления работоспособного состояния СТС.

Выявление зависимости среднего ИАФ СТС от параметров модели осуществляется по ансамблю реализаций, полученных в результате имитационного моделирования [11]. Накопив статистику значений величины $T_a(j)$ по результатам множества экспериментов, можно построить функцию плотности вероятности ее распределения и оценить среднее значение ИАФ T_a с заданной вероятностью, а также получить зависимости этой величины от параметров модели.

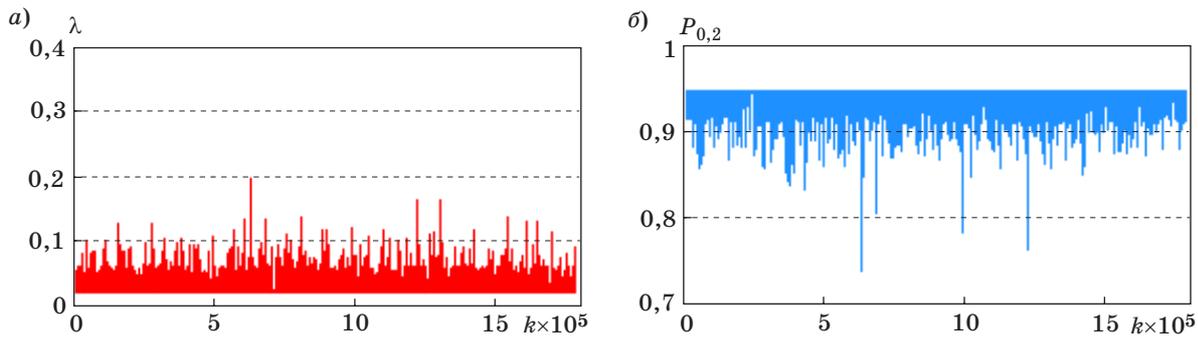
Следует отметить, что при достаточно высоком уровне формализации процессов диагностирования СТС в рассматриваемой имитационной модели правила 1–4 приводят к появлению обратных связей и могут стать причиной нелинейного поведения анализируемых процессов и сложной их взаимной зависимости. Это иллюстрируется результатами имитационного моделирования.

Результаты имитационного моделирования процесса диагностирования бортовой аппаратуры космического аппарата

Характерным примером СТС с высоким уровнем автономности является космический аппарат (КА). Современные КА имеют бортовые средства контроля ТС и самодиагностирования [8, 12], которые непрерывно функционируют в течение всего орбитального полета КА, а технологическими циклами управления КА предусматривается периодический углубленный контроль их ТС и диагностирование по телеметрической информации в наземном комплексе управления [8, 9].

Имитационное моделирование процесса диагностирования ТС бортовой аппаратуры КА с высоким уровнем автономности осуществлялось для суточной интенсивности отказов $\lambda_0 = 0,02$ [8] при следующих параметрах бортовых модулей контроля ТС бортовой аппаратуры и распознавания неисправностей: $P_{0,2} = 0,95$; $P_{2,4} = 0,92$; $P_{3,6} = 0,82$. При этом значения $d\lambda$ и dP представляли собой случайные величины, изменяющиеся в пределах от 0 до 0,04. На входе модели было сформировано более 40 000 событий — НС (неисправностей), время между которыми было распределено по экспоненциальному закону. В результате работы модели наблюдались изменения интенсивности отказов и параметров бортовых средств диагностирования ТС бортовой аппаратуры КА.

Приведем примеры изменения в модельном времени k интенсивности отказов λ (рис. 4, а) и



■ **Рис. 4.** Зависимости от модельного времени интенсивности отказов (а) и вероятности правильного обнаружения НС (б) при самодиагностировании

вероятности правильного обнаружения НС $P_{0,2}$ при самодиагностировании бортовой аппаратуры КА (рис. 4, б). Данные изменения свидетельствуют о сложном поведении потока отказов и параметров системы контроля ТС бортовой аппаратуры КА в рассматриваемой модели, а также о наличии в их динамике значительных выбросов, соответствующих негативному развитию последствий отказов на борту КА.

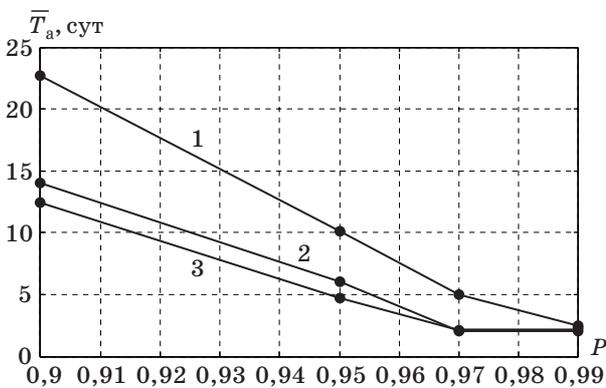
По результатам имитационного моделирования был определен средний временной ИАФ КА \bar{T}_a при $D_2 = 0,97$; $D_1 = 0,87$ ($P_{0,2} = 0,95$; $P_{2,4} = 0,92$) для различных вероятностей его достижения и вариаций параметров изменения интенсивности отказов и достоверности автономного диагностирования бортовой аппаратуры КА.

На рис. 5 представлены зависимости среднего ИАФ КА \bar{T}_a от вероятности его достижения P при неизменных и изменяющихся во времени интенсивности отказов и параметрах системы диагностирования. Зависимости были получены для следующих случаев: интенсивность отказов и параметры системы диагностирования не из-

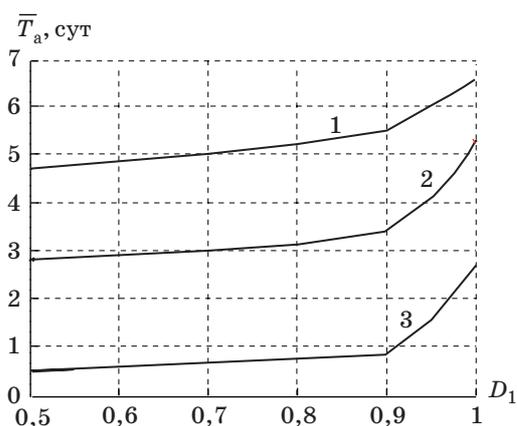
меняются — $d\lambda = 0$, $dP = 0$ (кривая 1), приращенная $d\lambda$ и dP являются случайными величинами, распределенными по равномерному закону на интервале $[0...0,08]$ (кривая 2), приращения $d\lambda$ и dP являются постоянными величинами, равными 0,04 (кривая 3).

Приведенные на рис. 5 зависимости имеют важное практическое значение с точки зрения планирования внешнего контроля ТС СТС со встроенными средствами самодиагностирования. Характер зависимостей позволяет сделать вывод о наличии устойчивой статистической зависимости между математическими ожиданиями приращений $d\lambda$ и dP и средним ИАФ СТС \bar{T}_a , а также о необходимости уменьшения значений $d\lambda$ и dP при проектировании СТС с высоким уровнем автономности. Кривая 1 соответствует более высокому среднему ИАФ СТС при фиксированных интенсивности отказов и параметрах системы диагностирования. Кривые 2 и 3 характеризуют снижение среднего ИАФ СТС при случайных изменениях интенсивности отказов и параметров системы диагностирования и отличаются незначительно, так как получены для условий, когда математические ожидания приращений $d\lambda$ и dP (кривая 2) и значения этих приращений (кривая 3) совпадают.

Путем варьирования значений вероятностей $P_{0,2}$ и $P_{2,4}$, определяющих величину показателя достоверности автономного диагностирования D_1 , была осуществлена оценка их влияния на временной ИАФ КА при заданных характеристиках внешних (наземных) средств контроля и диагностирования ТС и случайных приращениях $d\lambda$ и dP на интервале $[0...0,04]$. На рис. 6 представлены сглаженные зависимости значений среднего ИАФ \bar{T}_a от показателя достоверности самодиагностирования ТС $D_1 = P_{0,2}P_{2,4}$ при различной достоверности внешнего диагностирования, характеризуемой параметром $D_2 = P_{8,11}$. Средний ИАФ оценивался с вероятностью достижения $P = 0,97$. Кривая 1 соответствует высокой достоверности внешнего диагностирования ($D_2 = 1$),



■ **Рис. 5.** Зависимости среднего ИАФ КА от вероятности его достижения для случаев, когда интенсивность отказов и параметры системы диагностирования: 1 — не изменяются; 2 — являются случайными величинами; 3 — являются постоянными величинами



■ **Рис. 6.** Зависимости среднего ИАФ КА от достоверности автономного диагностирования ТС для случаев: 1 — высокая достоверность внешнего диагностирования; 2 — средняя достоверность внешнего диагностирования; 3 — внешнее диагностирование практически не осуществляется

кривая 2 — средней достоверности внешнего диагностирования ($D_2 = 0,8$), кривая 3 — условиям, когда внешнее диагностирование практически не осуществляется ($D_2 = 0,1$). Для полученных зависимостей характерен экспоненциальный рост среднего ИАФ от показателей диагностирования. Они позволяют сделать вывод о необходимости совершенствования как бортовых, так и наземных средств диагностирования для получения высоких значений ИАФ КА.

В реальных условиях функционирования бортовой аппаратуры КА пропуски отказов и ошибки при распознавании неисправностей при низкой достоверности автономного диагностирования могут привести к росту интенсивности отказов, снижению достоверности диагностирования ТС и сокращению ИАФ КА. Это утверждение относится к широкому классу СТС с высоким уровнем автономности. Для снижения последствий

такого развития ситуации необходимо повышать достоверность встроенных (автономных) средств диагностирования и периодически проводить углубленный анализ ТС СТС с использованием внешних средств диагностирования.

Заключение

Имитационное моделирование зачастую является единственным возможным способом исследования эксплуатационных характеристик реальных СТС, так как позволяет объединить различные математические подходы для описания процессов их функционирования. Применительно к разработанной модели такими подходами являются: дискретно-событийный — для описания процессов диагностирования сложных систем с высоким уровнем автономного функционирования и аналитический — для описания изменений параметров модели во времени с использованием логических правил и математических выражений. Рассмотренная имитационная модель позволяет оценить влияние процесса накопления последствий отказов и увеличения интенсивности их возникновения на величину ИАФ СТС, а также сделать выводы о необходимости совершенствования алгоритмического аппарата как встроенных, так и внешних систем диагностирования СТС с высоким уровнем автономности, что является одним из резервов увеличения временных интервалов их автономного функционирования.

Дальнейшее развитие модели планируется в следующих направлениях: вывод аналитических выражений для определения показателя достоверности диагностирования с использованием технических параметров СТС; детальное рассмотрение внешней подсистемы диагностирования, осуществляющей углубленный анализ ТС управляемой СТС; расширение спектра используемых компонентов среды имитационного моделирования AnyLogic [11].

Литература

1. Пашковский Г. С. Задачи оптимального обнаружения и поиска отказов в РЭА. — М.: Радио и связь, 1981. — 298 с.
2. Александровская Л. Н., Афанасьев А. П., Лисов А. А. Современные методы обеспечения безотказности сложных технических систем. — М.: Логос, 2001. — 208 с.
3. Зверев Г. Я. Оценка надежности изделия в процессе эксплуатации. — М.: Ленанд, 2010. — 96 с.
4. ГОСТ Р ИСО 13374-2-2011. Контроль состояния и диагностика машин. Обработка, передача и представление данных. Ч. 2: Обработка данных. — М.: Стандартинформ, 2012. — 27 с.
5. ГОСТ Р ИСО 13381-1-2011. Прогнозирование технического состояния. Ч. 1: Общее руководство. — М.: Стандартинформ, 2012. — 19 с.
6. Мальцев Г. Н., Назаров А. В., Якимов В. Л. Алгоритм реконструкции фазового пространства и его применение для создания прогнозных моделей // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2. С. 33–39.
7. ГОСТ 27.310-95. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. — М.: Изд-во стандартов, 2001. — 23 с.
8. Кирилин А. Н., Ахметов Р. Н., Сологуб А. Н., Макаров В. П. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные

технологии. — М.: Машиностроение, 2010. — 384 с.

9. Меньшиков В. А. Полигонные испытания. Ч. II. — М.: КОСМО, 1999. — 237 с.

10. Микрин Е. А., Пелихов В. П. Анализ нештатных ситуаций и критичности программного обеспечения в проекте международной космической станции // Проблемы управления. 2003. № 4. С. 52–54.

11. Карпов Ю. Г. Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic 5. — СПб.: БХВ-Петербург, 2006. — 400 с.

12. Талалаев А. А., Фраленко В. П., Хачумов В. М. Обзор стандартов и концепция построения средств мониторинга, контроля и диагностики космического аппарата // Программные системы: теория и приложения. 2015. № 3. С. 21–43.

UDC 629.76.05

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.34

Simulation Modeling of Diagnostics of a Highly Autonomous Complex Technical System

Maltsev G. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, georgy_maltsev@mail.ru.

Nazarov A. V.^a, Dr. Sc., Tech., Associate Professor, naz_av@mail.ru.

Yakimov V. L.^a, PhD, Tech., Deputy Head of a Sub-Faculty, yakim78@yandex.ru.

^aA. F. Mozhaiskii Military Space Academy, 13, Zhdanovskaia St., 197198, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The goal is to develop a simulation model of diagnosing the condition of a complex technical system with a high level of operational autonomy. The system can stay in a partially working condition. Possible errors in the autonomous monitoring of the condition and diagnosis should be taken into account. **Results:** A graph of complex technical system states with a high level of operational autonomy has been developed. We have substantiated the structure of a system diagnostics simulation model, using built-in tools of current technical condition control and self-diagnostics, and an external diagnostics subsystem performing a periodic in-depth inspection. We have studied how the reliability of the diagnostics affects the size of the reliable autonomous operation interval of the analyzed system. An example is given of simulating the diagnostics of spacecraft onboard equipment in AnyLogic environment. It is shown how important it is to improve built-in self-diagnostics of highly autonomous complex technical systems and the methods of profound analysis of their condition. **Practical relevance:** The developed simulation model can be used to assess how often you should carry out in-depth control of highly autonomous complex technical systems under specified indicators of self-diagnostics reliability.

Keywords — Complex Technical System, Technical Condition, Diagnostics, Autonomous Operation.

References

- Pashkovskij G. S. *Zadachi optimal'nogo obnaruzheniia i poiska otkazov v REA* [Problems of Optimum Detection and Search of Refusals in Radio Electronic Equipment]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1981. 298 p. (In Russian).
- Aleksandrovskaia L. N., Afanas'ev A. P., Lisov A. A. *Sovremennye metody obespecheniia bezotkaznosti slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Modern Methods of Ensuring Non-Failure Operation of Difficult Technical Systems]. Moscow, Logos Publ., 2001. 208 p. (In Russian).
- Zverev G. Ja. *Otsenka nadezhnosti izdeliia v protsesse ekspluatatsii* [Assessment of Reliability of a Product in Use]. Moscow, Lenand Publ., 2010. 96 p. (In Russian).
- State Standard P ISO 13374-2-2011. Control of a State and Diagnostics of Cars. Processing, Transfer and Data Presentation. Part 2. Data Processing. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 27 p. (In Russian).
- State Standard P ISO 13381-1-2011. Forecasting of Technical Condition. Part 1. General Management. Moscow, Standartinform Publ., 2012. 19 p. (In Russian).
- Maltsev G. N., Nazarov A. V., Yakimov V. L. A Reconstruction Algorithm for a Dynamic System Phase Space and its Application for Development of Predictive Models. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 2(69), pp. 33–39 (In Russian).
- State Standard 27.310-95. Analysis of Types, Consequences and Criticality of Failures. Basic Provisions. Moscow, Standartov Publ., 2001. 23 p. (In Russian).
- Kirilin A. N., Akhmetov R. N., Sologub A. N., Makarov V. P. *Metody obespecheniia zhivuchesti nizkoorbital'nykh avtomaticheskikh KA zondirovaniia Zemli: matematicheskie modeli, komp'iuternye tekhnologii* [Methods of Support of Survivability of Low-Orbit Automatic Spacecrafts of Earth Sounding: Mathematical Models, Computer Technologies]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 384 p. (In Russian).
- Menshikov V. A. *Poligonnye ispytaniia. Chast' II* [Ground Tests. Part II]. Moscow, KOSMO Publ., 1999. 237 p. (In Russian).
- Mikrin E. A., Pelikhov V. P. Contingency and Software Criticality Analysis in International Space Station Projects. *Problemy upravleniia*, 2003, no. 4, pp. 52–54 (In Russian).
- Karpov Yu. G. *Imitatsionnoe modelirovanie sistem. Vvedenie v modelirovanie s AnyLogic 5* [Simulation Systems. Introduction to Modeling with AnyLogic 5]. Saint-Petersburg, BKhV-Peterburg Publ., 2006. 400 p. (In Russian).
- Talalaev A. A., Fralenko V. P., Khachumov V. M. Review of Standards and the Conceptual Design of Tools for Spacecraft Monitoring, Control and Diagnostics. *Programmnye sistemy: teoriya i prilozheniya*, 2015, no. 6, pp. 21–43 (In Russian).

МОДЕЛЬ ФОНА ПРИ ДЕТЕКТИРОВАНИИ ДЫМА ПО ВИДЕОПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЯМ НА ОТКРЫТЫХ ПРОСТРАНСТВАХ

А. В. Пятаева^а, аспирант

М. Н. Фаворская^а, доктор техн. наук, профессор

^аСибирский государственный аэрокосмический университет им. академика М. Ф. Решетнёва

Постановка проблемы: раннее обнаружение дыма как объективного признака начала пожара на видеопоследовательностях, полученных от систем внешнего видеонаблюдения, имеет существенное значение, так как дым обычно становится видимым раньше пламени. Преимуществом систем оптического видеонаблюдения при детектировании дыма является их невысокая стоимость, в связи с чем видеокамеры получили широкое распространение как в городских условиях, так и при наземном мониторинге лесных массивов с помощью специально установленных противопожарных вышек. Основными признаками визуального обнаружения дыма являются наличие движения, специфические цвет, текстура и форма объектов на видеоизображении. Качество работы алгоритма выделения дыма по видеопоследовательности зависит от разрешения исходного изображения и удаленности объектов съемки. **Цель:** построение моделей фона сцен ближнего и дальнего планов с учетом атмосферных и метеорологических условий. **Результаты:** исследованы два подхода к определению глубины сцены с учетом закона прямого затухания световых волн и влияния атмосферного света на открытых пространствах, а именно использование темного канала и вычисление карты передачи с применением случайного марковского поля. Метод определения глубины сцены с помощью модели случайного марковского поля показал лучшие результаты по сравнению с методом получения темного канала в связи с тем, что в методе получения темного канала интенсивность пиксела анализируется без учета окружения. **Практическая значимость:** найденная глубина сцены позволяет разделить изображения на две группы: сцены ближнего (примерно до 500 м) и дальнего (более 500 м) плана, где могут наблюдаться «ближний» и «дальний» дым соответственно. Для проведения экспериментальных исследований использовано 100 изображений, содержащих сцены ближнего плана, и 100 изображений, содержащих сцены дальнего плана. Эффективность предлагаемого метода обусловлена применением различных наборов признаков дыма для сцен ближнего и дальнего плана.

Ключевые слова — модель фона, глубина сцены, модель атмосферного рассеяния, темный канал, марковское случайное поле, визуальное детектирование дыма.

Введение

Раннее обнаружение дыма как объективного признака начинающегося пожара является важной задачей экологического мониторинга как для лесных массивов, так и для городских территорий. Традиционные способы детектирования дыма, основанные на тепловых детекторах или химическом анализе продуктов сгорания, становятся бесполезными на открытых пространствах, так как вследствие ряда метеорологических факторов (ветер, дождь, снег и т. д.) происходит быстрое уменьшение концентрации продуктов сгорания в воздухе. Мониторинг пожара на открытых пространствах возможен с использованием систем видеонаблюдения, которые позволяют детектировать дым на значительном расстоянии и независимо от источника дыма (лесной или техногенный пожар). Существующие методы детектирования дыма по видеопоследовательности, как правило, используют несколько признаков, например, применение цветовых и текстурных характеристик дыма, нахождение движения в сцене, мерцание, определение краев. Однако реальные условия съемки вносят артефакты, затрудняющие обнаружение такой сложной

динамической текстуры, как дым. На качество детектирования дыма оказывают значительное влияние особенности анализируемого видеоизображения, такие как удаленность объекта съемки и разрешение.

Модель атмосферного рассеяния

Формирование исходного изображения, получаемого из видеопоследовательности на открытых пространствах, выполняется с учетом закона затухания световых волн и влияния атмосферного света. Под атмосферным светом понимается окружающий свет, отраженный в прямой видимости с помощью атмосферных частиц (рис. 1). Этот процесс можно представить с помощью модели атмосферного рассеяния [1], определяемой выражением

$$I(x) = J(x)e^{-\delta d} + A(1 - e^{-\delta d}), \quad (1)$$

где $I(x)$ — наблюдаемое изображение; $J(x)$ — яркость сцены; A — глобальный атмосферный свет; δ — коэффициент рассеяния в пикселе $x=(x, y)$; d — расстояние от камеры до сцены.

В уравнении (1) первый член представляет собой модель затухания света. Из-за эффекта рас-



■ Рис. 1. Модель атмосферного рассеяния

сеяния и поглощения атмосферных частиц часть света, отраженная от поверхности объектов, рассеивается или поглощается, а оставшаяся часть попадает непосредственно в объектив видеокамеры. Интенсивность света экспоненциально убывает с увеличением расстояния до объекта съемки. Второй член представляет собой модель атмосферного света, влияющего на формирование изображения. Под влиянием атмосферных частиц рассеяния свойства атмосферного света изменяются. С увеличением расстояния распространения интенсивность атмосферного света постепенно увеличивается. Часть выражения (1), обозначенная $t(x)$, представляет собой карту светопередачи, которая показывает относительную часть света, необходимую для прохождения пути между наблюдателем и точкой поверхности без рассеяния:

$$t(x) = e^{-\delta d}. \quad (2)$$

Карта светопередачи описывает распространение той части света, которая не рассеивается и достигает видеокамеры. Она является непрерывной функцией расстояния, следовательно, $t(x)$ отражает информацию о глубине сцены.

Модель атмосферного рассеяния содержит три неизвестных параметра, что определяет бесконечное количество решений. В связи с этим в методах удаления атмосферной дымки, предложенных в последние годы, само изображение используется для построения карты светопередачи при удалении дымки на изображении или для определения глубины сцены. В работе [2] для устранения эффекта дымки использован способ максимизации локального контраста изображения; в работе [3] с помощью методов, основанных на математической статистике, авторы оценивали светопередачу и альбедо сцены; в работе [4] был предложен метод удаления дымки, основанный на темном канале.

В настоящей работе для определения расстояния до объекта съемки представлено два подхода: использование темного канала для определения глубины сцены и вычисление карты передачи с применением случайного марковского поля.

Метод получения темного канала изображения

Метод получения темного канала основан на наблюдении о затемнении исходного изображения [4]. Такие наблюдения показывают, что в большинстве локальных областей, которые не охватывают небо, некоторые пиксели (так называемые «темные» пиксели) имеют очень низкую интенсивность, по меньшей мере, в одном из цветовых каналов цветовой схемы RGB. Пиксели изображения, соответствующие объектам сцены, которые находятся далеко от наблюдателя, обладают более низкой интенсивностью, чем пиксели, соответствующие близко расположенным объектам сцены. Изменение интенсивности темных пикселей происходит под влиянием атмосферного света. В основном малые значения интенсивности в темном канале возникают из-за трех факторов: наличия теней окружающих объектов (техногенных и природных), поверхностей с неравномерным распределением цветовых компонент (зеленая растительность) и темных поверхностей объектов.

Для получения темного канала исходное изображение разбивается на блоки размером 15×15 пикселей, затем для каждого пиксела вычисляется функция $I^{dark}(x)$:

$$I^{dark}(x) = \min_{C \in \{r, g, b\}} \left(\min_{y \in \Omega(x)} I_C(y) \right), \quad (3)$$

где C — цветовой канал изображения; I_C — значение цветового канала изображения $I(x)$; $\Omega(x)$ — локальный блок с центром в точке x . Визуально интенсивность темного канала представляет приближенное значение толщины дымки.

Для получения значений атмосферного света по каждому из трех цветовых компонент выбираются первые 0,1 % самых ярких пикселей в темном канале. В качестве значения интенсивности атмосферного света A выбирается максимальное значение интенсивности из отобранных пикселей. Интенсивность атмосферного света

$A^C = \{A^R, A^G, A^B\}$ рассчитывается для каждого цветового канала изображения в цветовой модели RGB. Благодаря влиянию атмосферного света изображение, содержащее дальние планы (изображение с дымкой), светлее, чем изображение ближнего плана, так как значение светопередачи в этом случае ниже.

Особенностью изображений, полученных на открытых пространствах, является то, что дымка на таких изображениях присутствует всегда, так как даже в ясные дни атмосфера содержит различные частицы, кроме того, наличие дымки является ключевой особенностью, с помощью которой человеческое зрение способно воспринимать глубину снимка [5, 6]. Это явление называется воздушной перспективой. При полном отсутствии дымки на изображении оно будет казаться неестественным, и ощущение глубины изображения может быть потеряно. Природное явление воздушной перспективы учитывается за счет использования постоянного параметра $0 < \omega < 1$ при вычислении светопередачи $t(x)$. В работе использовано значение параметра $\omega = 0,75$. Значение светопередачи $t(x)$ рассчитывается следующим образом [4]:

$$t(x) = 1 - \omega \min_C \left(\min_{y \in \Omega(x)} \frac{I_C(y)}{A^C} \right), \quad (4)$$

где A^C — интенсивность атмосферного света в цветовом канале C .

Подставляя полученное значение светопередачи (4) в выражение (2), вычисляем расстояние до объекта съемки:

$$d = \frac{1}{\delta} \ln(t) = \frac{1}{\delta} \ln \left(1 - \omega \min_C \left(\min_{y \in \Psi(x)} \frac{I^C(y)}{A^C} \right) \right), \quad (5)$$

где δ — коэффициент рассеяния в пикселе $x = (x, y)$. Далее значение глубины сцены рассчитывается с использованием выражения (5) с точностью до неизвестного параметра рассеяния δ .

Определение глубины сцены с использованием случайного марковского поля

Определение глубины сцены с использованием случайного марковского поля выполняется в два этапа. Сначала выполняется сегментация с помощью алгоритма сдвига среднего значения, затем строится карта светопередачи с использованием модели случайного марковского поля.

Сегментация методом сдвига среднего значения

На первом этапе для оценки карты передачи и расширения знаний о структуре изображения выполняется сегментация областей изображения

с помощью алгоритма сдвига среднего значения [7–9]. Алгоритм сдвига среднего значения позволяет автоматически разделить изображение на области, сокращая при этом число базовых сущностей. Это особенно важно для изображений, полученных в результате съемки на открытых пространствах, так как такие изображения содержат различные объекты: небо, горы, здания, водные объекты, людей, животных и др. К особенностям алгоритма относится возможность разделения исходного изображения на области, примерно однородные по яркости. Алгоритм сдвига среднего значения применяется здесь для автоматической классификации регионов изображения.

Метод сдвига среднего значения группирует регионы, объединяя пиксели с близкими значениями признаков в однородные области. В качестве координат в пространстве признаков выбраны координаты пиксела (x, y) и значения интенсивности цветовых каналов в цветовой схеме RGB. Распределение пикселей в соответствии с выбранными признаками может быть описано функцией плотности распределения [10]

$$f(\mathbf{x}) = \frac{1}{Nh^d} \sum_{i=1}^N \left(K \left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{h} \right) \right), \quad (6)$$

где N — число пикселей изображения; h — радиус сферы, содержащей пиксели с признаками \mathbf{x}_i ; \mathbf{x}_i — вектор признаков пиксела с индексом i ; d — количество признаков; $K(\mathbf{x}_i)$ — ядро Епанечникова:

$$K(\mathbf{x}_i) = \begin{cases} \frac{1}{2c_d} (d+2)(1 - \mathbf{x}^T \mathbf{x}), & \text{если } \mathbf{x}^T \mathbf{x} < 1 \\ 0 & \text{в остальных случаях} \end{cases}, \quad (7)$$

где c_d — объем d -мерной сферы с единичным радиусом.

Пиксели, принадлежащие к одному локальному максимуму, объединяются в один регион. Чтобы определить, к какому из центров сгущения относится пиксел, необходимо двигаться по градиенту функции плотности $f(\mathbf{x})$ до нахождения ближайшего локального максимума:

$$\begin{aligned} \text{grad}(f(\mathbf{x})) &= \frac{1}{Nh^d} \sum_{i=1}^N \text{grad} \left(K \left(\frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_i}{h} \right) \right) = \\ &= \frac{1}{N(h^d c_d)} \frac{d+2}{h^2} \sum_{\mathbf{x}_i \in S_h(\mathbf{x})} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) = \\ &= \frac{n_{h,\mathbf{x}}}{N(h^d c_d)} \frac{d+2}{h^2} \left(\frac{1}{n_{h,\mathbf{x}}} \sum_{\mathbf{x}_i \in S_h(\mathbf{x})} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i) \right), \quad (8) \end{aligned}$$

где $h^d c_d$ — объем d -мерной сферы с радиусом h ; $S_h(\mathbf{x})$ — гиперсфера, содержащая пиксели $n_{h,\mathbf{x}}$, удовлетворяющие вектору признаков \mathbf{x} .

Для оценки градиента функции плотности можно использовать вектор среднего сдвига $M_h(\mathbf{x})$, определяемый выражением

$$M_h(\mathbf{x}) = \frac{1}{n_{h,\mathbf{x}}} \sum_{\mathbf{x}_i \in S_h(\mathbf{x})} (\mathbf{x} - \mathbf{x}_i), \quad (9)$$

тогда градиент функции плотности распределения пикселей по признакам примет вид

$$\text{grad}(f(\mathbf{x})) = f(\mathbf{x}) \frac{d+2}{h^2} M_h(\mathbf{x}). \quad (10)$$

Таким образом, для определения принадлежности пиксела к одному из классов достаточно вычислить значение вектора среднего сдвига $M_h(\mathbf{x})$. При выборе в качестве признаков координат пикселей и интенсивностей по цветам в один регион будут объединяться пиксели с близкими цветами и расположенные недалеко друг от друга [11].

Построение карты светопередачи с использованием модели случайного марковского поля

После получения результатов сегментации для оценки глубины сцены используется метод разделения изображения на области, соответствующие разным уровням глубины сцены.

Для разделения исходного изображения на области, находящиеся на различном расстоянии от наблюдателя, используется набор из тридцати двух меток z_i . При этом значение карты светопередачи $t(z)$ связано с меткой z_i , $L = \{0, 1, 2, \dots, l\}$ — набор меток карты светопередачи, $t(z) = \{0, 1/l, 2/l, \dots, 1\}$. Перед назначением меток исходное изображение конвертируется из цветового пространства RGB в полутоновое изображение. Наиболее вероятная метка области z^* минимизирует значение ассоциированной функции энергии [1]

$$E(z) = \sum_{i \in P} E_i(z_i) + \sum_{(i,j) \in N} E_{ij}(z_i, z_j), \quad (11)$$

где P — набор пикселей в неизвестной передаче $t(z)$; N — набор пар пикселей, определяющих четырех соседей окрестности. Унарная функция E_i показывает возможность пиксела i иметь передачу $t_i(z)$, связанную с меткой z_i :

$$E_i(z_i) = |I'_i \times \omega - L(z_i)|, \quad (12)$$

где I'_i — интенсивность пиксела изображения в оттенках серого; $L(z_i)$ — элемент из набора меток L ; ω — параметр, введенный для нормализации значений I'_i и $L(z_i)$.

Слагаемое $E_i(z_i)$ выражения (11) определяет соответствие пиксела тому или иному классу и может отражать следующую информацию [12]:

— цветовая модель показывает, насколько появление тех или иных цветов более вероятно в данном классе;

— позиционная модель отражает априорные предположения о расположении данного класса на изображении;

— текстурная модель определяет, насколько текстура окрестности пиксела соответствует данному пикселу.

Слагаемое $E_{ij}(z_i, z_j)$ показывает возможность соседних пикселей иметь ту же глубину, что и данный пиксел, и задается функцией минимальной стоимости [2]

$$E_{ij}(z_i, z_j) = g |z_i - z_j|. \quad (13)$$

Наблюдения показывают, что объекты, которые расположены ближе к верхней части изображения, как правило, дальше объектов, которые расположены в нижней части изображения, так что если точка j выше точки i на изображении, то и расстояние от точки j до наблюдателя больше соответствующего расстояния для точки i , т. е. $d_j > d_i$. Следовательно, выполняются неравенства $t_i \leq t_j$ и $z_i \leq z_j$. Любой паре меток, которая нарушает эту тенденцию, назначается стоимость $s > 0$. Таким образом, выражение (13) преобразуется в формулу

$$E_{ij}(z_i, z_j) = \begin{cases} s, & \text{если } z_i < z_j \\ g |z_i - z_j| & \text{в противном случае} \end{cases}. \quad (14)$$

В выражении (14) разность $g|z_i - z_j|$ контролирует степень детализации изображений и в работе принимает значение 0,01. Штрафная стоимость $s = 100$.

С помощью подстановки выражений (12) и (14) в формулу (11) вычисляется значение карты передачи в точке i . Собственные значения карты светопередачи и расстояние от наблюдателя до объекта для каждого пиксела изображения могут быть рассчитаны следующим образом:

$$t_i(z) = 255 - (z_i - 1) \times 8; \quad (15)$$

$$d = \frac{1}{8} \ln(t_i(z)) = \frac{1}{8} \ln(255 - (z_i - 1) \times 8). \quad (16)$$

Таким образом, исходное изображение делится на области, представляющие собой пять уровней серого и соответствующие уровням расстояния от наблюдателя до объекта наблюдения.

Экспериментальные исследования

В соответствии с метеорологической дальностью видимости в табл. 1 приведены десять уровней градации видимости, расстояние видимости и их коэффициенты рассеяния [13].

Будем считать изображениями с малой глубиной сцены такие изображения, для которых рассчитанная дистанция не превышает расстоя-

ние 500 м. При проведении экспериментальных исследований использовано 200 изображений, полученных на открытых пространствах, среди которых 100 изображений содержали сцены ближнего плана и 100 изображений включали сцены дальнего плана. Примеры изображений приведены на рис. 2, а и б.

Результаты определения глубины сцены для изображений ближнего и дальнего плана для методов темного канала и случайного марковского поля приведены в табл. 2.

По результатам экспериментальных исследований видно, что метод определения глубины

сцены с помощью модели случайного марковского поля показывает лучшие результаты по сравнению с методом получения темного канала, так как темный канал теряет эффективность, когда интенсивность изображения близка к интенсивности атмосферного света. Кроме того, метод темного канала дает ошибку определения глубины на изображениях, содержащих небо. Скорость обработки одного изображения с использованием метода случайных марковских полей превосходит скорость обработки методом получения темного канала и составляет в среднем 12 и 15 мс соответственно.

■ Таблица 1. Метеорологическая градация видимости и средние коэффициенты рассеяния

Кодовый номер	Погодные условия	Дистанция видимости	Коэффициент рассеяния, км ⁻¹
1	Плотный туман	Менее 50 м	Более 78,2
2	Густой туман	50–200 м	78,2–19,6
3	Умеренный туман	200–500 м	19,6–7,82
4	Легкий туман	500 м–1 км	7,82–3,91
5	Слабый туман	1–2 км	3,91–1,96
6	Дымка	2–4 км	1,96–0,954
7	Легкая дымка	4–10 км	0,954–0,391
8	Ясно	10–20 км	0,391–0,196
9	Очень ясно	20–50 км	0,196–0,078
10	Совершенно ясно	Более 50 км	0,0141



■ Рис. 2. Изображения с большой (а) и малой (б) глубиной сцены

■ Таблица 2. Результаты определения глубины сцены

Изображение	Метод получения темного канала			Метод с использованием случайного марковского поля		
	TR	FRR	FAR	TR	FRR	FAR
Малая глубина сцены	0,86	0,14	0,128	1	0	0,003
Большая глубина сцены	0,89	0,11	0,109	1	0	0,056

TR — точность распознавания; FRR — ошибка первого рода; FAR — ошибка второго рода.

Заключение

Эффективность детектирования дыма на видеопоследовательностях определяется условиями съемки на открытых пространствах, в частности глубиной сцены. В работе рассматривается модель атмосферного рассеивания с учетом закона затухания световых волн и влияния атмосферного света. Для устранения дымки на изображениях дальнего плана были рассмотрены два подхода, связанные с использованием темного канала для определения глубины сцены и вычислением карты передачи с применением случайного марковского поля. Подробно рассмотрен метод получения темного канала изображения, позволяющий рассчитывать значения глубины сцены с точностью до неизвестного параметра рассеяния. Разработан метод определения глубины сцены с использованием случайного марковского поля, который выполняется в два этапа: сегментации с помощью алгоритма сдвиг

га среднего значения и построения карты светопередачи с использованием модели случайного марковского поля. Выведены соответствующие выражения, позволяющие оценивать глубину сцены.

Экспериментальные исследования заключались в оценке глубины сцены по методу получения темного канала и методу использования случайного марковского поля. Среди 200 изображений 100 содержали сцены ближнего плана и 100 включали сцены дальнего плана. Метод определения глубины сцены с помощью модели случайного марковского поля показал лучшие результаты по сравнению с методом получения темного канала. Это связано с тем, что в методе темного канала интенсивность пиксела анализируется без учета окружения. Точность распознавания вида сцен с использованием метода случайных марковских полей достигала 100 % и выполнялась быстрее по сравнению с применением метода получения темного канала.

Литература

1. Guo F., Tang J., Xiao X. Foggy Scene Rendering Based on Transmission Map Estimation // International Journal of Computer Games Technology. 2014. Vol. 2014. Article ID 308629. P. 1–13.
2. Tan R. T. Visibility in Bad Weather from a Single Image // The Proc. of the 26th IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '08). 2008. P. 1–8.
3. Fattal R. Single Image Dehazing // ACM Transactions on Graphics. 2008. Vol. 27. N 3. P. 1–9.
4. He K., Sun J., Tang X. Single Image Haze Removal using Dark Channel Prior // Journal IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2011. Vol. 33. N 12. P. 2341–2353.
5. Goldstein E. B. Sensation and Perception. — London: Cengage Learning, 2013. — 496 p.
6. Preetham A. J., Shirley P., Smits B. A Practical Analytic Model for Daylight // The Proc. of the 26th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques. 1999. P. 91–100.
7. He Z., et al. A Mean-Shift Algorithm for Large-Scale Planar Maximal Covering Location Problems/ Z. He, B. Fan, T. C. E. Cheng, S. Y. Wang, C. H. Tan // European Journal of Operational Research. 2016. Vol. 250. N 1. P. 65–76.
8. Zheng H., Mao X., Chen L., Liang X. Adaptive Edge-Based Mean Shift for Drastic Change Gray Target Tracking // Optik. Intern. Journal for Light and Electron Optics. 2015. Vol. 126. N 23. P. 3859–3867.
9. Zhang X., et al. An Adaptive Mean Shift Clustering Algorithm Based on Locality-Sensitive Hashing / X. Zhang, Y. Cui, D. Li, X. Liu, F. Zhang // Optik. Intern. Journal for Light and Electron Optics. 2015. Vol. 123. N 20. P. 1891–1894.
10. Comaniciu D., Meer P. Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. N 5. P. 603–619.
11. Rother C., Kolmogorov V. A. Blake Grabcut — Interactive Foreground Extraction Using Iterated Graph Cuts // ACM TOG. 2004. Vol. 23. N 3. P. 309–314.
12. Ветров Д. А., Кропотов Д. П. Алгоритмы выбора моделей и построения коллективных решений в задачах классификации, основанные на принципе устойчивости. — М.: КомКнига, 2007. — 112 с.
13. Babari R., et al. A Model-Driven Approach to Estimate Atmospheric Visibility with Ordinary Cameras/ R. Babari, N. Hautiere, E. Dumont, R. Bremond, N. Paparoditis // Atmospheric Environment. 2011. Vol. 45. N 30. P. 5316–5324.

UDC 004.932.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.44

Background Model for Video-Based Smoke Detection in Outdoor ScenesPyataeva A. V.^a, Post-Graduate Student, anna4u@list.ruFavorskaya M. N.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, favorskaya@sibsau.ru^aSiberian State Aerospace University named after academician M. F. Reshetnev, 31, Krasnoyarsky Rabochy St., 660037, Krasnoyarsk, Russian Federation

Introduction: Early smoke detection on videos obtained from outdoor video cameras is very important because smoke usually becomes visible earlier than flame and can be considered an objective evidence of a fire. Optical surveillance systems are cheap and therefore commonly used for smoke detection both in urban areas and in terrestrial forests where special fire watchtowers are maintained. Smoke is detected when objects on the video have specific motion, color, texture and shape. The resulting quality of the smoke detection algorithm depends on the frame resolution and on the distance to the objects being shot. **Purpose:** Background models should be build for the close and remote scenes taking into account the atmospheric and meteorological conditions. **Results:** We have studied two approaches to determining the scene depth: using the dark channel and a Markov random field, in both cases taking into account the law of direct attenuation of light waves in open spaces and the influence of atmospheric light. The method based on a Markov random field provided better results as compared to the method of the dark channel, as in the latter the pixel intensity is analyzed without considering the environment. **Practical relevance:** The found scene depth allows us to split the images into two groups: close scenes (up to about 500 m) and remote scenes (more than 500 m), where “close” and “far” smoke can be watched, respectively. During the experiments, we analyzed 100 images with close scenes and 100 images with remote scenes. The proposed method is efficient because different sets of smoke features are used for close and remote scenes.

Keywords — Background Model, Scene Depth, Atmospheric Scattering Model, Dark Channel, Markov Random Field, Video-Based Smoke Detection.

References

- Guo F., Tang J., Xiao X. Foggy Scene Rendering Based on Transmission Map Estimation. *International Journal of Computer Games Technology*, 2014, vol. 2014, Article ID 308629, pp. 1–13.
- Tan R. T. Visibility in Bad weather from a Single Image. *Proc. of the 26th IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR '08)*, 2008, pp. 1–8.
- Fattal R. Single Image Dehazing. *ACM Trans Graphics*, 2008, vol. 27, no. 3, pp. 1–9.
- He K., Sun J., Tang X. Single Image Haze Removal Using Dark Channel Prior. *Journal IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2011, vol. 33, no. 12, pp. 2341–2353.
- Goldstein E. B. *Sensation and Perception*. London, Cengage Learning, 2013. 496 p.
- Preetham A. J., Shirley P., Smits B. A Practical Analytic Model for Daylight. *Proc. of the 26th Annual Conf. on Computer Graphics and Interactive Techniques*, 1999, pp. 91–100.
- He Z., Fan B., Cheng T. C. E., Wang S. Y., Tan C. H. A Mean-Shift Algorithm for Large-Scale Planar Maximal Covering Location Problems. *European Journal of Operational Research*, 2016, vol. 250, no. 1, pp. 65–76.
- Zheng H., Mao X., Chen L., Liang X. Adaptive Edge-Based Mean Shift for Drastic Change Gray Target Tracking. *Optik. Intern. Journal for Light and Electron Optics*, 2015, vol. 126, no. 23, pp. 3859–3867.
- Zhang X., Cui Y., Li D., Liu X., Zhang F. An Adaptive Mean Shift Clustering Algorithm Based on Locality-Sensitive Hashing. *Optik. Intern. Journal for Light and Electron Optics*, 2015, vol. 123, no. 20, pp. 1891–1894.
- Comaniciu D., Meer P. Mean Shift: A Robust Approach Toward Feature Space Analysis. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, no. 5, pp. 603–619.
- Rother C., Kolmogorov V. A. Blake Grabcut — Interactive Foreground Extraction Using Iterated Graph Cuts. *ACM TOG*, 2004, vol. 23, no. 3, pp. 309–314.
- Vetrov D. A., Kropotov D. P. *Algoritmy vybora modelei i postroeniia kollektivnykh reshenii v zadachakh klassifikatsii, osnovannye na printsipe ustoychivosti* [Algorithms for Model Selection and the Construction of Collective Solutions in Classification Tasks Based on the Robust Principle]. Moscow, KomKniga Publ., 2007. 112 p. (In Russian).
- Babari R., Hautiere N., Dumont E., Bremond R., Paparoditis N. A Model-Driven Approach to Estimate Atmospheric Visibility with Ordinary Cameras. *Atmospheric Environment*, 2011, vol. 45, no. 30, pp. 5316–5324.

УДК 621.394

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.51

МОДЕЛЬ ИСТОЧНИКА ТРАФИКА С ИЗМЕНЯЮЩЕЙСЯ СКОРОСТЬЮ ПЕРЕДАЧИ

Р. Б. Трегубов^а, канд. техн. наукА. Н. Орешин^а, канд. техн. наук, доцент^аАкадемия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел, РФ

Постановка проблемы: особенности передачи импульсного (пачечного) трафика данных в мультисервисных сетях связи обуславливают необходимость разработки математических методов расчета эффективной скорости передачи протокольных блоков данных, позволяющих оценить минимально необходимую пропускную способность каналов связи в заданном направлении. **Цель исследования:** обеспечение качества обслуживания мультисервисного трафика в условиях ограниченной пропускной способности каналов связи. **Методы:** скорость мультисервисного трафика представляется в виде непрерывной случайной величины, функция распределения которой описывается смесью смещенных и масштабированных бета-распределений. **Результаты:** представлена оригинальная функция распределения непрерывной случайной величины, описывающая скорость передачи как одиночных, так и агрегированных потоков протокольных блоков данных. Отличительной особенностью предлагаемого в работе решения является то, что оно позволяет определить эффективную скорость передачи протокольных блоков данных с помощью обратной функции смеси смещенных и масштабированных бета-распределений. **Практическая значимость:** полученные результаты могут найти применение в задачах анализа и синтеза мультисервисных сетей связи.

Ключевые слова — мультисервисная сеть связи, модель источника трафика, поток протокольных блоков данных, эффективная скорость передачи протокольных блоков данных.

Введение

Лавинообразный рост потребностей в современных инфокоммуникационных услугах, а также отстающее развитие инфраструктуры связи, особенно в регионах Сибири и Дальнего Востока, определяют особенности решения задач анализа и синтеза сетей передачи мультисервисного трафика. Передаваемый мультисервисный трафик характеризуется высокой степенью самоподобия и нестационарности, что обусловлено как нестационарной природой самих источников трафика (ИТ), так и нестационарностью процессов накопления, обслуживания и передачи протокольных блоков данных (ПБД) по разнородным линиям связи. Особенно остро проблема обслуживания мультисервисного трафика, как правило, стоит в случае использования в качестве транспортной подсистемы сети спутниковой связи, радиоресурс которой строго ограничен [1, 2]. В этой связи исследования, направленные на обеспечение качества обслуживания мультисервисного трафика в условиях ограниченности пропускной способности каналов связи, являются актуальными [3, 4].

Источники трафика мультисервисных сетей связи (МСС) характеризуются двумя группами параметров. К первой группе относятся параметры, определяющие активность ИТ [5]:

— среднее время сеанса связи $M(t_{\text{сеанса}})$, с;

— среднее время нахождения ИТ в свободном состоянии $M(t_{\text{св.сост}})$, с;

— интенсивность поступающей нагрузки от одного ИТ, Эрл,

$$z = \frac{M(t_{\text{сеанса}})}{M(t_{\text{сеанса}}) + M(t_{\text{св.сост}})}. \quad (1)$$

Вторая группа параметров характеризует скорость передачи ПБД [5]:

— средняя скорость передачи ПБД $M[b(t, t + \tau)]$ или $M[b(\tau)]$, Кбит/с;

— максимальная (пиковая) скорость передачи ПБД $\max[b(t, t + \tau)]$ или $\max[b(\tau)]$, Кбит/с;

— минимальная скорость передачи ПБД $\min[b(t, t + \tau)]$ или $\min[b(\tau)]$, Кбит/с;

— средний размер ПБД L , бит или байт;

— коэффициент пачечности $\frac{\max[b(\tau)]}{M[b(\tau)]}$.

Каналы связи МСС имеют конечное значение пропускной способности C , поэтому, когда мгновенная скорость передачи ПБД $b(t)$ превосходит значение C , качество обслуживания снижается. Например, если для управления интенсивностью передаваемых по сети связи ПБД используется механизм Traffic Shaping, то часть ПБД, не удовлетворяющая согласованной пропускной способности C , задерживается путем постановки «неконформных» ПБД в очередь. А механизм Traffic Policing предполагает отбрасывание «неконформных» ПБД, интенсивность поступления которых выше согласованной пропускной способности C .

Использование в процессе проектирования МСС пиковой (максимальной) скорости передачи ПБД $\max[b(\tau)]$ обеспечивает нулевую вероятность

переполнения буферов узлов коммутации, однако при этом КПД канала связи будет достаточно малым. В свою очередь использование средней скорости передачи ПБД $M[b(\tau)]$, напротив, ведет практически к полному занятию ресурса канала связи, однако в этом случае растут потери и сетевая задержка ПБД [6].

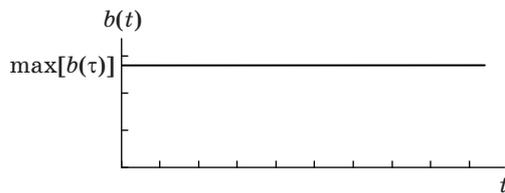
В ряде работ [6–8] потребность в канальном ресурсе МСС предлагается рассчитывать с использованием значения, лежащего между средней $M[b(\tau)]$ и пиковой (максимальной) $\max[b(\tau)]$ скоростями передачи ПБД. В теории телеграфика соответствующая характеристика получила название эффективной скорости передачи (Effective Bandwidths) ПБД $b_{эф}(\tau)$.

Понятие эффективной скорости передачи ПБД $b_{эф}(\tau)$ позволяет аналитически обосновать минимально необходимую пропускную способность, резервируемую в канале связи для обслуживания мультисервисного трафика.

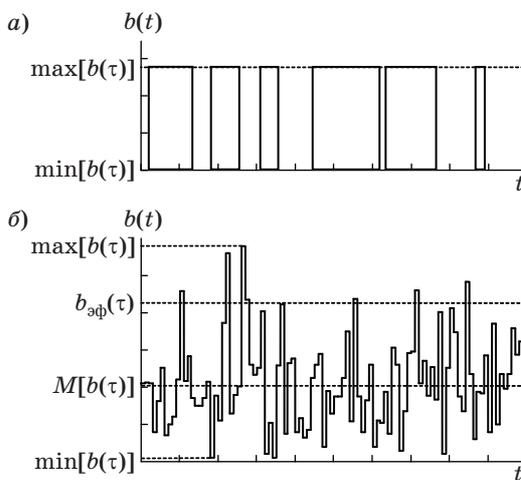
Общие положения и постановка задачи исследования

Все ИТ можно разделить на две группы [4]:

- с постоянной скоростью передачи ПБД (рис. 1);
- с изменяющейся скоростью передачи ПБД (рис. 2, а и б).



■ Рис. 1. ИТ с постоянной скоростью передачи ПБД



■ Рис. 2. ИТ с изменяющейся скоростью передачи ПБД стартстопного (а) и непрерывного (б) типа

В свою очередь ИТ с изменяющейся скоростью передачи ПБД также делятся на две группы [4]:

- стартстопного типа (см. рис. 2, а);
- непрерывного типа (см. рис. 2, б).

Наибольшей общностью обладают модели ИТ с изменяющейся скоростью передачи ПБД непрерывного типа.

Нами поставлена задача разработать аналитическую модель ИТ с изменяющейся скоростью передачи ПБД непрерывного типа.

Анализ существующих решений

Можно выделить два подхода к оценке значения эффективной скорости передачи ПБД. В первом используются аналитические результаты, основанные на теории вероятностей и относящиеся к концепции больших уклонений. Так, например, в работах [6, 7] приведено формальное определение эффективной скорости передачи ПБД и найдены конкретные выражения данной характеристики для ряда теоретических моделей потоков ПБД. Если обозначить через $V(t, t + \tau)$ или $V(\tau)$ случайный процесс со стационарными приращениями, который задает число бит (байт), поступивших от ИТ в интервале времени τ , тогда эффективная скорость передачи ПБД $b_{эф}(g, \tau)$ определяется по формуле

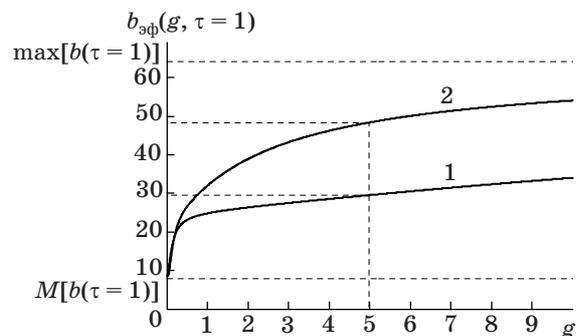
$$b_{эф}(g, \tau) = (g\tau)^{-1} \ln(M[\exp(gB(\tau))]),$$

$$0 < g < \infty, \quad 0 < \tau < \infty, \quad (2)$$

где $M[...]$ — математическое ожидание; g — параметр (имеет размерность $(\text{бит})^{-1}$ или $(\text{байт})^{-1}$), значение которого выбирается на основании того, насколько поток ПБД предрасположен к статистическому мультиплексированию.

Результаты расчета эффективной скорости для двух ИТ представлены на рис. 3. Отметим, что эффективная скорость передачи ПБД первого источника трафика при изменении параметра g нарастает медленнее, чем второго.

Сложность первого варианта расчета эффективной скорости передачи ПБД определяется



■ Рис. 3. ИТ, поток ПБД которого хорошо (линия 1) и плохо (линия 2) мультиплексируется

■ Таблица 1. Эффективная скорость ПБД для коммутационных приложений

Тип приложения	$M[b(\tau)]$, Кбит/с	$b_{эф}(\psi, \xi, \tau)$, Кбит/с	$\max[b(\tau)]$, Кбит/с	$\rho_{пот.БД\ перегр}$	z , Эрл
Речь	25	30	64	10^{-4}	0,1–0,4
MPEG-4 (HQ)	400	2000	2000	10^{-3}	0,02
MPEG-4 (LQ)	90	291	1000	10^{-3}	0,02
H.263 (HQ)	256	1005	1400	10^{-3}	0,02
H.263 (MQ)	64	107	320	10^{-3}	0,02
H.263 (LQ)	16	20	84	10^{-3}	0,02

тем, что параметры g и τ не заданы, а их выбор для конкретного случая диктуется условиями, в которых происходит передача ПБД, т. е. значениями пропускной способности в канале связи, размерами запоминающих устройств узла коммутации, показателями качества обслуживания и механизмами их контроля, а также характеристиками и параметрами других совместно передаваемых потоков ПБД [6, 7].

Заметим, что в явном виде эффективная скорость передачи ПБД может быть рассчитана только для ИТ, заданных математически [6].

Отметим наиболее важные свойства $b_{эф}(g, \tau)$ [6, 7]:

- $\lim_{g \rightarrow 0} [b_{эф}(g, \tau)] = M[b(\tau)]$ (см. рис. 3);
- $\lim_{g \rightarrow \infty} [b_{эф}(g, \tau)] = \max[b(\tau)]$ (см. рис. 3);
- значение эффективной скорости передачи ПБД суперпозиции независимых информационных потоков ПБД совпадает с суммой значе-

ний эффективных скоростей передачи для этих потоков.

ний эффективных скоростей передачи для этих потоков.

Второй вариант вычисления значений эффективной скорости передачи ПБД заключается в использовании упрощенных эмпирических выражений. В работе [8] для оценки эффективной скорости передачи ПБД используются следующие характеристики: средняя $M[b(\tau)]$ и пиковая (максимальная) $\max[b(\tau)]$ скорости передачи ПБД, пропускная способность C в канале связи и ограничение на качество передачи ПБД в форме доли потерянных ПБД $\rho_{пот.БД\ перегр}$. Промежуточные величины ψ, ξ определяются с помощью следующих формул [6, 8]:

$$\psi = -\frac{2\max[b(\tau)]}{C} \log_{10} \left(P_{пот.БД\ перегр} \right); \quad (3)$$

$$\xi = 1 - \frac{1}{50} \log_{10} \left(P_{пот.БД\ перегр} \right). \quad (4)$$

Эффективная скорость передачи ПБД $b_{эф}(\psi, \xi, \tau)$ находится по эмпирическому выражению [6, 8]

$$b_{эф}(\psi, \xi, \tau) = \begin{cases} \xi M[b(\tau)] \left(1 + 3\psi \left(1 - \frac{M[b(\tau)]}{\max[b(\tau)]} \right) \right), & \text{если } 3\psi \leq \min \left\{ 3, \frac{\max[b(\tau)]}{M[b(\tau)]} \right\} \\ \xi M[b(\tau)] \left(1 + 3\psi^2 \left(1 - \frac{M[b(\tau)]}{\max[b(\tau)]} \right) \right), & \text{если } 3 < 3\psi^2 \leq \frac{\max[b(\tau)]}{M[b(\tau)]} \\ \max[b(\tau)] & \text{в остальных случаях} \end{cases} \quad (5)$$

Результаты расчета эффективной скорости передачи ПБД для некоторых видов коммутационных приложений представлены в табл. 1 [6, 8]. Данные результаты свидетельствуют о том, что в зависимости от типа коммутационного приложения соотношение между эффективной $b_{эф}(\psi, \xi, \tau)$ и средней $M[b(\tau)]$ скоростями передачи ПБД меняется в довольно широких пределах, отражая способность соответствующих потоков ПБД к мультиплексированию.

Решение задачи

Предположим, что мгновенная скорость передачи ПБД $b(t)$ — это непрерывная случайная величина (СВ), значения которой попадают в диапа-

зон $[\min[b(\tau)], \max[b(\tau)]]$ и для описания которой воспользуемся смещенным и масштабируемым бета-распределением следующего вида [9]:

$$f(b(t), a_1, a_2) = \frac{\Gamma(a_1 + a_2)}{\Gamma(a_1)\Gamma(a_2)} \times \left(\frac{b(t) - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \right)^{a_1 - 1} \times \left(1 - \frac{b(t) - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \right)^{a_2 - 1} \times (\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)])^{-1}, \quad (6)$$

где $b(t) \in [\min[b(\tau)], \max[b(\tau)]]$.

Тогда функцию распределения для СВ $b(t)$ определим с помощью выражения

$$F(b(t), a_1, a_2) = \frac{\Gamma(a_1 + a_2)}{\Gamma(a_1)\Gamma(a_2)} \times \frac{b(t) - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \int_0^{\frac{b(t) - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]}} (\tilde{b})^{a_1-1} (1 - \tilde{b})^{a_2-1} d\tilde{b}. \quad (7)$$

Параметры a_1 и a_2 смещенного и масштабированного бета-распределения выразим через его первый начальный и второй центральный моменты:

$$a_1 = \left(\left(\frac{M[b(\tau)] - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \right) \times \left(1 - \left(\frac{M[b(\tau)] - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \right) \right) \times \left(\frac{D[b(\tau)]}{(\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)])^2} \right)^{-1} - 1 \right) \times \frac{M[b(\tau)] - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]}; \quad (8)$$

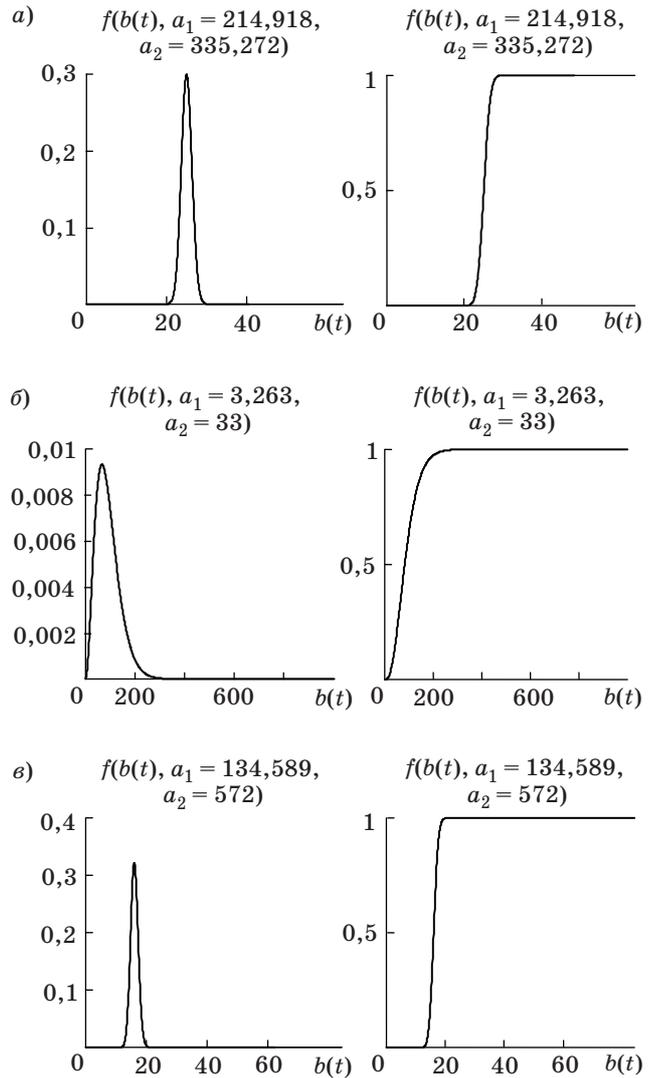
$$a_2 = a_1 \left(\left(\frac{M[b(\tau)] - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \right)^{-1} - 1 \right). \quad (9)$$

Значения параметров a_1 и a_2 для коммуникационных приложений (см. табл. 1), найденные путем численного решения системы уравнений

$$\begin{cases} F(b_{эф}(\psi, \xi, \tau), a_1, a_2) = 1 - P^{\text{пот.БД перегр}} \\ \int_{\min[b(\tau)]}^{\max[b(\tau)]} \tilde{b} f(\tilde{b}, a_1, a_2) d\tilde{b} = M[b(\tau)] \end{cases}, \quad (10)$$

представлены в табл. 2.

Плотность и функция распределения СВ $b(t)$ для коммуникационных приложений из табл. 1 изображены на рис. 4, а-в.



■ Рис. 4. Плотность и функция распределения СВ $b(t)$, описывающие коммуникационное приложение «Речь» (а), «МPEG-4 (LQ)» (б) и «H.263 (LQ)» (в)

Определение

Эффективная скорость передачи ПБД $b_{эф}(a_1, a_2, P^{\text{пот.БД перегр}}, \tau)$ — это значение, которое мгновенная скорость передачи ПБД $b(t)$, являющаяся

■ Таблица 2. Параметры бета-распределения для коммутационных приложений

Тип приложения	$M[b(\tau)]$, Кбит/с	$b_{эф}(\psi, \xi, \tau)$, Кбит/с	$\max[b(\tau)]$, Кбит/с	$P^{\text{пот.БД перегр}}$	a_1	a_2
Речь	25	30	64	10^{-4}	214,91	335,27
МPEG-4 (HQ)	400	2000	2000	10^{-3}	0,087	0,35
МPEG-4 (LQ)	90	291	1000	10^{-3}	3,263	33
H.263 (HQ)	256	1005	1400	10^{-3}	1,424	6,10
H.263 (MQ)	64	107	320	10^{-3}	20,771	83,08
H.263 (LQ)	16	20	84	10^{-3}	134,58	572

непрерывной СВ, не превышает с фиксированной вероятностью $(1 - P^{\text{пот.БД перрегр}})$

$$F(b_{\text{эф}}(a_1, a_2, P^{\text{пот.БД перрегр}}, \tau), a_1, a_2) = 1 - P^{\text{пот.БД перрегр}}. \quad (11)$$

Если воспользоваться понятием обратной функции, тогда выражение для расчета эффективной скорости передачи ПБД запишем в следующем виде:

$$b_{\text{эф}}(a_1, a_2, P^{\text{пот.БД перрегр}}, \tau) = F^{-1}\left(\left(1 - P^{\text{пот.БД перрегр}}\right), a_1, a_2\right). \quad (12)$$

Заметим, что предлагаемая математическая модель ИТ [выражения (6)–(10)] позволит аналитически определить значение эффективной скорости передачи ПБД [выражение (12)] с использованием таких параметров ИТ, как пиковая (максимальная) и минимальная скорости передачи ПБД, первый начальный и второй центральный моменты мгновенной скорости передачи ПБД, а также ограничение на долю потерянных ПБД. Она не зависит от пропускной способности в канале связи, следовательно, характеризует свойства ИТ без учета его взаимодействия с МСС.

Применение разработанной модели ИТ для исследования статистических свойств суммы n независимых потоков ПБД (без учета активности ИТ)

Предположим, что одновременно работают n независимых ИТ с изменяющейся скоростью передачи ПБД непрерывного типа, при этом параметры $\min[b(\tau)]$, $\max[b(\tau)]$, $M[b(\tau)]$ и $D[b(\tau)]$ у них совпадают. Учитывая, что

$$\min[b_{\text{сум}}(\tau)] = n \cdot \min[b(\tau)]; \quad (13)$$

$$\max[b_{\text{сум}}(\tau)] = n \cdot \max[b(\tau)]; \quad (14)$$

$$M[b_{\text{сум}}(\tau)] = n \cdot M[b(\tau)]; \quad (15)$$

$$D[b_{\text{сум}}(\tau)] = n \cdot D[b(\tau)], \quad (16)$$

параметры $a_{1,n}$ и $a_{2,n}$ смещенного и масштабированного бета-распределения, описывающего суммарный поток ПБД, определим следующими формулами:

$$a_{1,n} = \left(\frac{\left((M[b(\tau)] - \max[b(\tau)]) \times (M[b(\tau)] - \min[b(\tau)]) \right)^{n+1}}{D[b(\tau)]} \right) \times \left(\frac{M[b(\tau)] - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \right)^{-1}; \quad (17)$$

$$a_{2,n} = \left(\frac{\left((M[b(\tau)] - \max[b(\tau)]) \times (M[b(\tau)] - \min[b(\tau)]) \right)^{n+1}}{D[b(\tau)]} \right) \times \frac{M[b(\tau)] - \max[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]}. \quad (18)$$

Поскольку мгновенная скорость передачи суммарного потока ПБД $b_{\text{сум}}(t)$ — это непрерывная СВ, значения которой попадают в диапазон $[\min[b(\tau)] \times n, \max[b(\tau)] \times n]$, то для ее описания воспользуемся смещенным и масштабированным бета-распределением следующего вида:

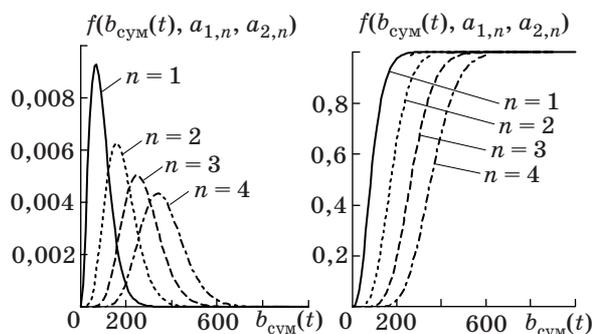
$$f(b_{\text{сум}}(t), a_{1,n}, a_{2,n}) = \frac{\Gamma(a_{1,n} + a_{2,n})}{\Gamma(a_{1,n})\Gamma(a_{2,n})} \times \left(\frac{b_{\text{сум}}(t)(n)^{-1} - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \right)^{a_{1,n}-1} \times \left(1 - \frac{b_{\text{сум}}(t)(n)^{-1} - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \right)^{a_{2,n}-1} \times \left((\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)])n \right)^{-1}, \quad (19)$$

где $b_{\text{сум}}(t) \in [\min[b(\tau)] \times n, \max[b(\tau)] \times n]$.

Тогда функцию распределения для СВ $b_{\text{сум}}(t)$ определим с помощью выражения

$$F(b_{\text{сум}}(t), a_{1,n}, a_{2,n}) = \frac{\Gamma(a_{1,n} + a_{2,n})}{\Gamma(a_{1,n})\Gamma(a_{2,n})} \times \frac{b_{\text{сум}}(t)(n)^{-1} - \min[b(\tau)]}{\max[b(\tau)] - \min[b(\tau)]} \int_0^{\tilde{b}} (\tilde{b})^{a_{1,n}-1} (1 - \tilde{b})^{a_{2,n}-1} d\tilde{b}. \quad (20)$$

На рис. 5 изображены плотность и функция распределения СВ $b_{\text{сум}}(t)$, описывающие n независимых потоков ПБД от коммуникационных приложений MPEG-4 (LQ) (без учета активности ИТ).



■ Рис. 5. Плотность и функция распределения СВ $b_{\text{сум}}(t)$, описывающие n независимых потоков ПБД (без учета активности ИТ)

Применение разработанной модели ИТ для исследования статистических свойств суммы n независимых потоков ПБД (с учетом активности ИТ)

Предположим, что к узлу доступа подключено n источников трафика (интенсивность поступающей нагрузки от каждого источника равна z) и каждый из них допускается в МСС без ограничения (рис. 6), тогда вероятность того, что в произвольный момент времени будет открыто ровно k сеансов связи, представим, воспользовавшись биномиальным распределением

$$P(k, n, z) = \binom{n}{k} z^k (1-z)^{n-k}, \quad (21)$$

где $\binom{n}{k}$ — число сочетаний, определяемое как

$$\binom{n}{k} = \frac{\Gamma(n+1)}{\Gamma(k+1)\Gamma(n-k+1)}. \quad (22)$$

Учитывая интенсивность поступающей нагрузки z , мгновенную скорость передачи суммарного потока ПБД $b_{\text{сум}}(t)$ опишем смесью смещенных и масштабированных бета-распределений следующего вида:

$$f(b_{\text{сум}}(t), n, z) = \text{Dirac}(b_{\text{сум}}(t))P(0, n, z) + \sum_{j=1}^n [f(b_{\text{сум}}(t), a_{1,j}, a_{2,j})P(j, n, z)], \quad (23)$$

где

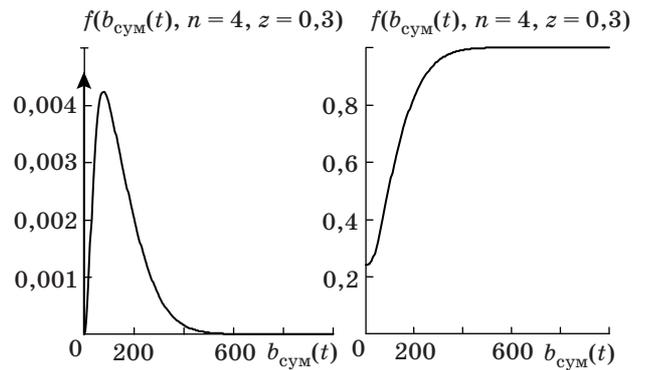
$$\text{Dirac}(b_{\text{сум}}(t)) = \begin{cases} \infty, & b_{\text{сум}}(t) = 0; \\ 0, & b_{\text{сум}}(t) \neq 0. \end{cases} \quad (24)$$

Тогда функцию распределения для СВ $b_{\text{сум}}(t)$ определим с помощью выражения

$$F(b_{\text{сум}}(t), n, z) = P(0, n, z) + \sum_{j=1}^n [F(b_{\text{сум}}(t), a_{1,j}, a_{2,j})P(j, n, z)]. \quad (25)$$



■ Рис. 6. Суммарный поток ПБД на выходе узла доступа



■ Рис. 7. Плотность и функция распределения СВ $b_{\text{сум}}(t)$, описывающие четыре независимых потока ПБД (с учетом активности ИТ)

На рис. 7 изображены плотность и функция распределения СВ $b_{\text{сум}}(t)$, описывающие четыре независимых потока ПБД от коммуникационных приложений MPEG-4 (LQ) (с учетом активности ИТ).

С помощью обратной функции для закона распределения, представленного выражением (25):

$$b_{\text{эф}}(n, z, P^{\text{пот.БД перегр}}, \tau) = F^{-1}\left(\left(1 - P^{\text{пот.БД перегр}}\right), n, z\right), \quad (26)$$

■ Таблица 3. Эффективная скорость передачи ПБД (с учетом числа и активности ИТ)

z	n									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,01	153	179	195	206	216	225	232	240	247	254
0,03	191	220	242	261	278	294	309	323	336	349
0,05	208	243	272	298	322	343	362	381	398	415
0,07	218	261	297	328	356	381	405	427	448	469
0,09	226	275	318	354	385	415	442	468	492	516
0,11	231	289	335	375	410	444	474	504	532	558
0,13	236	300	351	395	433	470	504	537	568	598
0,15	240	311	365	412	455	494	531	567	601	634
0,17	244	320	378	429	474	517	557	596	633	669
0,19	247	328	390	443	493	538	581	623	662	701

вычислим значения эффективной скорости передачи $b_{эф}(n, z, P_{пот.БД\ перегр}, \tau)$ суммарного потока ПБД для разного числа источников трафика n и разной величины интенсивности поступающей нагрузки z (табл. 3).

Применение разработанной модели ИТ для исследования статистических свойств суммарного потока ПБД, полученного в результате взаимодействия двух групп ИТ

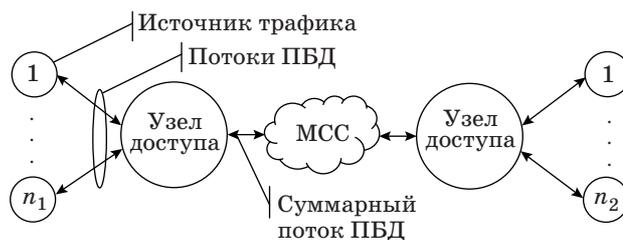
Предположим, что к первому узлу доступа подключено n_1 источников трафика, а ко второму — n_2 (интенсивность поступающей нагрузки от каждого источника трафика равна z). Очевидно, что максимальное число сеансов связи для МСС, представленной на рис. 8, определяется по формуле

$$n_{max} = \min\{n_1, n_2\}. \tag{27}$$

Определим вероятность того, что в произвольный момент времени будет открыто ровно k сеансов связи, воспользовавшись модифицированным распределением Энгсета [10, 11]:

$$P(k, n_1, n_2, z) = \frac{\binom{\lceil (n_1 + n_2)0,5 \rceil}{k} z^k (1-z)^{-k} 2^k}{\sum_{j=0}^{\min\{n_1, n_2\}} \left(\binom{\lceil (n_1 + n_2)0,5 \rceil}{j} z^j (1-z)^{-j} 2^j \right)}, \tag{28}$$

где [...] — функция округления до ближайшего целого в большую сторону.



■ Рис. 8. Суммарный поток ПБД, полученный в результате взаимодействия двух групп ИТ

Учитывая интенсивность поступающей нагрузки z , мгновенную скорость передачи суммарного потока ПБД $b_{сум}(t)$ опишем смесью смещенных и масштабированных бета-распределений вида

$$f(b_{сум}(t), n_1, n_2, z) = \text{Dirac}(b_{сум}(t))P(0, n_1, n_2, z) + \sum_{j=1}^{\min\{n_1, n_2\}} \left[f(b_{сум}(t), a_{1,j}, a_{2,j})P(j, n_1, n_2, z) \right]. \tag{29}$$

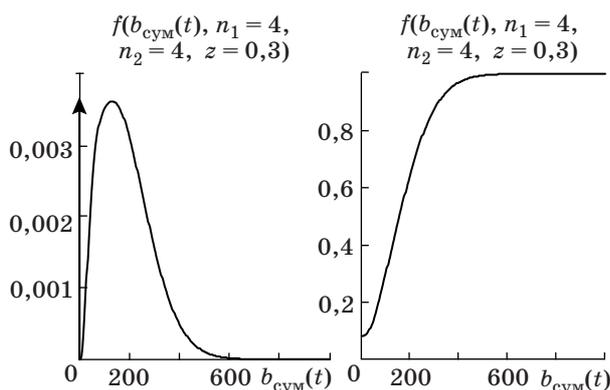
Тогда функцию распределения для СВ $b_{сум}(t)$ определим с помощью выражения

$$F(b_{сум}(t), n_1, n_2, z) = P(0, n_1, n_2, z) + \sum_{j=1}^{\min\{n_1, n_2\}} \left[F(b_{сум}(t), a_{1,j}, a_{2,j})P(j, n_1, n_2, z) \right]. \tag{30}$$

На рис. 9 представлены плотность и функция распределения СВ $b_{сум}(t)$, описывающие суммарный поток ПБД от коммуникационных приложений MPEG-4, полученный в результате взаимодействия двух групп ИТ.

■ Таблица 4. Эффективная скорость передачи ПБД (с учетом взаимодействия двух групп с равным количеством ИТ)

z	n _i									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0,01	178	204	222	237	250	263	275	286	297	306
0,03	212	250	283	312	337	360	381	400	420	438
0,05	227	279	322	359	392	422	450	478	503	527
0,07	236	301	352	396	435	471	505	538	569	599
0,09	243	317	375	425	470	511	551	589	625	660
0,10	246	325	385	438	485	530	572	611	650	687
0,11	248	331	394	449	499	546	591	633	675	714
0,12	250	337	403	460	513	563	609	653	697	739
0,13	252	342	410	471	526	577	625	673	717	762
0,14	254	347	417	480	538	592	643	691	738	784
0,15	256	352	425	489	549	605	657	708	757	804
0,16	257	355	431	498	559	617	672	725	776	824
0,17	259	359	437	506	570	629	685	740	793	844
0,18	260	362	443	514	579	640	699	755	809	862
0,19	261	366	448	521	588	651	711	770	825	879
0,20	262	369	453	528	597	662	723	783	840	896



■ **Рис. 9.** Плотность и функция распределения СВ $b_{\text{сум}}(t)$, описывающие суммарный поток ПБД, полученный в результате взаимодействия двух групп источников трафика

С помощью обратной функции для закона распределения, представленного выражением (30):

$$b_{\text{эф}}(n_1, n_2, z, P^{\text{пот.БД перерг}}, \tau) = F^{-1}\left(\left(1 - P^{\text{пот.БД перерг}}\right), n_1, n_2, z\right), \quad (31)$$

вычислим значения $b_{\text{эф}}(n_1, n_2, z, P^{\text{пот.БД перерг}}, \tau)$ эффективной скорости передачи суммарного потока ПБД, полученного в результате взаимодей-

ствия двух групп с равным количеством ИТ n_i , для разной величины интенсивности поступающей нагрузки z (табл. 4).

Заключение

Таким образом, разработанная модель ИТ с изменяющейся скоростью передачи ПБД [выражения (6)–(10)] и введенное понятие эффективной скорости передачи ПБД [выражение (12)] позволяют рассчитать скорость передачи суммарного потока ПБД на выходе узла доступа для различных условий его взаимодействия с МСС [выражения (13)–(31)].

Полученные в работе результаты могут найти практическое применение как в задачах оптимизации на этапе проектирования МСС, являясь основой формализованного представления исходных данных при расчете пропускной способности каналов связи, так и в процессе функционирования МСС на этапе установления логических соединений для определения величины резервируемой полосы пропускания.

В следующих публикациях планируется рассмотреть методы, подходы и модели, описывающие процессы обслуживания мультисервисного трафика, в частности, модели марковских модулированных процессов, учитывающие возможность накопления ПБД в запоминающих устройствах узлов коммутации, а также существенно более высокие требования к вероятности потерь ПБД.

Литература

1. Цветков К. Ю., Акмолов А. Ф., Викторов Е. А. Модель канала управления передачей смешанного трафика речи и данных в разнорысотной системе спутниковой связи // Информационно-управляющие системы. 2012. № 3(58). С. 63–70.
2. Новиков Е. А. Оценка пропускной способности спутника-ретранслятора при резервировании радиоресурса с упреждением // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2014. № 3(15). С. 62–69.
3. Новиков Е. А. Оперативное распределение радиоресурса спутника-ретранслятора при нестационарном входном потоке сообщений с учетом запаздывания в управлении // Информационно-управляющие системы. 2014. № 2(69). С. 79–86.
4. Подрябинкин Л. И., Сайтов И. А., Трегубов Р. Б. Закон распределения, производящая функция и числовые характеристики потока Пальма с ограниченным последствием // Научный вестник НГТУ. 2015. Т. 61. № 4. С. 74–89.
5. Битнер В. И., Михайлова Ц. Ц. Сети нового поколения — NGN. — М.: Горячая линия–Телеком, 2011. — 226 с.

6. Степанов С. Н. Основы телетрафика мультисервисных сетей связи. — М.: Эко-Трендз, 2010. — 392 с.
7. Kelly F. Notes on Effective Bandwidths // Stochastic Networks: Theory and Applications / F. Kelly, S. Zachary, I. Ziedinis. Vol. 4. — Royal Statistical Society Lecture Notes Series; Oxford University Press, 1996. — P. 141–168.
8. Lindberger K. Dimensioning and Design Methods for Integrated ATM Networks // Proc. 14th Intern. Teletraffic Congress, Antibes Juan-les-Pins. 1994. P. 897–906.
9. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Радио и связь, 1982. — 624 с.
10. Алексиков Ю. Г. Аналитико-алгоритмическая модель сети обмена данными управления телекоммуникационной системы, учитывающая вариативность интенсивности поступления потока управляющей информации // Интернет-журнал «Наукоедение». 2014. Вып. 1(20). <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN114.pdf> (дата обращения: 11.03.2016).
11. Трегубов Р. Б., Алексиков Ю. Г. Модель процесса мультиплексирования протокольных блоков данных в канале связи управления // Тр. СПИИРАН. 2014. № 1(32). С. 210–220.

UDC 621.394

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.51

Traffic Source Model with Changeable Transmission RateTregybov R. B.^a, PhD., Tech., treba@list.ruOreshin A. N.^a, PhD., Tech., Associate Professor, strongnuts@mail.ru^aAcademy of Federal Agency of Protection of Russian Federation, 35, Priborostroitel'naya St., 302034, Orel, Russian Federation

Introduction: Transmission of impulse (package) data traffic in multiservice communication networks has specific features which make it necessary to develop mathematical methods of calculating the effective transmission rate for a protocol data unit, allowing us to estimate the minimum necessary bandwidth for the communication channels in the given direction. **Purpose:** The quality of multiservice traffic service should be provided when the communication channel capacity is limited. **Methods:** The multiservice traffic rate is represented as a continuous random variable whose distribution function is described by a compound of offset and scaled beta-distributions. **Results:** The original distribution function has been provided for a continuous random variable describing the transmission rates for either single or aggregated flows of protocol data units. A distinctive feature of the solution proposed in the article is the opportunity to find the effective transmission rate of the protocol data units by an inverse function of a compound of offset and scaled beta-distributions. **Practical relevance:** The obtained results can be used in analysis and synthesis of multiservice communication networks.

Keywords — Multiservice Communication Network, Traffic Source Model, Flow of Protocol Data Units, Effective Transmission Rate of Protocol Data Units.

References

1. Cvetkov K. Yu., Akmolov A. F., Viktorov E. A. Mathematical Modeling of Management Channel Organization for Speech and Data Mixed Traffic in Multitude of Satellites at Miscellaneous Height. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2012, no. 3(58), pp. 63–70 (In Russian).
2. Novikov E. A. Assessment of Reflecting Satellite Transmission Capacity when Reserving a Feed-Forward Radio Resource. *Radiotekhnicheskie i telekommunikatsionnye sistemy*, 2014, no. 32 (15), pp. 62–69 (In Russian).
3. Novikov E. A. Operative Distribution of Satellite Repeater Radio Resource in Terms of Non-Stationary Ingress Flow with Account of Time Lagged Control. *Informatsionno-upravliaiushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2014, no. 2(69), pp. 79–86 (In Russian).
4. Podryabinkin L. I., Saitov I. A., Tregubov R. B. The Distribution Law, the Generating Function and Numerical Characteristics of the Palm Flow with a Limited Aftereffect. *Nauchnyi vestnik NGTU*, 2015, vol. 61, no. 4, pp. 74–89 (In Russian).
5. Bitner V. I., Mikhailova Ts. Ts. *Seti novogo pokoleniia — NGN* [Next Generation Network — NGN]. Moscow, Goriachaia liniia–Telekom Publ., 2011. 226 p. (In Russian).
6. Stepanov S. N. *Osnovy teletrafika mul'tiservisnykh setei svyazi* [Basics Teletraffic Multiservice Networks]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2010. 392 p. (In Russian).
7. Kelly F. *Notes on Effective Bandwidths*. In: Kelly F., Zachary S., Ziedinis I. *Stochastic Networks: Theory and Applications*. Oxford University Press, 1996, vol. 4 of Royal Statistical Society Lecture Notes Series, pp. 141–168.
8. Lindberger K. Dimensioning and Design Methods for Integrated ATM Networks. *Proc. 14th Intern. Teletraffic Congress*, Antibes Juan-les-Pins, 1994, pp. 897–906.
9. Tikhonov V. I. *Statisticheskaiia radiotekhnika* [Statistical Radios]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1982. 624 p. (In Russian).
10. Aleksikov Yu. G. Analytical and Algorithmic Model Network Communication Control Telecommunications System that Takes into Account the Variability of the Intensity of the Flow Control Information Flow. *Internet-zhurnal "Naukovedenie"*, 2014, iss. 1(20) (In Russian). Available at: <http://naukovedenie.ru/PDF/05TVN114.pdf> (accessed 11 March 2016).
11. Tregybov R. B., Aleksikov Yu. G. Process Model Multiplexing Protocol Data units in a Communication Channel Management. *Trudy SPIIRAN*, 2014, no. 1(32), pp. 210–220 (In Russian).

ДИНАМИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ ЗАПАСОВ ОСЕТРОВЫХ РЫБ СО СЛОЖНОЙ ВНУТРИПОПУЛЯЦИОННОЙ СТРУКТУРОЙ

Т. Н. Соловьева^а, канд. техн. наук, доцент

А. Ю. Переварюха^б, канд. техн. наук, старший научный сотрудник

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: все чаще отмечаются случаи деградации запасов ценных промысловых рыб. Деградация объясняется не только частными ошибками контроля над промыслом и недостатками методов учета, но и последствиями системной проблемы организации управления промыслом при действии пороговых эффектов. Для анализа этих эффектов требуется построить адекватную модель динамики численности популяций. **Результаты:** разработана модель формирования численности поколений осетровых рыб с использованием предикативно переопределяемой вычислительной структуры. Получена бистабильная неунимодальная зависимость воспроизводства, предполагающая существование интервального аттрактора с близкой граничной точкой. После трансформации аттрактора в непритягивающее хаотическое множество процесс деградации развивается необратимо. **Практическая значимость:** разработанная гибридная модель позволила описать общую нелинейную особенность развития процесса истощения обильных запасов при повышении промысловой смертности, затрудняющую своевременное выявление стремительного снижения эффективности воспроизводства.

Ключевые слова — гибридные динамические системы, нелинейные модели популяций, сценарий истощения запасов рыб.

Введение

Истощение рыбных запасов все чаще отмечается международными организациями, и в ряде случаев промысел не восстанавливается. Сокращение численности, после которого популяция более не достигает былого размера (деградация), происходит стремительно. Запасы не просто медленно исчерпываются по ожидаемым данным учета, но быстро «коллапсируют» [1].

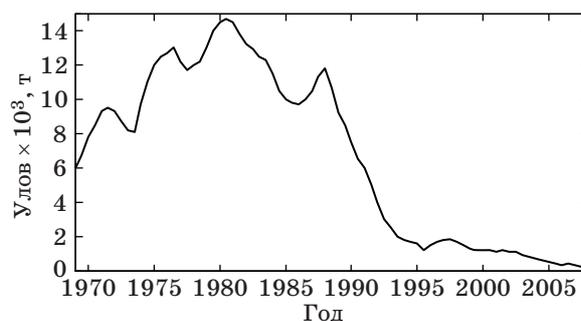
Анализируя различные примеры неудачного управления динамической системой «запас — промысел», можно выявить общие аспекты критических состояний этой системы, классифицируемые как характерные метаморфозы поведения фазовой траектории. Классические математические модели промысловой ихтиологии не описывают подобные эффекты, проявляющиеся при чрезмерном изъятии. Нами разрабатывается гибридная вычислительная структура, предполагающая рассмотрение специфических факторов в эффективности воспроизводства рыб, определяющих нестабильные темпы восполнения запасов в зависимости от состояния нерестующей части популяции.

Динамические аспекты случаев деградации

Крупнейшим отечественным примером деградации ценных биоресурсов служит динамика популяции трех видов осетровых Каспийского

моря: белуги, севрюги и русского осетра (рис. 1) [3]. В начале XX в. крупные рыбы, обладающие большой плодовитостью, осваивали удаленные речные нерестилища и обеспечивали большие уловы, однако в этот период были истощены запасы отдельных локальных популяций. В конце 1970-х гг., после перекрытия русла Волги, промысел снова достиг максимума [2]. Затем уловы волжского осетра заметно снизились, но далее продемонстрировали тенденцию к увеличению за счет особой озимой расы.

В 1980-е гг. гидрологические условия при трансгрессии моря считались благоприятными, был организован искусственный выпуск молоди, и прогнозировалось получение стабильных уловов порядка 30 тыс. т [3]. Однако в 1989 г. последовало стремительное и не остановленное



■ Рис. 1. Динамика уловов русского осетра

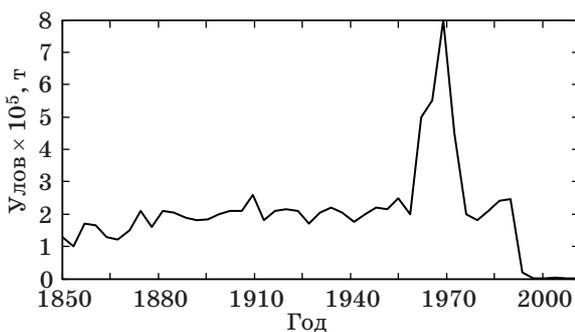
до сих пор сокращение численности (см. рис. 1). С 2010 г. осетровые внесены в «Красную книгу». Как о причине деградации осетровых, говорят об огромном неучтенном изъятии, которое должно было бы по расчетам превышать официальное.

С сокрушительными последствиями плохо предсказуемого перелова сталкиваются и такие страны с налаженной научной практикой регулирования промысла, как Норвегия и Канада. В 1992 г. прекращен промысел атлантической трески северного побережья Канады (рис. 2), причем непосредственно перед «коллапсом» перспективы промысла считались благополучными.

Промысел трески показал максимальные результаты на рубеже 1960–70-х гг., но далее не удержался и на среднемноголетнем уровне. Из графика видно, что неотвратимое истощение последовало не сразу вслед за годами рекордных уловов: первичное падение приостановилось и наступило десятилетие (1981 г. — 1990-е гг.) не столь обильных, но приемлемых колеблющихся объемов вылова. В работе [4] ход событий объяснялся тем, что естественное снижение численности трески могло совпасть с увеличением реального процента промысловой смертности из-за системной переоценки запасов.

В 2015 г. в прессе распространились данные о явных признаках аналогичного критического истощения запасов южной трески из залива Мэн.

В обоих случаях коллапса специалисты не смогли представить реалистичный прогноз о темпах регенерации запасов, и в результате введенный изначально двухлетний мораторий пришлось заменить неожиданным для ихтиологов двадцатитрехлетним вынужденным прекращением промысла трески, пагубным для экономики северного региона. Оказалось, что популяция после перелова восстанавливается совсем не так быстро, как должно следовать из полученной ранее статистики о смене возрастных когорт при благополучном состоянии популяции. Есть основания полагать, что за подобным развитием событий скрыты неучтенные ранее особенности репродуктивного процесса.



■ Рис. 2. Падение уловов трески у побережья Канады

Моделирование воспроизводства запасов

Известно достаточно много моделей воспроизводства рыбных запасов, в которых учтены внутренние механизмы регуляции численности популяций и имеется возможность имитировать последствия организованного промысла. Например, на основании «логистического» уравнения Ферхюльста была построена теория максимизации устойчивого вылова (Maximum sustainable yield — MSY). В этой модели изолированная популяция подразумевалась равномерно вполне управляемой системой, переводимой управляемым воздействием в состояние \hat{S} наиболее интенсивного приращения. Авторы этой модели считают, что для того, чтобы контролируемый промысел не подверг запасы риску сокращения, достаточно оценить константный параметр репродуктивного потенциала. Подход MSY подвергается резкой критике со стороны экологов из-за его оптимистических прогнозов [5], основанных на постоянстве прироста и идеализации стабильности природных воздействий. В основе моделей эксплуатируемых популяций рыб должна содержаться нетривиальная формализация зависимости баланса воспроизводства и смертности от различных факторов, так как естественная убыль на ранних этапах жизни рыб очень велика, и малейшие ее изменения сказываются на благополучии популяций крупных хищников.

При подборе оптимального промыслового режима для особенностей нереста некоторых видов рыб используется построение «кривых воспроизводства». При этом определение вида эмпирической зависимости величины пополнения R от промыслового запаса S на основе данных наблюдений должно способствовать обоснованию прогнозов восполнения промыслового запаса [6]. Основная идея моделей пополнения заключается в описании лимитирующих факторов $v(S)$, регулирующих величину пополнения R при повышении плотности рыб на нерестилищах с характеристикой фертильности $a > 1$: $R = aS/v(S)$. Рикером предложено экспоненциальное описание $v(S) = e^{bS}$, где $b < 1$ — показатель влияния лимитирующих факторов. Шепард обобщил эту идею в форме вариативной зависимости $v(S) = 1 + (S/K)^b$; здесь учтен объем запаса K , соответствующий необременительной емкости среды.

Если анализ моделей проводить в виде функциональных итераций $R_{n+1} = \psi(R_n)$, то при изменении параметра нелинейных кривых, а Рикера или b Шепарда, происходят бифуркации образования циклов увеличивающегося периода 2^i с переходом к хаотическому режиму и аттрактору A в форме нигде не плотного множества, так как модели удовлетворяют критериям теоремы Сингера [7]. Одним из математических свойств

рассматриваемых моделей является реализация каскада бифуркаций Фейгенбаума [8] при изменении некоторого параметра. Однако нельзя однозначно сказать, что это свойство является преимуществом или недостатком рассматриваемых моделей. Аналогичным свойством обладают и итерации тригонометрических зависимостей, не имеющие никакого популяционного истолкования. Для того чтобы сделать обоснованные выводы, необходимо выявить условия всех метаморфоз поведения моделей популяций.

Следует отметить, что качественные изменения поведения траектории двух моделей могут быть взаимно противоречивы при их биологической интерпретации. Например, дополнение функции $R = aSe^{-bS}$ Рикера учетом доли промыслового изъятия H при итерационном моделировании $R_{n+1} = \psi((1-H)R_n)$ стабилизирует флуктуации. В то же время учет искусственного выпуска партий молоди рыб $R_{n+1} = \psi(R_n) + GR_n$ хаотизирует фазовую траекторию.

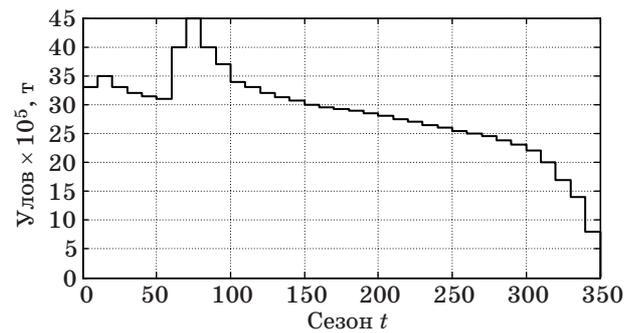
Простые модели могут обладать сложными динамическими режимами и неожиданными метаморфозами (перемежаемостью, субдукцией, кризисами связности аттракторов), однако для всего разнообразия подобных моделей топология предполагает только три типа аттракторов.

Предложена [9] модель формирования пополнения в виде системы двух уравнений убыли численности $N(t)$ на отрезке времени t до полового созревания рыб:

$$\begin{cases} \frac{dN}{dt} = -(\alpha w(t)N(t) + \theta(S)\beta)N(t); \\ \frac{dw}{dt} = \frac{g}{N^k(t) + \sigma}, k \in \left[\frac{1}{2}, \frac{2}{3} \right], \theta(S) = \frac{1}{1 - e^{-cS}}. \end{cases} \quad (1)$$

Вспомогательная величина $w(t)$ отражала изменение пищевых потребностей по мере развития особей. Модель расчета пополнения $R = N(T)$ включала коэффициенты смертности α и β , действующие на интервале уязвимости $t \in [0, T]$ в раннем онтогенезе рыб. При компьютерном моделировании была получена куполообразная зависимость с ненулевой горизонтальной асимптотой и двумя нетривиальными стационарными точками пересечения с биссектрисой координатного угла, меньшей граничной репеллерной и большей устойчивой. Фазовая кривая не удовлетворяла критериям Сингера и позволила преодолеть частные недостатки двух известных кривых воспроизводства.

Однако при сходстве с экспериментальными данными об аквариумных популяциях итерации дискретно-непрерывной модели (1), как и ранние модели, не описывают отмеченную проблему стремительной деградации. В случае установления чрезмерной доли промыслового изъятия се-



■ Рис. 3. Сценарий сокращения уловов при перелове согласно (1)

зонные уловы $Y_n = HR_n$, согласно модели, после пика до момента перехода к безвозвратной деградации сокращаются монотонно, за 35 сезонов модельного времени (рис. 3), что не соответствует реальным данным.

При существующих методах прогнозирования, используя рассмотренные модели, крайне сложно определить точку, в которой произойдет резкое падение улова.

Новая модель формирования поколений

Как отмечалось ранее, деградация — это не просто вялотекущий и монотонный процесс истощения, а неожиданный переход в состояние с минимальной за историю наблюдений численностью. Существующие модели неадекватно отображают процесс деградации и, следовательно, не могут быть использованы при выявлении его причин. В сценарии с экспертно регулируемым воздействием промысла необходимо ввести ранее не учтенные, качественно другие свойства динамики итераций системы «запас — пополнение».

Расширим модель репродуктивного цикла с использованием организации непрерывно-событийной вычислительной структуры. При этом учтем, что кривая воспроизводства совсем не обязательно должна быть куполообразной унимодальной с единственным экстремумом функции (подобные примеры отмечал в обзоре [6] Рикер).

У рыб может быть выделено несколько хорошо выраженных стадий развития: предличинки на питании из желточного мешка, активно питающиеся личинки, свободно мигрирующая к местам нагула молодь. Факторы смертности должны различаться по стадиям, при этом момент достижения перехода личинка — молодь может регулироваться вспомогательным показателем развития $w(t)$. На старших стадиях успешное развитие должно сокращать действие квадратичной смертности α , и замедление развития становится значимым фактором.

Опишем убыль начальной численности $N(0)$ от момента вылупления из икринок дифференциальным уравнением на кадрированном промежутке времени $t \in [0...t, \tau_1...T]$. Учтем изменения действия факторов смертности по ходу прохождения стадий развития особей. Также примем, что смертность молодежи от нападения хищников обусловлена обилием доступных для нападений жертв на второй стадии:

$$\frac{dN}{dt} = \begin{cases} -(\alpha w(t)N(t) + U(S)\beta)N(t), & t < \tau; \\ -(\alpha_1 N(\tau) + \beta)N(t), & w(t) < w_d; \\ -\left(\alpha_2 \frac{N(\tau_1)}{w(\tau_1)}\right)N(t), & \tau_1 < t < T. \end{cases} \quad (2)$$

Здесь α — коэффициент, зависящий от плотности компенсационной смертности; β — коэффициент нейтральной убыли. От агрегированного «репродуктивного потенциала» разумно перейти к естественному показателю средней плодовитости λ . Начальные условия для уравнения (1) с дважды переопределяемой правой частью будут иметь вид $N(0) = \lambda S$. Длительность стадии с эндогенным питанием τ для рыб обычно постоянна. Длительность τ_1 стадии активного питания до начала миграции в море зависит от условного уровня развития w_d , при достижении которого ослабляется действие факторов смертности. Вспомогательное уравнение для $\dot{w}(t)$ оставим как в (1).

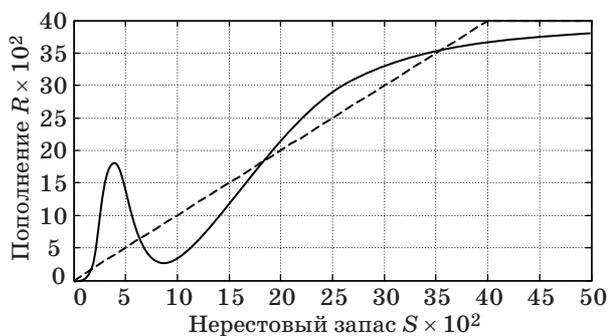
При низкой плотности уменьшается вероятность образования нерестовых пар, что сильно сокращает продуктивность нереста, особенно осетровых рыб, для которых характерно образование репродуктивно изолированных локальных групп. В связи с этим правую часть (2) при $t < \tau$ дополним триггерным функционалом $U(S) = 1 + e^{-cS^2}$ с областью значений $[2, 1]$, где $c < 1$ определяет степень выраженности фактора, называемого в экологии эффектом Олли. Функционал быстро стремится к единичному значению $\lim_{S \rightarrow S^*} U(S) = 1$ и не влияет на расчеты при оптимальном состоянии запаса. Интервал ювенальной уязвимости $[0, T]$ разделен на тройку кадров гибридного модельного времени. При смене кадров происходит реинициализация начальных условий.

При моделировании в инструментальной среде алгоритмически формируется непрерывно-событийная переопределяемая вычислительная структура из трех форм правой части уравнения убыли (2) и условий завершения их активности. Последовательность численных решений задач Коши для допустимых значений $S \in 0^+$ определит итоговую интересующую нас зависимость (рис. 4) для дискретно-непрерывной динамической системы.

Как видно из графика, на основе модели (2) получена зависимость, при которой диапазоны избыточного восполнения нерестового запаса ($\psi(S) > S$) чередуются с состояниями, в которых имеющийся нерестовый запас восполняется не полностью. Минимум числа особей $N(T)$ соответствует локальному максимуму промежуточного $N(\tau)$. Волнообразная форма зависимости соответствует реальным наблюдениям [10]. Такая зависимость обосновывается предпочтительной реакцией хищников на наиболее доступную добычу.

О количестве производителей лососевых имеются более точные данные.

При учете особей горбуши было отмечено, что положения стационарных точек могут масштабироваться вдоль биссектрисы (рис. 5) в зависимости от дополнительных факторов смертности. Пунктиром показано, как положение граничного равновесия может смещаться к B' при включении дополнительных факторов смертности молодежи. Из показанного графика гипотетической функции воспроизводства $f(S)$ непонятно, как популяция могла ранее преодолеть граничное равновесие B , так как для этого необходимо существование интервала $s \in (S_m, S_w)$, $s < B$, такого, что $f(S) > B$, но подобные свойства кривой воспроизводства будут противоречить гипотезе [10] о наличии нижнего устойчивого стационарного состояния для популяции. Описанный далее сце-



■ Рис. 4. Кривая воспроизводства на основе модели (2)



■ Рис. 5. Волнообразная кривая воспроизводства горбуши

нарий успешно разрешает данное противоречие, так как исходит из той идеи, что состояние при малой численности для популяции совершенно не соответствует критериям устойчивого экологического равновесия со средой.

Вычислительный сценарий деградации

В отличие от кривой воспроизводства горбуши (см. рис. 5), в предлагаемой модели (см. рис. 4) не три, а четыре нетривиальные стационарные точки $\psi(R_i^*) = R_i^*$. Устойчивым является только наибольшее из равновесий R_4^* так же, как и тривиальное $\psi(0) = 0$. Три первых пересечения кривой воспроизводства с биссектрисой $R_1^* < R_2^* < R_3^*$ по причине превышения в этих точках угла наклона касательной значения $\frac{\pi}{4}$ оказываются неустойчивы (критерий устойчивости $|\psi'(R^*)| < 1$). При итерационном моделировании для оценки устойчивости точек будем использовать вычисление второй итерации $\psi(\psi(x))$. Тогда необходимым и достаточным условием устойчивости неподвижной точки функциональной итерации x^* является выполнение неравенств $\psi^2(x) > x$ при $x < x^*$ и $\psi^2(x) < x$ при $x > x^*$.

Поскольку в окрестности максимума модельная кривая немного превосходит третье равновесие: $\psi(R_{\max} \pm \varepsilon) > R_3^*$, в случае если исходное состояние популяции R_0 соответствует диапазону $R_0 \in (R_1^*, R_3^*) \cap \{\psi^{-n}(R_2^*)\}$, через ряд аperiodических флуктуаций достигается состояние высокой стабильной численности R_4^* .

Аperiodическое движение чувствительно к выбору начального значения R_0 , а это означает принципиальную невозможность делать прогнозы при подобном характере популяционной динамики. Фундаментальное свойство появления хаотичности (пусть и в транзитивном варианте) означает отсутствие предсказуемости: как бы точно не настраивались параметры модели, невозможно узнать исходное состояние нерестового запаса с точностью до каждой самки. В малочисленном диапазоне популяция подвержена влиянию неустойчивости среды, и переходная хаотизация отражает именно эту неопределенность.

Наблюдаемый в вычислительных экспериментах аperiodический режим вызван локально-несвязным характером области притяжения аттрактора R_4^* , так как эта область не включает множество не притягивающихся к аттрактору прообразов двух неустойчивых точек: $\{\psi^{-n}(R_2^*)\} \cup \{\psi^{-n}(R_3^*)\}$. Точка R_1^* представляет собой неустойчивое «критическое» равновесие: если $R_0 < R_1^* - \varepsilon$, то реализуется необратимая деградация $\psi^n(R_0) \rightarrow 0$. В случае негативного внешнего воздействия на выживаемость изменится конфигурация стационарных точек у масштабируемой

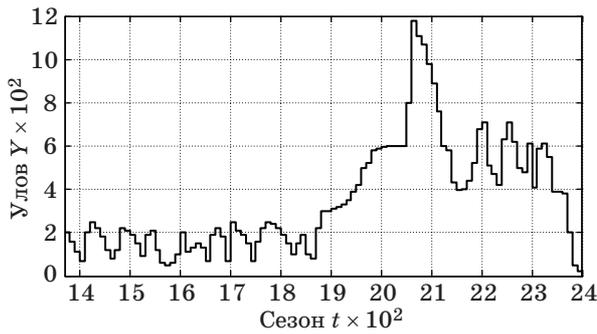
по оси ординат кривой. Для модели возможна обратная касательная бифуркация: при слиянии R_3^* и R_4^* с исчезновением устойчивой стационарной точки при сохранении точек R_1^* и R_2^* . Изменения означают пребывание популяции при существенно меньшей среднемноголетней численности в режиме флуктуаций значительной амплитуды, которому отвечает интервальный аттрактор, третьего топологического типа по Гукенхаймеру [11]. Продолжительность колебаний зависит от положения минимума кривой, если $\psi(R_{\min}) < R_1^*$. Таким образом описывается сценарий деградации, реализованный как граничный кризис интервального аттрактора.

Интересна динамика, наблюдаемая в вычислительных экспериментах для полученной зависимости при резком повышении доли промышленного изъятия, производимом при благополучном состоянии запаса $\bar{\psi}(R_n) \approx R_4^*$. При этом задача регулирования вылова состоит в том, чтобы не допустить редуцирования равновесия возмущенной системы $\bar{\psi}$ выше R_3^* и, следовательно, перехода запаса в режим неблагоприятных для промысла и непредсказуемых колебаний.

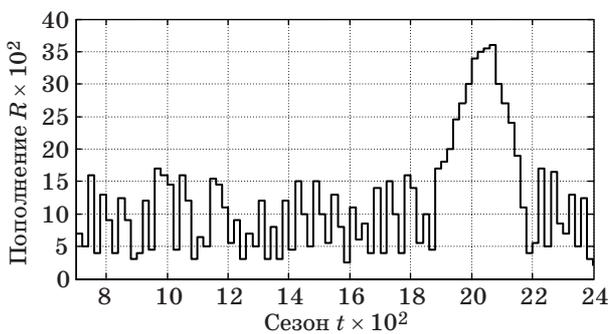
При негативном развитии событий короткий мораторий может стать действенным решением по возвращению нестабильных, но приемлемых уловов в устойчивое состояние. Так, например, в 1967 г. случилось резкое падение уловов сельди Британской Колумбии, был введен четырехлетний мораторий, и промысел удалось восстановить, ограничив $H \leq 0,2$. Однако так как оценка реальной убыли сложна, эта ситуация затем повторилась, но уже в худшем варианте развития коллапса.

В случае если популяция после долгой нестабильности восстановилась до своего оптимума, уловы плавно пошли вверх и принимается решение о чрезмерной интенсификации режима промысла, уловы Y сначала демонстрируют исторические максимумы, но затем довольно очевидно снижаются и успешно проходят локальный минимум, не попадая сразу в окрестность критического состояния. Р. Майерс признал [4], что методика оценки запасов «недостаточно чувствительна» для того, чтобы показать начавшееся сокращение численности, так как промысловые прогнозы учитывают в расчетах высокую эффективность воспроизводства в предыдущие годы и то, что уловы после спада немного возвращают былые объемы. Однако подобное восстановление обманчиво (рис. 6).

Численность запаса после интенсификации промысла возвращается в аperiodический малочисленный режим с сжимающейся амплитудой колебаний, но не задерживается там даже в случае запоздалого установления неистощительной доли изъятия. После кратких колебаний следует второе, уже критическое падение (рис. 7).



■ **Рис. 6.** Динамика уловов в сценарии существенно-го перелома по модели (2)



■ **Рис. 7.** Динамика численности популяции при коллапсе запасов

Недолгое увеличение уловов непосредственно перед коллапсом следует из характера нелинейности модели кривой воспроизводства, связанного с существованием двух уровней численности популяции.

Эффект граничного кризиса интервального аттрактора описывает явление деградации осетровых, происходящее в два этапа. При подобной разновидности изменения структуры аттрактора по классификации из работы [12] аттрактор соприкасается с границей своей области притяжения $\psi(R_{\min}) = R_1^*$ и нарушается свойство инвариантности $\bar{\psi}(A) \in A$. После кризиса появляется непритягивающее хаотическое множество, где ограниченное число шагов пребывает траектория, но в итоге $\bar{\psi}(R) \rightarrow 0$. Из-за кризиса, вызванного сдвигом минимума кривой, единственным инвариантным замкнутым притягивающим множеством оказывается точка начала координат. Таким образом, ключевым аспектом сценария деградации является положение минимума рассматриваемой зависимости и объяснение его смещения.

Одна из причин установления чрезмерной доли изъятия может состоять в игнорировании внутривидовой дифференциации, так как в результате этого создается иллюзия избытка за-

пасов. Например, может сложиться ситуация, когда запас из двух относительно изолированных репродуктивных групп в соотношении 1:3 оценивается как благополучный, но меньшая по численности группировка попадает под действие эффекта Олли и не восстанавливает убыль запаса. Тогда все промысловое давление переносится на оставшуюся группу (подобная ситуация сложилась в начале 1980 г., когда было решено увеличить долю изъятия озимых), в результате чего по описанному выше сценарию развивается деградация всей популяции.

Заключение

Отличительной особенностью разработанной динамической модели внезапного коллапса является учет сложной внутривидовой структуры осетровых рыб. Введенная дифференциация связана с тем, что нерестовая активность осетровых Каспия определяется двумя сезонными расами, причем исторически доминирующей считалась озимая. Промысловая статистика ранее не разделяла эти субпопуляционные группы и даже два разных биологических вида *Acipenser gueldenstaedtii* и *Acipenser persicus* учитывала под одним названием осетр. Определение индивидуальной идентификации по отношению к репродуктивной группе сложно, но в современных работах установлены иммунохимические различия для групп особей каспийской севрюги [13].

Учет существования нескольких внутривидовых групп особей позволил существенно приблизить результаты моделирования к реально наблюдаемой картине динамики численности в случае деградации.

Проведенные компьютерные эксперименты показали, что игнорирование внутривидовой дифференциации является одной из причин рисков экспертного управления режимом эксплуатации, так как появляется иллюзия избытка запасов (например, в результате применения экстраполяции данных траловых учетных обловов), что дает повод для увеличения объемов добычи и приводит к деградации всей популяции. Подобные рассуждения о необходимости изменения режима промысла описаны в работе [14].

Предлагаемая динамическая модель внезапного коллапса, учитывающая сложную структуру популяции осетровых, может быть использована при оценке аспектов, увеличивающих вероятность неожиданной деградации обильных ранее запасов, долгое время выдерживавших большой процент изъятия.

Работа выполнена в рамках проекта РФФИ № 16-37-00028 для молодых ученых.

Литература

1. Jeremy B. C., et al. Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems // *Science*. 2001. Vol. 293. Iss. 5530. P. 629–637. doi:10.1126/science.1059199
2. Лепилина И. Н., Васильева Т. В., Абдусаматов А. С. Состояние запасов каспийских осетровых в многолетнем аспекте (литературный обзор) // Юг России: экология, развитие. 2010. № 3. С. 57–65.
3. Рубан Г. П., Ходоревская Р. П., Кошелев В. Н. О состоянии осетровых в России // Астраханский вестник экологического образования. 2015. № 1. С. 42–50.
4. Myers R. A., Hutchings J. A., Barrowman N. J. Why do Fish Stocks Collapse? The Example of Cod in Atlantic Canada // *Ecological Applications*. 1997. Vol. 7. Iss. 1. P. 91–106.
5. Larkin P. A. An Epitaph for the Concept of Maximum Sustained Yield // *Transactions of the American Fisheries Society*. 1977. Vol. 106. Iss. 1. P. 1–11. doi:10.1577/1548-8659(1977)106<1:AEFTCO>2.0.CO;2
6. Ricker W. E. Stock and Recruitment // *Journal Fisheries Research Board of Canada*. 1954. Vol. 11. N 5. P. 559–623.
7. Singer D. Stable Orbits and Bifurcations of the Maps on the Interval // *SIAM Journal on Applied Mathematics*. 1978. Vol. 35. P. 260–268.
8. Feigenbaum M. J. Universal Behavior in Nonlinear Systems // *Physica D: Nonlinear Phenomena*. 1983. Vol. 7. Iss. 1. P. 16–39.
9. Переварюха А. Ю. Нелинейная динамическая модель системы запас-пополнение // Информационно-управляющие системы. 2008. № 2(33). С. 9–14.
10. Peterman R. M. A Simple Mechanism that Causes Collapsing Stability Regions in Exploited Salmonid Populations // *Journal Fisheries Research Board of Canada*. 1977. Vol. 34. N 8. P. 1130–1142.
11. Guckenheimer J. Sensitive Dependence on Initial Conditions for One Dimensional Maps // *Communications in Mathematical Physics*. 1979. Vol. 70. N 2. P. 133–160.
12. Grebogi C., Ott E., Yorke J. A. Chaotic Attractors in Crisis // *Physical Review Letters*. 1982. Vol. 48. Iss. 22. P. 1507–1510.
13. Борисова Т. Ю. Антигенная дифференциация популяций севрюги *Acipenser Stellatus* Каспийского моря: дис. ... канд. биол. наук/АГТУ. Астрахань, 2010. – 151 с.
14. Сливка А. П., Павлов А. В. Биологические основы изменения режима промысла осетровых (*Acipenseridae*) в дельте Волги // *Вопросы ихтиологии*. 1982. № 5. С. 738–745.

UDC 639.215.2

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.60

Dynamic Model of Depletion of Sturgeon Stocks with Complex Intrapopulation Structure

Solov'eva T. N.^a, PhD, Tech., Associate Professor, al2tn@yandex.ru

Perevaryukha A. Yu.^b, PhD, Tech., Senior Researcher, spiiaras@pisem.net

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

^bSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of the RAS, 39, 14 Line, 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: The depletion of commercial fish stocks becomes more and more common, which is caused not only by partial mistakes in the control over the fisheries or by shortcomings of the accounting methods. There is also a systemic problem about the expert control in the presence of threshold effects. To analyze these effects, we should develop an adequate model of population size dynamics. **Results:** A model has been developed for calculating the size of sturgeon generations, using a predicatively redefined computing structure. A bistable non-unimodal dependence has been obtained for the reproduction curve, which presupposes the existence of an interval attractor with a nearby boundary point. After the attractor is transformed into a non-attracting chaotic set, the degradation process evolves irreversibly. **Practical relevance:** The developed hybrid model allows you to describe the general nonlinear feature in the depletion of copious stocks at a higher fishing mortality which makes it difficult to timely detect and predict a rapid decrease in the reproduction efficiency.

Keywords — Hybrid Dynamic Systems, Nonlinear Models of Populations, Depletion of Fish Stocks.

References

1. Jeremy B. C., et al. Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems. *Science*, 2001, vol. 293, iss. 5530, pp. 629–637. doi:10.1126/science.1059199
2. Lepilina I. N., Vasilieva T. V., Abdusamadov A. C. The State of Caspian Sturgeon Stocks in Long-Term Aspect (Review of Literature), 2010, no. 3, pp. 57–65 (In Russian).
3. Ruban G. I., Hodorevskaia R. P., Koshelev V. N. On the Status of Sturgeon in Russia. *Astrakhanskii vestnik ekologicheskogo obrazovaniia*, 2015, no. 1, pp. 42–50 (In Russian).
4. Myers R. A., Hutchings J. A., Barrowman N. J. Why do Fish Stocks Collapse? The Example of Cod in Atlantic Canada. *Ecological Applications*, 1997, vol. 7, iss. 1, pp. 91–106.
5. Larkin P. A. An Epitaph for the Concept of Maximum Sustained Yield. *Transactions of the American Fisheries Society*, 1977, vol. 106, iss. 1, pp. 1–11. doi:10.1577/1548-8659(1977)106<1:AEFTCO>2.0.CO;2

6. Ricker W. E. Stock and Recruitment. *Journal Fisheries Research Board of Canada*, 1954, vol. 11, no. 5, pp. 559–623.
7. Singer D. Stable Orbits and Bifurcations of the Maps on the Interval. *SIAM Journal on Applied Mathematics*, 1978, vol. 35, pp. 260–268.
8. Feigenbaum M. J. Universal Behavior in Nonlinear Systems. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 1983, vol. 7, iss. 1, pp. 16–39.
9. Perevaryukha A. Yu. A Non-Linear Dynamic Model of the Stock-Recruitment System. *Informatsionno-upravliayushchie sistemy* [Information and Control Systems], 2008, no. 2(33), pp. 9–14 (In Russian).
10. Peterman R. M. A Simple Mechanism that Causes Collapsing Stability Regions in Exploited Salmonid Populations. *Journal Fisheries Research Board of Canada*, 1977, vol. 34, no. 8, pp. 1130–1142.
11. Guckenheimer J. Sensitive Dependence on Initial Conditions for One Dimensional Maps. *Communications in Mathematical Physics*, 1979, vol. 70, no. 2, pp. 133–160.
12. Grebogi C., Ott E., Yorke J. A. Chaotic Attractors in Crisis. *Physical Review Letters*, 1982, vol. 48, iss. 22, pp. 1507–1510.
13. Borisova T. Yu. *Antigennaia differentsiatsiia populatsii sevriugi Acipenser Stellatus Kaspiiskogo moria*. Dis. kand. biol. nauk [Antigenic Differentiation of Population of Acipenser Stellatus in Caspian Sea. Cand. biol. sci. diss.], Astrakhan', AGTU Publ., 2010. 151 p. (In Russian).
14. Slivka A. P., Pavlov A. V. Biological Basics of Regime Change Sturgeon Fishery (Acipenseridae) in the Volga Delta. *Journal of Ichthyology*, 1982, no. 5, pp. 738–745.

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

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

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

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

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

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

эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

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

эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: informnauka3@yandex.ru,

сайт: <http://www.informnauka.com>

«Деловая пресса»

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

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

«Коммерсант-Курьер»

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

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

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

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

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

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

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

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

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2015 гг.

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

НЭБ (<http://www.elibrary.ru>)

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

journal/n/informatsionno-upravlyayushchiesistemy).

КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ НА ОСНОВЕ ИХ ЛОГИКО-ДИНАМИЧЕСКОЙ СПЕЦИФИКАЦИИ

В. М. Шпаков^а, канд. техн. наук, доцент

^аСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: потребность в реализации процессов существует при компьютерном моделировании динамических систем, при разработке систем управления. Важное значение имеют трудоемкости разработки спецификации и программной реализации модели системы на ее основе, а также эффективность этой реализации. Кроме того, важны выразительность и понятность (прозрачность) спецификации для специалистов и определяемые ею возможности по модификации модели и удобству управления процессом моделирования. Логико-динамическая спецификация процессов пока не получила широкого распространения, ее свойства не известны широким кругам разработчиков моделей. **Цель:** экспериментальное исследование технологии разработки имитационных моделей динамических систем, основанной на использовании логико-динамической спецификации процессов; оценка трудоемкости разработки и выразительных возможностей спецификаций, а также качества получаемых моделей. **Результаты:** разработаны методики логико-динамической спецификации моделей систем, исходные знания о функционировании которых представлены в виде физических моделей, структурных схем элементарных процессов, систем дифференциальных уравнений. Свойства спецификаций иллюстрируются на примерах разработки трех моделей процессов. Приведенные спецификации и проведенное компьютерное моделирование процессов позволяет сделать вывод о широких выразительных возможностях логико-динамической спецификации процессов, пригодности ее для эффективной программной реализации процессов и об удобстве валидации и модификации получаемых на ее основе моделей. **Практическая значимость:** использование логико-динамических спецификаций процессов позволит существенно упростить разработку моделей сложных динамических систем, особенно в тех случаях, когда исходная информация о динамике отдельных частей системы представлена в различных формах. Благодаря прозрачности спецификаций модели могут быть эффективно использованы в образовательных целях.

Ключевые слова — имитационное моделирование, логико-динамические системы, основанное на правилах программирование.

Введение

Функционирование динамических систем определяется происходящими в них процессами. По характеру динамики различают процессы непрерывные, дискретно-событийные и гибридные. В гибридных процессах наряду с непрерывными изменениями состояний происходят дискретно-событийные изменения как состояний, так и динамики. Очевидно, непрерывные и дискретно-событийные процессы являются частными случаями гибридных процессов. К спецификациям процессов, помимо полноты и непротиворечивости, предъявляются требования выразительности и пригодности для эффективной программной реализации. Под выразительностью понимается возможность спецификации широкого класса процессов. Кроме того, важным свойством является прозрачность спецификации, которая характеризуется легкостью понимания спецификации специалистами в проблемной области.

Развитие процессов определяется законами соответствующих динамик и логикой функционирования конкретных динамических систем. Для спецификации дискретно-событийных и гибридных процессов используются модели конечного и гибридного автоматов. Рассматриваемый подход к спецификации процессов различной динамики основан на достаточно естественном объ-

единении вычислительных моделей гибридного и конечного автоматов. При этом дискретные состояния обоих видов процессов и режимы гибридных процессов представляются функциями логических переменных.

Наибольший интерес представляют компьютерные средства, обеспечивающие создание исполняемых спецификаций [1]. Модели, полученные на основе таких спецификаций, не требуют дополнительных преобразований для своего запуска на исполнение. Они могут запускаться непосредственно в среде разработки, что удобно, так как это позволяет реализовать итеративный подход к разработке моделей: после внесения дополнений и изменений можно сразу запустить модель на исполнение и оценить эффект от сделанных изменений. При необходимости корректировки полученной модели делается очередной шаг итерации.

Для решения задач анализа дискретно-событийных и гибридных динамических систем было предложено использовать транзитивные модели протекающих в системах процессов [2]. Эти модели непосредственно определяют переход (transition) системы из текущего состояния в следующее и позволяют представить процесс непосредственно в виде последовательности или траектории состояний. Для создания исполняемых спецификаций процессов используются транзитивные модели представления машины конеч-

ных состояний и гибридного автомата, которые непосредственно задают отношение следования между входным воздействием и текущим состоянием (режимом) с одной стороны и новым следующим состоянием (режимом) — с другой [3].

Логико-динамическая спецификация взаимодействующих процессов

Текущее состояние гибридных процессов задается множеством вещественных переменных X , представляющих непрерывные составляющие, и множеством логических переменных W , представляющих дискретные составляющие процессов. Среди этих переменных выделяются подмножества независимых внешних логических воздействий (команд) V и непрерывных вещественных воздействий X_i . В составе множества W выделяются также подмножество Q , содержащее переменные для представления состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов, и подмножество предикатов от непрерывных состояний G . Предикаты могут определять состояния дискретных и режимы гибридных процессов. В результате для представления процессов имеем следующие множества переменных:

$$W = V \cup Q \cup G; \quad (1)$$

$$X = X_i \cup X_s, \quad (2)$$

где X_s — множество непрерывных переменных состояния.

Для спецификации процессов необходимо определить функции переходов следующих типов:

$\sigma: W \rightarrow Q \times \{False, True\}$ — функция трансформации состояний дискретно-событийных процессов и режимов гибридных процессов;

$\delta: W \times X \rightarrow X_s$ — функция трансформации непрерывных состояний для возможных режимов гибридных процессов;

$\gamma: X \rightarrow G \times \{False, True\}$ — зависимость значений предикатов диапазонов от непрерывных состояний процессов.

Спецификация процессов сводится к заданию конкретных способов определения и вычисления указанных выше функций перехода. Эти способы существенным образом влияют на качество спецификации.

Функция γ является логической по определению, ее реализация связана с вычислением неравенств следующего вида:

$$(x_{j_1} \geq (a_k + x_{j_2})) \wedge (x_{j_3} \leq (b_k + x_{j_4})) \rightarrow g_k, \quad (3)$$

где $x_{j_1}, \dots, x_{j_4} \in X$, $g \in G$, a_k и b_k — границы диапазона.

Функцию перехода σ задают с помощью совокупности продукционных правил вида «Усло-

вие \rightarrow Действие» [4]. В качестве условия удобно использовать элементарные конъюнкции логических переменных, а в качестве действия — присвоение требуемых значений определенным дискретным состояниям и режимам процессов. Такие конъюнкции интуитивно понятным образом могут интерпретироваться как логико-динамические ситуации. Ситуацию можно определить с помощью следующих двух утверждений:

1) любая логическая переменная (воздействие, состояние, режим, предикат) или ее отрицание является динамической ситуацией;

2) если S_i и S_j — динамические ситуации, то $S_i \wedge S_j$ также является динамической ситуацией.

С учетом сказанного функция σ может быть представлена с помощью совокупности правил следующего вида:

$$S_j \rightarrow q'_{j_1}, \dots, q'_{j_i}, \dots, q'_{j_m}, \quad (4)$$

где S_j — текущая ситуация; $q'_{j_i} \in Q \times \{False, True\}$, $m = 1, \dots, |Q|$. Штрихи в данном случае обозначают сдвиг по времени между возникновением ситуации и изменением значений состояний процессов.

Для задания функции перехода δ необходимо определить алгоритмы вычисления транзитивных отношений между непрерывными состояниями для каждого режима. Это может быть сделано на основе использования алгоритмов и процедур реализации элементарных динамических процессов, элементарных функций и арифметических операций [5]. Основными элементарными процедурами являются интегрирующие, дифференцирующие, реализующие аperiodические и колебательные звенья, а также звенья чистого запаздывания.

В случае свободного одномерного непрерывного процесса отношение следования, или транзитивное отношение (transition relation), представляет собой бинарное отношение на множестве вещественных чисел вида $\tau(y, y')$ или $y' = \tau(y)$, где y — текущее состояние процесса, а y' — следующее состояние процесса. Транзитивное отношение τ определяется параметрами элементарного динамического звена и длительностью интервала времени Δt между y и y' . В случае вынужденного процесса оно также зависит от внешнего воздействия x . Для задания зависимости непрерывных состояний от логики развития гибридного процесса алгоритмы вычисления этих отношений включаются в исполнительные части правил, условными частями которых являются требуемые значения соответствующих режимов. В принятых обозначениях эти правила имеют вид

$$S_j \rightarrow x'_k = \tau_k(x_k, x), x_k \in X_s, x \in X, \quad (5)$$

где S_j — ситуация, определяющая режим; τ_k и x_k — соответствующие отношение и состояние; x — произвольная переменная процесса.

Таким образом, процессы могут быть специфицированы путем задания множеств логических и вещественных состояний (1), (2) и формирования совокупности трансформационных правил (3)–(5).

О реализации логико-динамического подхода к спецификации взаимодействующих процессов различной динамики

Компьютерная реализация процессов, специфицированных трансформационными правилами (3)–(5), производится путем использования интерпретатора этих правил. Интерпретатор представляет собой программный продукт, который может быть легко реализован с помощью компьютерных средств, использующих алгоритмические языки программирования, например Delphi. Архитектура и алгоритмы функционирования интерпретатора достаточно просты. Множества переменных состояния процессов (X и W) в интерпретаторе представляются массивами записей, каждая из которых содержит имя переменной и ее значение. Все правила реализуются с помощью условных операторов «if...then...». Обе части оператора содержат записи об использованных в данном правиле переменных. Основу интерпретатора составляет исполняющая процедура, которая в цикле сканирует списки правил. Алгоритм обработки правил вычисляет значение условной части правила. Если это значение равно *True*, то запускается алгоритм выполнения исполнительной части правила. В случае правила (4) логическим переменным из исполнительной части правила присваиваются указанные значения. При этом, естественно, могут измениться значения ситуаций, в определения которых эти переменные входят. В случае правила (5) запускается указанная в исполнительной части правила процедура вычисления транзитивного отношения, и найденное новое значение состояния непрерывного процесса присваивается соответствующей переменной.

На каждом шаге цикла обновления состояний процессов производится продвижение времени на интервал Δt . Возможны два режима продвижения времени. В режиме реального времени измеряется длительность каждого цикла, и время увеличивается на измеренное значение. В этом случае быстроедействие соответствует реальным процессам, а точность зависит от производительности компьютера и размерности модели. В режиме модельного времени время продвигается после каждого цикла на заданную пользователем величину. При этом точность определяется величиной заданного приращения времени, а быстроедействие зависит от производительности компьютера

и размерности модели. Использование современных персональных компьютеров для реализации моделей, содержащих тысячу правил, позволяет обеспечить величину приращения реального времени, не превышающую нескольких десятков микросекунд, что обеспечивает точность, приемлемую для большинства приложений.

Экспериментальные исследования описываемой технологии проводятся в СПИИРАН с помощью разработанного исследовательского прототипа компьютерной среды EnviCon [6], реализующей описываемый подход. Среда имеет достаточно наглядный интерфейс представления трансформационных правил и средства визуализации процессов. Рассматриваемые ниже примеры спецификации процессов будут, как правило, представлены в форматах редакторов этой среды.

Физическая модель движения тела вращения по наклонной плоскости

Специфицируем модель процессов, происходящих при движении тела вращения по наклонной плоскости. Для определенности будем считать, что телом вращения является шарик радиуса R . Шарик движется под влиянием скатывающей силы F , приложенной к центру и являющейся тангенциальной составляющей веса P : $F = P \sin \varphi$, где φ — угол наклона плоскости. Нормальная составляющая веса $F_n = P \cos \varphi$ компенсируется реакцией опоры. Сила трения $F_{тр}$ приложена к точке на поверхности шарика, касающейся склона. Взаимодействие этих сил определяет силу, вызывающую движение центра масс:

$$F_{дв} = F - F_{тр}, \quad (6)$$

и момент

$$M = F_{тр} R, \quad (7)$$

который вызывает вращение шарика вокруг центра [7]. Таким образом, движение шарика в модели представляется суммой прямолинейного движения центра шарика вдоль плоскости и вращения шарика вокруг центра.

Рассмотрим вначале движение шарика из состояния покоя. Ускорение $a_{дв}$ и скорость $V_{дв}$ центра шарика определяются силой $F_{дв}$ и массой шарика m : $a_{дв} = F_{дв} / m$, $V_{дв} = \int a_{дв} dt$. Угловое ускорение ε и угловая скорость вращения шарика ω вокруг центра определяются вращающим моментом M и моментом инерции (МИ) шарика относительно центра J_0 : $\varepsilon = M / J_0$, $\omega = \int \varepsilon dt$. Скорость точки шарика, касающейся плоскости, во вращательном движении $V_{вр} = \omega R$. Если трение отсутствует, то отсутствует и вращающий момент. Шарик скользит по плоскости без вращения. При наличии трения шарик вращается и скорость вращения точки касания плоскости противополо-

ложна скорости движения. Если трение маленькое, то скорость движения центра шарика $V_{дв}$ по модулю больше скорости $V_{вр}$ вращательного движения. В этом случае шарик вращается и скользит со скоростью скольжения $V_{ск} = V_{дв} - |V_{вр}|$. При увеличении трения скорость движения центра уменьшается, а скорость во вращательном движении увеличивается. Если эти скорости равны, то шарик катится по плоскости без скольжения. Дальнейшее увеличение трения не вызывает увеличения вращающей силы и вращающего момента, не приводит к изменению движения шарика. Это объясняется тем, что сила трения является силой реакции, она не может совершать работу, а может только расходовать энергию. Сила трения направлена против скорости скольжения. Если бы при увеличении трения скорость во вращательном движении стала больше скорости движения центра, то это привело бы к изменению направлений скорости скольжения и, соответственно, силы трения на противоположные значения. При этом изменился бы знак вращающего момента и увеличилась бы сила, движущая центр масс. В результате скорость вращения уменьшилась бы, а скорость движения центра увеличилась, что привело бы к восстановлению их равенства. Таким образом, свободное движение шарика по наклонной плоскости без скольжения является состоянием динамического равновесия. В этом случае силу, вызывающую вращение шарика, правильнее называть не силой трения, а тангенциальной составляющей силы реакции опоры. Сила трения зависит от коэффициента трения и нормальной составляющей веса:

$$F_{тр} = k_{тр} F_n, \quad (8)$$

где $k_{тр}$ — коэффициент трения. Эта зависимость выполняется в ситуации, когда имеется скольжение шарика, т. е. когда скорость движения центра масс $V_{дв}$ больше скорости движения наружной части шарика $V_{вр}$. При увеличении трения скорость скольжения уменьшается. Когда скольжение исчезает, сила трения достигает в данных условиях своего максимального значения $F_{тр}^*$ и не будет увеличиваться при увеличении коэффициента трения или нормальной силы. Значение этой силы определяется из условия равенства ускорения центра масс $a_{дв}$ тангенциальному ускорению $a_{вр}$ движения наружной точки шарика в его вращении. Сила $F_{тр}^*$ зависит от скатывающей силы F и от МИ шарика относительно центра масс J_0 . Определим эту зависимость. Ускорение $a_{вр} = \varepsilon R$, где ε — угловое ускорение. С учетом (7) имеем $a_{вр} = F_{тр} R^2 / J_0$. Ускорение центра масс $a_{дв} = (F - F_{тр}) / m$. Приравняв ускорения, находим

$$F_{тр}^* = \frac{F}{mR^2 / J_0 + 1}. \quad (9)$$

Для обруча, МИ которого $J_0 = mR^2$, имеем $F_{тр}^* = 0,5F$. Для шарика $F_{тр}^* = F/3,5$, так как для шарика $J_0 = 0,4mR^2$. Условием скольжения при движении тела вращения из состояния покоя является истинность предиката

$$|k_{тр} F_n| < |F_{тр}^*|. \quad (10)$$

При движении из состояния покоя силы и вращающий момент не меняются во время движения. Поэтому их можно вычислить перед началом моделирования как начальные условия. Начальные условия можно вычислять любым образом, а найденные значения состояний вводить вручную. Но удобнее вычислять начальные условия также с помощью правил. Правила для вычисления начальных условий обрабатываются не в цикле, а один раз перед началом моделирования. В данном случае достаточно задать угол наклона плоскости φ , массу тела m и его радиус R , ускорение свободного падения и одну из координат центра. Остальные начальные условия можно вычислить с помощью правил перед началом моделирования. Вычисляются: вес P , скатывающая сила F , нормальная сила F_n , МИ относительно центра J_0 , сила трения при скольжении (8) и сила трения при отсутствии скольжения (9), момент вращения M и угловое ускорение ε , сила движения центра масс $F_{дв}$ и ускорение центра $a_{дв}$. Также перед началом моделирования вычисляется значение предиката (10), в зависимости от которого силе трения $F_{тр}$ присваивается одно из двух возможных значений. При движении происходит изменение угловой скорости и угла поворота тела, скорости центра и значений его координат. Состояния этих процессов вычисляются в цикле обновления состояний.

Если в начальном состоянии тело не неподвижно, а имеет скорость движения вверх или вниз вдоль плоскости или (и) вращается с некоторой угловой скоростью в одну или в другую сторону, то в начальное время скольжение будет иметь место независимо от величины коэффициента трения и нормальной составляющей веса. Скорость скольжения равна сумме скорости движения центра и скорости точки на поверхности тела во вращательном движении и может быть направлена вверх или вниз вдоль плоскости. При наличии скольжения величина силы трения определяется формулой (8), а ее направление противоположно скорости скольжения. Для представления ситуации, когда имеется скольжение, введем логическую переменную скольжение. Эта переменная должна принимать значение *True* как в случае истинности предиката (10), так и в случае отличия от нуля абсолютного значения скорости скольжения, т. е. истинности предиката

$$|V_{ск}| > 0. \quad (11)$$

Значение ситуации скольжение формируется двумя правилами (4), реализующими дизъюнкцию (логическое ИЛИ) от этих двух предикатов:

$$|k_{\text{тр}} F_{\text{н}}| < |F_{\text{тр}}^*| \rightarrow \text{скольжение};$$

$$|V_{\text{ск}}| > 0 \rightarrow \text{скольжение}.$$

Для задания знака силе трения необходимо определять знак скорости скольжения $\text{sign}(V_{\text{ск}})$. Так как в этом случае сила трения может менять величину и знак, то ее вычисление необходимо производить в цикле обновления состояний.

На части экранной формы редактора правил среды EnviCon представлены правила для обновления состояний процессов (рис. 1). В зависимости от значения ситуации скольжение первое или второе правило определяет величину силы трения. Если значение ситуации должно быть *True*, то ее идентификатор представляется в правиле на белом фоне, иначе — на сером. Третье правило присваивает силе трения знак, противоположный скорости скольжения. Следующее правило вычисляет вращающий момент в соответствии с (7). Далее находится угловое ускорение, после чего интегрированием находятся угловая скорость и угол поворота тела. С помощью восьмого правила вычисляется скорость наружной точки тела во вращательном движении. Девятое правило по формуле (6) находит силу, движущую центр масс тела. Далее последовательно находятся ускорение центра, его скорость, составляющие скорости по координатным осям и значения координат. Шестнадцатое правило вычисляет скорость скольжения как сумму скорости центра и скорости наружной точки тела во вращательном движении.

Следующее правило находит абсолютное значение этой скорости, которое необходимо для вычисления значения предиката (11). Последнее правило определяет знак скорости скольжения, используемый в третьем правиле. В представленном виде модель адекватна системе при произвольных значениях и знаках начальных условий, таких как наклон плоскости, скорость движения центра и угловая скорость вращения вокруг центра.

Нетрудно видеть, что спецификация процессов с помощью трансформационных правил очень близка языку математики, используемому для описания физической модели системы.

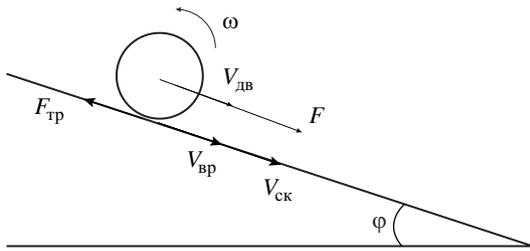
Валидация модели проводилась путем проверки выполнения закона сохранения энергии. С этой целью правила (см. рис. 1) дополнялись правилами для вычисления начальных и текущих значений потенциальной и кинетической энергий. При проведении экспериментов с моделью производились изменения знака и величины наклона плоскости, радиуса и МИ тела, а также изменения начальных условий: величин и знаков угловой скорости и скорости центра масс. Во всех экспериментах погрешность выполнения закона сохранения энергии была меньше 0,001 % при величине продвижения модельного времени $dt=2$ мкс.

Приведем результаты одного из экспериментов. Параметры системы: угол наклона $\varphi=-20^\circ$, $k_{\text{тр}}=0,3$, масса $m=1$, радиус $R=1,5$, МИ шарика $J_0=0,4mR^2$. Начальные условия: скорость движения центра масс $V_{\text{дв}}=0$, угловая скорость $\omega=20$. Схема движения шарика и отношения сил и скоростей показаны на рис. 2.

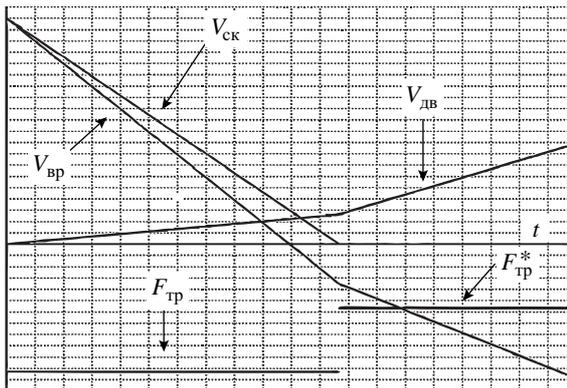
Графики процессов изменения скоростей движения шарика приведены на рис. 3. В данном

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация / событие	имя параметра	значение	имя параметра	значение	Приоритет
1	Сила трения F _{тр}	Пропорциональная	1.00	k _{тр} * F _н		скольжение					1
2	Сила трения F _{тр}	Пропорциональная	1.00	F _{тр}		скольжение					1
3	Сила трения F _{тр}	Умножение	-1.00	Сила трения F _{тр}	Sign(V _{скольж})	Ever True					1
4	момент вращения M	Умножение	-1.00	Сила трения F _{тр}	радиус R	Ever True					1
5	угловое ускорение	Деление	1.00	момент вращения M	МИ отн. центра J ₀	Ever True					1
6	угл. скор. Omega	Интеграл	-1.00	угловое ускорение		Ever True					1
7	ал. угол вращ.	Интеграл	-1.00	угл. скор. Omega		Ever True					1
8	Ввр вращения	Умножение	1.00	угл. скор. Omega	радиус R	Ever True					1
9	Сила F _{дв} ц.м.	Сумма / разность	1.00	сила танг. F _{тнг}	Сила трения F _{тр}	Ever True	2-ой коэффициент	-1.00			1
10	Ускорение ц. м.	Деление	1.00	Сила F _{дв} ц.м.	масса m	Ever True					1
11	скорость движ.	Интеграл	1.00	Ускорение ц. м.		Ever True					1
12	V _x	Умножение	1.00	скорость движ.	cos(φ)	Ever True					1
13	V _y	Умножение	1.00	скорость движ.	sin(φ)	Ever True					1
14	X координата	Интеграл	1.00	V _x		Ever True					1
15	Y координата	Интеграл	1.00	V _y		Ever True					1
16	V _{ск} скольжения	Сумма / разность	1.00	скорость движ.	Ввр вращения	Ever True	2-ой коэффициент	-1.00			1
17	Abs(V _{скольж})	Абсолютная	1.00	V _{ск} скольжения		Ever True					1
18	Sign(V _{скольж})	Реле	1.00	V _{ск} скольжения		Ever True	Верх. ограничение	1.00	Нижн. ограничение	-1.00	1

■ Рис. 1. Правила трансформации состояний процессов при движении шарика по наклонной плоскости



■ Рис. 2. Отношения сил и скоростей в эксперименте



■ Рис. 3. Процессы изменения скоростей и силы трения при движении шарика

случае в начале движения скорость вращения $V_{вр}$ положительна, сила трения $F_{тр}$ — отрицательна. Коэффициент трения мал, и сила трения $F_{тр}$ меньше скатывающей силы F . Поэтому шарик движется вниз по склону в положительном направлении со скоростью $V_{дв}$, медленно возрастающей. Скорость вращения $V_{вр}$ достаточно быстро уменьшается. Скорость скольжения $V_{ск}$ равна сумме этих скоростей и тоже уменьшается. Когда скорость скольжения становится равной скорости движения, скорость вращения меняет знак и растет по величине. Когда скорость вращения сравнивается по величине со скоростью движения, скорость скольжения обращается в ноль. В этот момент происходит скачкообразное уменьшение силы трения, после чего $V_{дв}$ и $V_{вр}$ увеличивают скорости роста, оставаясь равными по величине и противоположными по знаку. Скорость скольжения остается равной нулю.

Спецификация процессов, заданных структурной схемой элементарных процессов

Одним из способов спецификации динамики систем является использование передаточных функций элементарных динамических звеньев и структурных схем их соединения для представления сложных динамических систем [8]. При этом

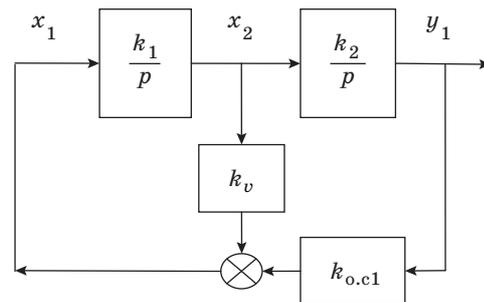
используются последовательные и параллельные, прямые и обратные соединения элементарных звеньев. Такой подход находит применение при разработке систем управления. Процессы, заданные структурными схемами соединений элементарных динамических звеньев, могут быть специфицированы и реализованы с помощью трансформационных правил (5). Особенности формирования трансформационных правил рассмотрим на примере спецификации процессов, заданных структурной схемой (рис. 4).

Схема состоит из двух интеграторов, охваченных общей отрицательной обратной связью и отрицательной обратной связью по скорости. Эта схема специфицирует колебательный процесс. Как видно из схемы, реализация специфицируемых ею процессов может быть произведена путем соединения интегрирующих, суммирующих и пропорциональных звеньев.

При спецификации процессов с помощью правил каждый элемент схемы представляется правилом, реализующим соответствующую процедуру. Соединение процедур производится за счет того, что выходная переменная одной процедуры используется в качестве аргумента другой. На рис. 5 приведены правила, соответствующие схеме рис. 4. Имена переменных в правилах совпадают с именами, использованными на схеме.

Первое правило формирует процесс обратной связи по скорости с $k_v=0,10$, второе — процесс основной обратной связи с $k_{o.c1}=1$. Третье правило осуществляет суммирование обеих обратных связей и инвертирование суммарного значения, тем самым вычисляет значение x_1 на входе первого интегратора. Четвертое правило производит интегрирование с $k_1=20$ и определяет значение x_2 на входе второго интегратора. Пятое правило осуществляет интегрирование с $k_2=20$ и вычисляет значение y_1 состояния процесса на выходе схемы.

Процессы, определяемые схемой, описываются обыкновенными линейными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами, аналитические решения которых находятся достаточно просто. Применяя формулу для замыкания системы отрицательной обратной



■ Рис. 4. Структурная схема колебательного звена

Редактор правил трансформации непрерывных состояний, Колебат. звено

Иск. ПМ вык. **Логические** Возд. Входы Состояния Предикаты ПМ сост. из модели Колебат. звено OK

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация / событие	имя параметра	значение	имя параметра	значение	Приоритет
1	Kv * X2	Пропорциональная	0.10	X2		Ever True					1
2	Koc * Y1	Пропорциональная	1.00	Y1		Ever True					1
3	X1	Сумма / разность	-1.00	Kv * X2	Koc * Y1	Ever True	2-ой коэффициент	1.00			1
4	X2	Интеграл	20.00	X1		Ever True					1
5	Y1	Интеграл	20.00	X2		Ever True					1

Рис. 5. Правила для реализации процессов, заданных структурной схемой

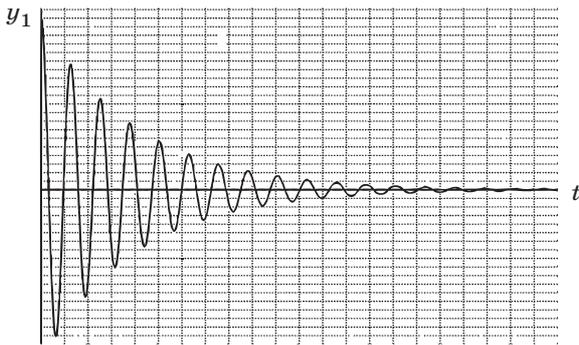


Рис. 6. График процесса $y_1(t)$ на выходе схемы рис. 4

связью к обоим контурам, находим его передаточную функцию в следующем виде:

$$\Phi_1(p) = \frac{k_1 k_2}{p^2 + k_1 k_v p + k_1 k_2 k_{o.c1}}$$

Вид переходного процесса в данном звене определяется корнями знаменателя $\lambda_{1,2}$ приведенной передаточной функции. Для выбранных значений коэффициентов $\lambda_{1,2} = -1,0 \pm j19,975$. Соответствующий найденным значениям корней переходный процесс представляет собой колебательный процесс с круговой частотой $\omega_1 = 19,975$ (период колебаний $T = 0,314$ с) и амплитудой, изменяющейся по экспоненте $A = A_0 e^\alpha$ с показателем $\alpha = -t$. На рис. 6 представлен процесс изменения y_1 , реализованный с помощью правил (см. рис. 5) для начального значения $y_1(0) = 200$ и нулевых начальных значений остальных переменных. Масштаб времени равен 100, т. е. 1 секунда равна 100 делениям. Измерение параметров этого процесса показало, что они хорошо совпадают с расчетными значениями.

Спецификация процессов, заданных обыкновенными дифференциальными уравнениями

К настоящему времени разработано и исследовано значительное количество обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих процессы в различных динамических системах, представляющих интерес для науки и техники.

Компьютерная реализация этих процессов также, очевидно, может представлять интерес. Она достаточно просто может быть произведена с помощью трансформационных правил.

Рассмотрим вначале самое простое дифференциальное уравнение $dy/dt = y$. Нетрудно видеть, что это уравнение удовлетворяет экспоненциальная функция $y = e^t$, производная от которой равна самой функции. Очевидно также, что в данном случае справедливо интегральное уравнение $y = \int y dt$. В соответствии с этим уравнением данный процесс может быть реализован с помощью одного трансформационного правила, содержащего транзитивную процедуру интегрирования (рис. 7).

График процесса, реализованного с помощью этого правила при начальном значении $y(0) = 1$, представлен на рис. 8. На графике масштаб по оси ординат равен 1, по оси абсцисс — 100. График соответствует функции $y = e^t$, например $e^3 = 20,086$.

Аналогичным образом с помощью трансформационных правил можно реализовать процессы, заданные системами обыкновенных дифференциальных уравнений. Покажем это на примере реализации процессов, заданных системой

Редактор правил трансформации непрерывных состояний, Простейшее диф. ур

Иск. ПМ вык. **Логические** Возд. Входы Состояния Предикаты ПМ сост.

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация / событие
1	Y	Интеграл	1.00	Y		Ever True

Рис. 7. Правило для реализации процесса, заданного уравнением $dy/dt = y$

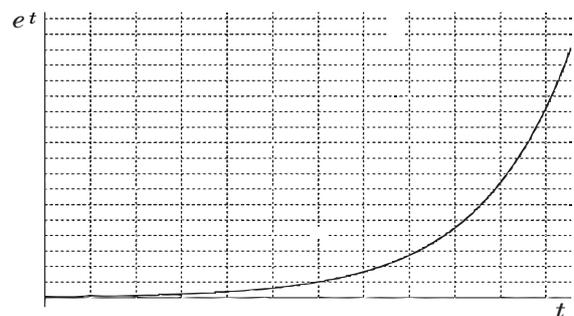


Рис. 8. Реализация процесса e^t , специфицированного правилом (см. рис. 7)

Редактор правил трансформации непрерывных состояний, Ур-ие Лоренца

Исх. ПМ вых. **Логические** Возд. Входы Состояния Предикаты ПМ сост. из модели Ур-ие Лоренца

№	Переменная	Процедура	Коэффициент	Аргумент 1	Аргумент 2	Ситуация / событие	Имя параметра	значение
1	$x * z$	Умножение	1.00	x	z	Ever True		
2	$-(y + x * z)$	Сумма / разность	-1.00	y	$x * z$	Ever True	2-ой коэффициент	1.00
3	$x * y$	Умножение	1.00	x	y	Ever True		
4	dx/dt	Сумма / разность	10.00	y	x	Ever True	2-ой коэффициент	-1.00
5	dy/dt	Сумма / разность	1.00	$-(y + x * z)$	x	Ever True	2-ой коэффициент	28.00
6	dz/dt	Сумма / разность	1.00	$x * y$	z	Ever True	2-ой коэффициент	-2.6666667
7	x	Интеграл	1.00	dx/dt		Ever True		
8	y	Интеграл	1.00	dy/dt		Ever True		
9	z	Интеграл	1.00	dz/dt		Ever True		

■ Рис. 9. Правила для реализации процессов, заданных системой Лоренца

Лоренца, представляющей собой систему трех уравнений первого порядка:

$$\frac{dx}{dt} = \sigma(y - x); \quad \frac{dy}{dt} = \rho x - y - xz; \quad \frac{dz}{dt} = xy - \beta z.$$

Здесь x, y и z — переменные системы; t — время, а σ, ρ, β — параметры системы. Эта система уравнений была разработана Эдвардом Лоренцом в 1963 г. и использовалась им в качестве математической модели процессов атмосферной конвекции. При разработке трансформационных правил, соответствующих системе уравнений, вначале формируются правила для вычисления переменных, представляющих правые части уравнений. Затем эти переменные используются в качестве подынтегральных функций для реализации переменных системы. На рис. 9 приведены правила реализации процессов системы Лоренца для следующих значений параметров: $\sigma = 10, \rho = 28, \beta = 2,6666667$.

Первые три правила выполняют вспомогательные арифметические операции с переменными системы. Следующие три правила вычисляют производные от переменных системы, соответствующие трем правым частям уравнений, а три последних правила их интегрируют и вычисляют переменные системы.

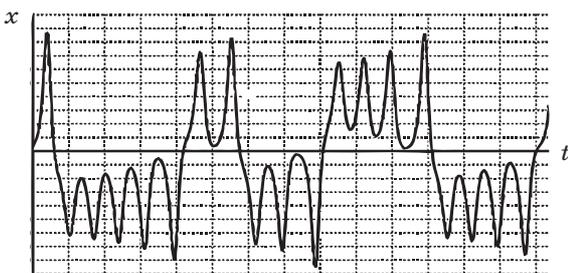
При запуске этих правил на обработку интерпретатором реализуются процессы изменения

всех переменных системы. Визуализация изменения x представлена на рис. 10. Масштабный коэффициент визуализации по оси ординат равен 10. Были установлены следующие начальные значения переменных: $x = 1, y = 1, z = 10$. Приведенный график процесса совпадает с графиком (см. Figure 4.9 в работе [9]) решения данной системы уравнений, полученного с помощью MatLab при тех же начальных условиях.

Заключение

Исходными спецификациями процессов являются физические модели динамических систем, которые в большинстве случаев представляются на языке математического анализа, элементарной математики и математической логики. Эти модели полностью определяют разработку логико-динамических спецификаций процессов, которые в свою очередь могут быть использованы для компьютерной реализации процессов. При этом трудоемкости разработок как спецификаций, так и программных средств их обработки небольшие. Как видно из приведенных примеров, язык спецификаций близок к языку математических описаний физических моделей. Это обеспечивает прозрачность спецификаций и упрощает валидацию и модификацию моделей.

Рассмотренный подход к реализации процессов был подвергнут всестороннему экспериментальному исследованию. На его основе был создан прототип компьютерной среды (EnviCon) для разработки исполняемых спецификаций взаимодействующих гибридных процессов. С помощью этой среды были разработаны модели нескольких типовых тестовых систем (стабилизация перевернутого маятника, позиционирование ролика на плоскости и др.) и модели трех больших промышленных установок [10]. Полученный опыт позволяет утверждать, что логико-динамические спецификации обладают высокими выразительными возможностями и могут быть использованы для создания эффективных программных средств реализации процессов.



■ Рис. 10. График процесса $x(t)$ системы уравнений Лоренца

Литература

1. Шпаков В. М. Исполняемые спецификации транзитивных моделей технологических процессов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2004. № 3. С. 38–45.
2. Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G. J. Discrete Abstractions of Hybrid Systems // Proc. of the IEEE 88. 2000. P. 971–984.
3. Lacoste-Julien S. Hybrid Systems Modeling. — McGill University, School of Computer Science, Technical Report. August 2002. <http://msdl.cs.mcgill.ca/people/slacoste/research/report/SummerReport.html> (дата обращения: 30.06.2016).
4. Brownston L., Farrell R., Kant E., Martin N. Programming Expert Systems in OPS5: An Introduction to Rule-Based Programming: Addison-Wesley Series in Artificial Intelligence. — Addison-Wesley, 1985. — 471 p.
5. Howe R. M. Analog Computer Fundamentals // IEEE Contr. Syst. Mag. 2005. Vol. 25. N 3. P. 29–36.
6. Шпаков В. М. Прототип среды моделирования структурированных совокупностей взаимодействующих процессов // Имитационное моделирование. Теория и практика: сб. докл. Второй Всерос. конф., Санкт-Петербург, 19–21 октября 2005. Т. II. С. 292–295.
7. Старжинский В. М. Теоретическая механика. — М.: Наука, 1980. — 464 с.
8. Бессекерский В. А., Попов Е. П. Теория систем автоматического регулирования. — М.: Наука, 1966. — 992 с.
9. Edward R. Scheinerman. Invitation to Dynamical Systems. — Prentice Hall, 1995. — 373 p.
10. Буткевич И. К., Рыдник Е. А., Шпаков В. М. Использование среды EnviCon для моделирования производства жидкого гелия // Тр. СПИИРАН. 2007. Вып. 5. С. 328–332.

UDC 681.5.017

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.68

Computer Implementation of Processes on the Base of Their Logic-Dynamic Specification

Shpakov V. M.^a, PhD, Tech. Associate Professor, vlad@iiias.spb.su^aSaint-Petersburg Institute for Informatics and Automation of RAS, 39, 14 Line, V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The need for process implementation exists in computer modeling of dynamic systems when developing control systems. Essential are the complexity of developing a specification and developing its software implementation based on the system model, as well as the effectiveness of this implementation. Besides, the expressiveness and clarity (transparency) of the specification are important, as well as specification-determined abilities to modify the model and make the simulation more convenient. A logic-dynamic specification of processes is not widely used yet, and its properties are not known to a wide circle of modelers. **Purpose:** Our goal is an experimental study of the technology for developing dynamic system simulation models, based on logic-dynamic specification of the processes, evaluation of complexity and expressive possibilities of the specifications, and the quality of the models produced. **Results:** Means of logic-dynamic specification of system models are worked out. The sources of knowledge about the functioning of the systems are presented in the form of physical models, structural diagrams of elementary processes, or systems of differential equations. The specification properties are illustrated by examples of three models developed. The given specifications and computer simulation of the processes suggest broad expressive possibilities of logic-dynamic specification, its suitability for effective software implementation of processes, and the convenience of validation and modification of the models obtained on its base. **Practical relevance:** Logic-dynamic specification of processes can greatly simplify the development of computer models for complex dynamic systems, especially when the initial information about the dynamics of individual parts of the system is presented in different formats. Due to the transparency of the specifications, the models can be efficiently used for educational purposes.

Keywords — Simulation Modelling, Logic-Dynamic Systems, Rule-Based Programming.

References

1. Shpakov V. M. Executable Specifications of Production Processes Transitive Models. *Mekhatronika, avtomatizatsiia, upravlenie*, 2004, no. 3, pp. 38–45 (In Russian).
2. Alur R., Henzinger T. A., Lafferriere G., Pappas G. J. Discrete Abstractions of Hybrid Systems. *Proc. of the IEEE 88*, 2000, pp. 971–984.
3. Lacoste-Julien S. *Hybrid Systems Modeling*. McGill University, School of Computer Science, Technical Report. August 2002. Available at: <http://msdl.cs.mcgill.ca/people/slacoste/research/report/SummerReport.html> (accessed 30 May 2016).
4. Brownston L., Farrell R., Kant E., Martin N. *Programming Expert Systems in OPS5: An Introduction to Rule-Based Programming*. Addison-Wesley Series in Artificial Intelligence. Addison-Wesley, 1985. 471 p.
5. Howe R. M. Analog Computer Fundamentals. *IEEE Contr. Syst. Mag.*, 2005, vol. 25, no. 3, pp. 29–36.
6. Shpakov V. M. An Environment Prototype for Modeling of Structured Sets of Cooperating Processes. *Sbornik dokladov vtoroi Vcerossiiskoi konferentsii "Imitatsionnoe modelirovanie. Teoriya i praktika"* [Proc. 2nd All-Russian Conf. "Simulation. Theory and Practice"], Saint-Petersburg, 2005, vol. 2, pp. 292–295 (In Russian).
7. Starzhinskii V. M. *Teoreticheskaiia mekhanika* [Engineering Mechanics]. Moscow, Nauka Publ., 1980. 464 p. (In Russian).
8. Bessekerskiy V. A., Popov E. P. *Teoriia sistem avtomaticheskogo upravleniia* [The Theory of Automatic Control Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1966. 992 p. (In Russian).
9. Edward R. Scheinerman. *Invitation to Dynamical Systems*. Prentice Hall, 1995. 373 p.
10. Butkevich I. K., Rydник E. A., Shpakov V. M. Using Environment EnviCon for Liquid Helium Production Simulation. *Trudy SPIIRAN*, 2007, vol. 5, pp. 328–332 (In Russian).

МОДЕЛЬ ПРОФИЛЯ КОМПЕТЕНЦИЙ ЗЛОУМЫШЛЕННИКА В ЗАДАЧЕ АНАЛИЗА ЗАЩИЩЕННОСТИ ПЕРСОНАЛА ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТ СОЦИОИНЖЕНЕРНЫХ АТАК

М. В. Абрамов^{а, б, в}, аспирант

А. А. Азаров^а, канд. техн. наук

Т. В. Тулупьева^{а, б, г}, канд. псих. наук, доцент

А. Л. Тулупьев^{а, б}, доктор физ.-мат. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, РФ

^бСанкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН, Санкт-Петербург, РФ

^вМосковский педагогический государственный университет, Москва, РФ

^гСеверо-Западный институт управления Российской академии народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: возросшая сложность компьютерных сетей и механизмов защиты, увеличение количества уязвимостей пользователей, а также возможностей по реализации атак обуславливает необходимость разработки мощных автоматизированных средств (систем) анализа защищенности. В аппаратном и программно-техническом срезе эти проблемы решаются, существуют разработки систем анализа защищенности, в то же время эти средства, как правило, не учитывают или учитывают частично поведение пользователей. В последнее время существенная часть инцидентов нарушения информационной безопасности происходит с применением методов социальной инженерии. Общее направление исследований заключается в построении оценки защищенности персонала информационных систем от социоинженерных атак. **Цель:** предложить формальную модель злоумышленника и входящую в нее модель профиля его компетенций, на основании которых будет построена многофакторная оценка вероятности успеха социоинженерного атакующего воздействия злоумышленника на пользователя. **Результаты:** описана формальная модель злоумышленника, состоящая из профиля компетенций, представляющего собой набор пар компетенция — выраженность компетенции; ресурсов, доступных злоумышленнику; начальных знаний об архитектуре системы; пользователей, к которым злоумышленник имеет доступ до момента начала атаки; целей злоумышленника. В свою очередь на основе данной модели предложен способ расчета многофакторной оценки вероятности успеха социоинженерного атакующего воздействия злоумышленника на пользователя за счет агрегирования широкого круга факторов, характеризующих их. **Практическая значимость:** разработанные модели позволят оценивать защищенность информационной системы от социоинженерных атак, выявлять наиболее уязвимые звенья системы и своевременно предпринимать необходимые меры по обеспечению защиты информации.

Ключевые слова — социоинженерные атаки, защита пользователей, информационная безопасность, профиль компетенции злоумышленника.

Введение

Компьютерные системы, хранящие и обрабатывающие информацию, активно используются во многих отраслях производства и в сфере услуг. Столь широкое распространение информационных технологий заставляет уделять все более заметное внимание вопросам информационной безопасности (ИБ). В последнее время атаки на информационные системы происходят чаще, приносят большие убытки и требуют больше ресурсов и времени для установления виновных в подобных преступлениях. Исследование 2014 г. с участием компаний из США показало, что средний размер убытков американских компаний от киберпреступлений вырос более чем на 9 % по сравнению с 2013 г., до 12,7 млн дол. Среднее время, необходимое для расследования атаки на информационные системы, также выросло и составило 45 дней в 2014 г. по сравнению с 32 днями в 2013 г. [1].

В настоящее время большая часть исследований в области обеспечения сохранения конфиденциальности информации посвящена усовершенствованию технической базы, осуществляющей контроль ИБ [2–8]. В этом направлении вопросы ИБ достаточно хорошо изучены, разработано большое количество средств, позволяющих снизить вероятность успеха программно-технической атаки злоумышленника. Хотя термин «информационная безопасность» определяется по-разному, в большинстве случаев основное внимание уделяется защите информации с использованием программных, аппаратных и программно-аппаратных решений [9]. В то же время пользователь информационной системы, к данным которой злоумышленник пытается получить доступ, является одним из ее самых уязвимых мест [10]. Согласно исследованию Лаборатории Касперского [11], наиболее распространенные инциденты ИБ так или иначе связаны с действиями пользователей систе-

мы. Одним из наиболее эффективных видов атак на ИБ является корпоративный шпионаж, которому подвергаются более четверти компаний, и почти 80 % из них успешно [11].

Сотрудник компании, имеющий доступ к конфиденциальной информации, может преднамеренно или непреднамеренно нарушить ее безопасность (конфиденциальность, целостность или доступность) [12, 13]. В исследовании В. С. Веденева и И. В. Бычкова [14] отмечается, что санкционированный пользователь информационной системы, вероятно, знаком с рядом сотрудников, обслуживающих и администрирующих информационную систему; имеет ряд разрешений на доступ к документам, хранящимся в информационной системе; может знать аутентификационные данные коллег; обладает физическим доступом к некоторым компьютерам. В связи с этим взаимодействие пользователей информационной системы со злоумышленниками может нанести серьезный ущерб компании. В частности, в России средний ущерб для компаний СМБ-сегмента (сегмент среднего и малого бизнеса) от серьезного инцидента составляет 780 000 руб., для крупных предприятий эта сумма может достигать 20 млн руб. [11].

Таким образом, проблемы ИБ и защиты пользователей от социоинженерных атак, т. е. атак, направленных в первую очередь на персонал, в настоящее время весьма актуальны. Исследования в этой области помогут в создании многоуровневых систем безопасности, более устойчивых к атакам злоумышленников. Под защитой пользователя от социоинженерной атаки в данной статье понимается деятельность по повышению устойчивости защищаемого пользователя к социоинженерным воздействиям на него заинтересованным субъектом в целях нарушения целостности, доступности и конфиденциальности защищаемой информации. В свою очередь под устойчивостью пользователя понимается способность не изменять свое поведение под воздействием злоумышленника.

Общее направление исследований заключается в построении оценки защищенности персонала информационных систем от социоинженерных атак. Под защищенностью персонала понимается степень его устойчивости к социоинженерным атакам злоумышленника. Цель настоящей работы — предложить формальную модель злоумышленника и входящую в нее модель профиля компетенций злоумышленника (ПКЗ), на основании которых будет построена многофакторная оценка вероятности успеха социоинженерного атакующего воздействия злоумышленника на пользователя. Указанная цель достигается за счет агрегирования сведений о более широком круге факторов, влияющих на оценку вероятности успеха социоинженерного

атакующего воздействия злоумышленника, и развития моделей комплекса «информационная система — персонал — критичные документы». Оценка позволит выявлять наиболее уязвимые звенья системы и своевременно предпринимать необходимые меры по обеспечению защиты информации.

Возросшая сложность компьютерных сетей и механизмов защиты [6], увеличение количества уязвимостей пользователей, а также возможностей по реализации атак обуславливает необходимость разработки мощных автоматизированных средств (систем) анализа защищенности. Эти системы призваны выполнять задачи по обнаружению уязвимостей пользователей информационной системы, информированию служб безопасности, выявлению возможных трасс атакующих действий нарушителей, определению критичных сетевых ресурсов и выбору адекватной угрозам политики безопасности, которая задействует наиболее подходящие в заданных условиях защитные механизмы. Уязвимость пользователя определяется по аналогии с программно-технической уязвимостью и включает в себя некоторую характеристику пользователя, которая делает возможным успех социоинженерного атакующего действия злоумышленника [15].

Решение этих задач позволит существенно повысить защищенность пользователей информационных систем, т. е. уменьшить вероятность успеха атаки злоумышленника на информационную систему. Для увеличения точности данной оценки предлагается расширить модель комплекса «информационная система — персонал — критичные документы» (ИСПКД) за счет включения ПКЗ и перехода к более полной модели, а именно «критичные документы — информационная система — персонал — злоумышленник» (КДИСПЗ). В статье наиболее подробно рассмотрен подход к моделированию злоумышленника в рамках данной парадигмы и идея формирования профиля компетенций, включенного в модель.

Комплекс «информационная система — персонал — критичные документы»

В работе [16] были представлены компоненты, входящие в комплекс ИСПКД. Информационная система в этом комплексе включает в себя программно-технические устройства. В качестве таких устройств могут выступать [12]:

- ПК и различные периферийные устройства;
- сетевые адаптеры для ПК и сетевые кабели;
- сетевое оборудование, такое как концентраторы и коммутаторы, которые соединяют между собой ПК и принтеры.

С каждым из таких устройств ассоциированы информационные объекты (критичные докумен-

ты — материальные объекты с зафиксированной на них информацией в виде текста, звукозаписи или изображения, имеющие ценность для компании), которые хранятся на этих устройствах или могут быть доступны через них.

Также в комплекс включен персонал информационной системы. Пользователи системы имеют некоторые характеристики, такие как права доступа, должности и др. Ключевое отличие модели информационной системы с персоналом от информационной системы без персонала заключается в недетерминированности реакции пользователя на воздействие злоумышленника. Иными словами, успех социоинженерного атакующего воздействия злоумышленника на пользователя информационной системы носит недетерминированный вероятностный характер. Для вычисления оценок вероятности успеха таких воздействий был введен профиль уязвимостей пользователей (ПУП) [17, 18]. Кроме того, злоумышленник, как правило, не всемогущ. Он обладает ограниченными ресурсами, неполными знаниями, и набор его компетенций не универсален. Это ограничение может быть отражено с помощью ПКЗ, описываемого в данной статье.

Если удалось построить указанные выше модели и затем идентифицировать их параметры, пусть с использованием оценок различной степени точности, то на их основе, в свою очередь, уже можно строить оценки, показатели, индексы или характеристики степени защищенности как отдельных пользователей информационных систем, а также, при определенных допущениях, и отдельных критичных документов, так и системы и персонала в целом. При этом расчеты сведутся к вычислению вероятности сложных событий и на их основе математических ожиданий целевых величин (например, математического ожидания ущерба от социоинженерных атакующих воздействий злоумышленника либо вероятности того, что критичный документ не будет поражен) по аналогии с работой [6].

Комплекс «критичные документы — информационная система — персонал — злоумышленник»

В работе [16] были предложены две модели имитации социоинженерных атак злоумышленника на пользователей информационной системы: на социальном графе пользователей и в комплексе ИСПКД. Данные модели дают оценку защищенности пользователей от социоинженерной атаки злоумышленника на основе связей между пользователями, в то же время в данных моделях не учитывается ПКЗ. Предлагается рассмотреть комплекс «критичные документы — информаци-

онная система — персонал — злоумышленник» вместо комплекса ИСПКД, который позволит увеличить точность оценки защищенности пользователей информационных систем от социоинженерных атак за счет вероятностных оценок действий злоумышленника. Профиль компетенций злоумышленника имеет большое значение наравне с ПУП для оценки успешности атакующего воздействия.

Важность изучения особенностей двух сторон взаимодействия: того, кто влияет, и того, на кого влияют, — подчеркивается в научной литературе. Известный специалист в области психологии влияния Роберт Чалдини в своей монографии [19] отмечал, что изучать психологию уступчивости он начал с серии экспериментов, позволяющих выяснить, какие принципы и особенности лежат в основе податливости в отношении просьб или требований, но вскоре понял, что нужно изучать и вторую сторону данного процесса. Он назвал людей, способных принудить других к выполнению тех или иных просьб, «профессионалами уступчивости», поскольку они хорошо знают, как построить взаимодействие, чтобы собеседник уступил и выполнил просьбу или требование. «Они знают, что срабатывает, а что — нет <...>. Такие люди стараются, во что бы то ни стало, заставить окружающих уступить, от этого зависит их успех в жизни. Те, кто не знает, как вынудить людей сказать «да», обычно терпят поражение; те же, кто знает, — процветают» [19]. Р. Чалдини в результате своих наблюдений вывел шесть основных принципов влияния: принцип последовательности, принцип взаимного обмена, принцип социального доказательства, принцип авторитета, принцип благорасположения, принцип дефицита. Однако в число главных принципов не было включено правило «личного материального интереса», которое автор рассматривает как «некоторую аксиому, которая заслуживает признания, но не подробного описания».

Модель пользователя в рамках данного исследования может быть представлена в виде $U = \langle C, Z, PV, L \rangle$, где C — критичные документы, к которым пользователь имеет доступ; Z — контролируемые зоны (т. е. помещения, в которых пользователь может физически присутствовать, например, серверная, отдел маркетинга и пр.); PV — ПУП; L — матрица взаимоотношений между пользователями.

Рассмотрим подробнее некоторые компоненты модели пользователя. PV представлен в работе [20]. C и Z — это столбцы из соответственно l и m элементов. $c_1..c_l$ — элементы столбца C , которые характеризуют уровень доступа пользователя к соответствующему критическому документу и могут иметь значения: 0 — данный пользователь не имеет доступа к документу, 1 — имеет доступ

к чтению, 2 — имеет доступ к редактированию и удалению. $z_1..z_m$ — элементы столбца Z , которые характеризуют наличие доступа пользователя к соответствующей контролируемой зоне и могут принимать значения 0 — данный пользователь не имеет доступа к контролируемой зоне или 1 — имеет доступ к контролируемой зоне.

Модель злоумышленника представим в виде $M = \langle R, S_0, U_0, P, G \rangle$, где R — ресурсы, доступные злоумышленнику (например, время, деньги или личностные особенности злоумышленника); S_0 — начальные знания нарушителя об архитектуре системы (ее сотрудниках, их уязвимостях, доступных им критичных документах, взаимоотношениях персонала в контролируемых зонах); U_0 — пользователи, к которым злоумышленник имеет доступ до момента начала атаки; P — ПКЗ (будет представлен ниже); G — цели злоумышленника (например, получение доступа к той или иной информации).

Начальные знания нарушителя об архитектуре системы, S_0 , представляют собой набор U_i ; $i=1..n$, при этом информация, которая злоумышленнику неизвестна, представляется значением (-1). То есть, например, элементы столбца C — $c_1..c_l$ — будут принимать также значения: 0 — если злоумышленник знает, что пользователь не имеет доступа к документу; 1 — если злоумышленник знает, что пользователь имеет доступ к чтению; 2 — если злоумышленник знает, что пользователь имеет доступ к редактированию и удалению документа, и (-1) — если злоумышленник не знает, какие права доступа у пользователя по отношению к документу.

Далее рассмотрим ПКЗ, P . Он может быть охарактеризован известными злоумышленнику социоинженерными атакующими воздействиями и навыками их осуществления. Опираясь на опыт исследований аппаратных и программно-технических аспектов информационной безопасности и адаптируя его к области социоинженерных атак, можно ожидать, что для построения и регулярного последующего пополнения списков атакующих воздействий, ресурсов и прочих параметров, входящих в ПКЗ, а также подходов к их оценке потребуются отдельное и непрерывно длящееся междисциплинарное исследование при участии специалистов по психологии, социологии, информатике и математике. Чем полнее будут данные списки, тем более точные оценки можно получить. В предположении, что некая версия списков доступна, например, как в работе [21], продолжим дальнейшее развитие концепции.

Так, ПКЗ может быть представлен в виде $P = \langle (K_1, D(K_1)), \dots, (K_q, D(K_q)) \rangle$, где K_i — социоинженерное атакующее воздействие, а $D(K_i)$ — степень владения злоумышленником данным атакующим воздействием. Это один из факто-

ров, влияющих на оценку успешности атаки, выражающий некоторое умение злоумышленника. Заметим, что оценка этого фактора может быть получена путем обратного моделирования от критичного документа к злоумышленнику. Например, пусть злоумышленник получил доступ к критичному документу; необходимо оценить наиболее вероятную или минимальную конфигурацию компетенций, которыми он должен обладать. Возможны иные подходы, например, оценка по серии специально организованных экспериментов или оценка по методике, составленной экспертами, или оценка, построенная с помощью статистического анализа социоинженерных атакующих воздействий, ставших известными.

Каждой модели злоумышленника сопоставлен свой ПКЗ, т. е. свой набор степеней владения различными типами атакующих воздействий. Таким образом, для каждого злоумышленника j ПКЗ будет состоять из социоинженерных атак и степеней владения ими: $P_j = \langle (R_1, D_j(K_1)), \dots, (R_q, D_j(K_q)) \rangle$. Формализовав таким образом ПКЗ, можно в простейшем случае, без учета ПУП, перейти к огрубленным оценкам вероятности успеха социоинженерных атакующих воздействий злоумышленника p_{ij} , которые представляются следующим образом: $p_{ij} = f(D_j(K_i), T_i)$, где $D_j(K_i)$ — степень владения атакующим воздействием K_i у злоумышленника j ; T_i — максимально возможная степень владения атакующим воздействием, а p_{ij} — вероятность успеха социоинженерного атакующего воздействия j -го злоумышленника с использованием i -й атаки. Конечная структура функции f не выработана, однако одним из вариантов может быть следующий ее вид:

$$p_{ij} = f(D_j(K_i), T) = \frac{D_j(K_i)}{T_i}.$$

Таким образом, происходит переход от степени владения атакующим воздействием, применяемым злоумышленником, к вероятности успеха социоинженерного атакующего воздействия на пользователя, и ПКЗ приобретает вид p_{1j}, \dots, p_{qj} .

Отметим, что в статье рассматриваются простейшие социоинженерные атаки злоумышленника на пользователя, например, предложение зарегистрироваться на каком-то ресурсе или отправка письма с «полезным для пользователя приложением». Кроме того, будем считать, что злоумышленники действуют индивидуально, не используют ресурсы, знания и навыки друг друга и не пользуются результатами деятельности друг друга. Не менее интересным представляется исследование данной темы для модели, в которой задействованы группы злоумышленников, действующих в сговоре, но в текущей статье ограничимся комплексом, включающим только одного злоумышленника.

Стоит отметить, что модели пользователя информационной системы сопоставлен ПУП, в который входят степени выраженности уязвимостей пользователя, на их основании строятся вероятностные оценки успешности того или иного социоинженерного атакующего воздействия злоумышленника. Под выраженностью уязвимости пользователя понимается степень его подверженности социоинженерным атакующим воздействиям, которая зависит от его личностных психологических характеристик, уровня компетенций и иных факторов. Предполагается, что рассмотрение ПКЗ позволит сделать более точными вероятностные оценки защищенности пользователей информационных систем от социоинженерных атак.

Таким образом, при имитации социоинженерных атакующих воздействий, исходящих от злоумышленников, обладающих разными компетенциями, могут быть получены различные вероятностные оценки успеха социоинженерных атакующих воздействий. Успех социоинженерного атакующего воздействия j -го злоумышленника будет определяться степенью владения им различными социоинженерными атакующими воздействиями и выраженностью уязвимостей атакуемого пользователя информационной системы. Функция расчета вероятности успеха социоинженерного атакующего воздействия при заданных ПКЗ и ПУП в простейшем варианте может быть представлена в виде зависимости от ряда параметров:

$$p_{ij}^{lq} = g(D_j(K_i), T_i, S_q(V_l, K_i), B_l),$$

где $D_j(K_i)$ — степень владения социоинженерным атакующим воздействием K_i у злоумышленника j ; $S_q(V_l, K_i)$ — выраженность уязвимости V_l , на которую можно воздействовать с помощью атаки K_i , у пользователя q ; T_i — максимально возмож-

ная степень владения атакующим воздействием K_i ; B_l — максимальная выраженность уязвимости V_l ; p_{ij}^{lq} — вероятность успеха социоинженерного атакующего воздействия j -го злоумышленника с использованием его i -го ресурса на l -ю уязвимость k -го пользователя. Одним из возможных примеров данной функции будет являться

$$p_{ij}^{lq} = g(D_j(K_i), T_i, S_q(V_l, K_i), B_l) = \frac{D_j(K_i)S_q(V_l, K_i)}{T_i B_l}.$$

Важно отметить, что одно и то же атакующее воздействие можно использовать для оказания влияния на разные уязвимости пользователя. Так, например, финансовые ресурсы можно использовать как для подкупа пользователей информационной системы, так и для формирования внешнего образа, способствующего установлению соответствующих связей с жертвой. В простейшем случае рассматривается только влияние одного ресурса злоумышленника на одну уязвимость пользователя.

Введем еще одну функцию, которая будет включать в себе оценку вероятности успешности атаки при использовании злоумышленником определенного атакующего воздействия на определенную уязвимость пользователя. Рассмотрим табличное задание данной функции на примере. В работе [17] было выявлено пять элементарных уязвимостей пользователя: техническая неосмотрительность, слабый пароль, техническая халатность и установка на получение личной выгоды, техническая неопытность, техническая безграмотность. Атакующее воздействие, заключающееся, например, в предложении зарегистрироваться на каком-то привлекательном сайте, вероятнее всего, будет иметь отклик у пользователей с сильно выраженными уязвимостями: технической неосмотрительностью, технической халатностью и установкой на получение личной

■ Атакующие воздействия злоумышленника и уязвимости пользователя

Уязвимости пользователя	Атакующие воздействия						
	Предложение зарегистрироваться на каком-то привлекательном сайте	Отправка письма с «польным» для пользователя приложением	Виртуальное знакомство с пользователем в сети	Взлом	Подсматривание	Подкуп	Предложение помощи в решении компьютерных дел
Техническая неосмотрительность	1	0,9	0,8	0	0	0	0
Слабый пароль	0	0	0	1	0,9	0	0
Техническая халатность и установка на получение личной выгоды	0,9	0	0	0	0	1	0
Техническая неопытность	1	0,9	0,8	0	0	0	0
Техническая безграмотность	1	0,9	0	0	0	0	0,9

выгоды, технической неопытностью, технической безграмотностью. В то же время данное атакующее воздействие вряд ли приведет к успеху с пользователем, у которого вышеперечисленные уязвимости мало выражены, но имеет место использование слабого пароля.

Формализуя описанное выше, введем функцию следующего вида: $\varphi_{il}(K_i, V_l)$, где K_i — это тип атакующего воздействия, а V_l — уязвимость. Значения функции будут лежать на отрезке $[0;1]$, причем 0 означает, что злоумышленник с использованием данного атакующего воздействия не сможет повлиять на уязвимость, 1 — злоумышленник добьется успеха, используя данную компетенцию для воздействия на уязвимость.

Значения для данной функции с учетом выявленных в работе [21] атакующих воздействий злоумышленника и элементарных уязвимостей пользователя могут быть представлены следующим образом (таблица).

Таким образом, итоговая формула примет следующий вид:

$$p_{ij}^{lq} = g(D_j(K_i), T_i, S_q(V_l, K_i), B_l) \varphi_{i,l}(K_i, V_l),$$

где функция $g(D_j(K_i), T_i, S_q(V_l, K_i), B_l)$ будет характеризовать факторы, связанные с выраженностью уязвимостей пользователя и компетенций злоумышленника, а $\varphi_{i,l}(K_i, V_l)$ — аспекты выбранной злоумышленником стратегии атаки, влияющей на ее успех.

Заключение

В статье приведен подход, позволяющий сделать оценку защищенности персонала информационных систем от социоинженерных атак,

агрегирующей более широкий круг факторов по сравнению с подходами, рассмотренными в работе [16]. Это достигается за счет учета особенностей злоумышленника, находящих отражение в профиле его компетенций. Как следствие комплекс «информационная система — персонал — критичные документы» дополнен моделью злоумышленника. Представлен комплекс «критичные документы — информационная система — персонал — злоумышленник». Приведены модели пользователя и злоумышленника. Предложен подход к формализации профиля компетенций злоумышленника и расчету вероятности успеха социоинженерного атакующего воздействия злоумышленника на пользователя с использованием определенного типа атаки и уязвимости. Оценка степени защищенности в конце концов нацелена на достижение возможности выявить наиболее уязвимые звенья системы и своевременно отреагировать на возникающие вызовы по обеспечению защиты информации.

Дальнейшая работа по развитию изложенного подхода связана с выводом точной формулы вероятности успеха атакующего воздействия злоумышленника, поиском новых уязвимостей пользователей и компетенций злоумышленника, а также оценкой зависимости уязвимостей и компетенций. Кроме того, важной задачей представляется разработка, реализация и поддержание в актуальном состоянии базы данных атакующих воздействий, ресурсов и прочих параметров, входящих в профиль компетенций злоумышленника, а также базы данных уязвимостей пользователя.

Статья содержит материалы исследований, частично поддержанных грантами РФФИ 14-07-00694-а, 14-01-00580-а, 15-01-09001-а.

Литература

1. Убытки от киберпреступлений продолжают расти. <http://www.hp.com/ru/ru/software-solutions/ronemon-cyber-security-report/index.html> (дата обращения: 04.03.2015).
2. Distefano S., Puliafito A. Information Dependability in Distributed Systems: The Dependable Distributed Storage System // Integrated Computer-Aided Engineering. 2014. N 21. P. 3–18.
3. Goo J., Yim M. S., Kim D. J. A Path to Successful Management of Employee Security Compliance: An Empirical Study of Information Security Climate // Professional Communication, IEEE Transactions on. 2014. Vol. 57. N 4. P. 286–308.
4. James C. Information Systems User Security: A Structured Model of the Knowing–Doing Gap // Computers in Human Behavior. 2012. Vol. 28. Iss. 5. P. 1849–1858.
5. Trčecek D., Trobec R., Pavešić N., Tasić J.F. Information Systems Security and Human Behaviour // Behaviour & Information Technology. 2007. Vol. 26. Iss. 2. P. 113–118.
6. Котенко И. В., Степашкин М. В. Анализ защищенности компьютерных сетей на основе моделирования действий злоумышленников и построения графа атак // Тр. ИСА РАН. 2007. Т. 31. С. 126–207.
7. Котенко И. В., Степашкин М. В. Системы-имитаторы: назначение, функции, архитектура и подход к реализации // Изв. вузов. Приборостроение. 2006. Т. 49. № 3. С. 3–8.
8. Котенко И. В., Юсупов Р. М. Перспективные направления исследований в области компьютерной безопасности // Защита информации. Инсайд. 2006. № 2. С. 46.
9. Дорохов В. Э. О рисках потери репутации организации вследствие инцидентов информационной безо-

пасности // Безопасность информационных технологий. 2014. № 2. С. 80–82.

10. Сапронов К. Человеческий фактор и его роль в обеспечении информационной безопасности. <http://www.interface.ru/home.asp?artId=17137> (дата обращения: 05.03.2015).
11. Информационная безопасность бизнеса. Исследования текущих тенденций в области информационной безопасности бизнеса // Лаборатория Касперского. http://media.kaspersky.com/pdf/IT_risk_report_Russia_2014.pdf (дата обращения: 30.04.2015).
12. Сергиевский М. Сети — что это такое // КомпьютерПресс. 1999. № 10. С. 3–9.
13. Суворова А. В. и др. Анализ гранулярных данных и знаний в задачах исследования социально значимых видов поведения / А. В. Суворова, А. Л. Тулупьев, А. Е. Пащенко, Т. В. Тулупьева, Т. В. Красносельских // Компьютерные инструменты в образовании. 2010. № 4. С. 30–38.
14. Веденеев В. С., Бычков И. В. Средства поиска инсайдеров в корпоративных ИС // Безопасность информационных технологий. 2014. № 1. С. 9–13.
15. Бычек В., Ершова Е. Социальная инженерия в интеллектуальной битве «добра» и «зла» // Защита информации. Инсайд. 2006. № 6. <http://www.aladdin-rd.ru/company/pressroom/articles/11475/> (дата обращения: 28.06.2016).
16. Азаров А. А. Вероятностно-реляционные модели и алгоритмы обработки профиля уязвимостей поль-

зователей при анализе защищенности персонала информационных систем от социоинженерных атак: дис. ... канд. техн. наук. — СПб.: СПИИРАН, 2013. — 232 с.

17. Тулупьев А. Л., Азаров А. А., Пащенко А. Е. Информационная модель пользователя, находящегося под угрозой социоинженерной атаки // Тр. СПИИРАН. 2010. Вып. 2 (13). С. 143–155.
18. Тулупьева Т. В., Тулупьев А. Л., Азаров А. А., Пащенко А. Е. Психологическая защита как фактор уязвимости пользователя в контексте социоинженерных атак // Тр. СПИИРАН. 2011. Вып. 18. С. 74–92.
19. Cialdini R. B. Influence: Science and practice. 5th ed. — Boston: Allyn & Bacon, 2009.
20. Ванюшичева О. Ю. и др. Количественные измерения поведенческих проявлений уязвимостей пользователей, ассоциированных с социоинженерными атаками / О. Ю. Ванюшичева, Т. В. Тулупьева, А. Е. Пащенко, А. Л. Тулупьев, А. А. Азаров // Тр. СПИИРАН. 2011. Вып. 19. С. 34–47.
21. Тулупьев А. Л., Тулупьева Т. В., Азаров А. А., Григорьева О. Ю. Психологические особенности персонала, предрасполагающие к успешной реализации социоинженерных атак // Науч. тр. Северо-Западного института управления РАНХиГС. 2012. Т. 3. Вып. 3 (7). С. 256–266.

UDC 614.8+002.6:004.89

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.77

Model of Malefactor Competencies Profile for Analyzing Information System Personnel Security from Social Engineering Attacks

Abramov M. V.^{a,b,c}, Post-Graduate Student, mva16@list.ru

Azarov A. A.^a, PhD, Tech., artur-azarov@yandex.ru

Tulupyeva T. V.^{a,b,d}, PhD, Psych., Associate Professor, tv100a@mail.ru

Tulupyevev A. L.^{a,b}, Dr. Sc., Phys.-Math., Associate Professor, alexander.tulupyevev@gmail.com

^aSaint-Petersburg State University, 7–9, Universitetskaya Nab., 199034, Saint-Petersburg, Russian Federation

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

^cMoscow Pedagogical State University, 1/1, M. Pirogovskaya St., 119991, Moscow, Russian Federation

^dNorthwest Institute of Management of the Russian Academy of National Economy and Public Administration under the President of the Russian Federation, 57/43, Srednii Pr. V. O., 199178, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: The increased complexity of computer networks and security mechanisms, the growing number of users' vulnerabilities and various ways to organize attacks cause the need to develop powerful automated tools and systems for vulnerability analysis. The technical (software and hardware) problems are mostly solved; there are many software systems for security analysis. However, these systems usually do not include or include only partially the users' behavior analysis, while an essential part of information security violations are caused now by social engineering attacks. The general purpose of the current research is to estimate the rate of information system personnel protection from social engineering attacks. **Purpose:** A formal model of a malefactor should be developed, including a model of malefactor's competencies profile. It will be a basis for multifactorial estimates of the probability of a success of malefactor's attack on the user. **Results:** A formal model of a malefactor was developed in this article. It consists of the profile of malefactor's competencies in paired format (a competence and its intensity), resources available for the malefactor, his/her basic knowledge about the system architecture, the set of users vulnerable for the attack, and malefactor's goals. On the basis of this model, a method of multi-factor assessment of malefactor's attack success probability was proposed. **Practical relevance:** The developed model allows you to evaluate how well information systems are protected from social engineering attacks, to identify the most vulnerable parts of the system and to promptly take necessary measures to ensure information security.

Keywords — Social Engineering Attacks, User Protection, Information Security, Malefactor Competencies Profile.

References

1. *Ubytki ot kiberprestuplenii prodolzhaiut rasti* [Losses from Cybercrimes Continue to Grow]. Available at: <http://www.hp.com/ru/ru/software-solutions/ponemon-cyber-security-report/index.html> (accessed 4 March 2015).
2. Distefano S., Puliafito A. Information Dependability in Distributed Systems: The Dependable Distributed Storage System. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 2014, no. 21, pp. 3–18.
3. Goo J., Yim M. S., Kim D. J. A Path to Successful Management of Employee Security Compliance: An Empirical Study of Information Security Climate. *Professional Communication, IEEE Transactions on*, 2014, vol. 57, no. 4, pp. 286–308.
4. James C. Information Systems User Security: A Structured Model of the Knowing–Doing Gap. *Computers in Human Behavior*, 2012, vol. 28, iss. 5, pp. 1849–1858.
5. Trček D., Trobec R., Pavešić N., Tasič J.F. Information Systems Security and Human Behaviour. *Behaviour & Information Technology*, 2007, vol. 26, iss. 2, pp. 113–118.
6. Kotenko I. V., Stepashkin M. V. Security Analysis of Computer Networks Based on Modeling by Malefactors Actions and Constructing Attack Graph. *Trudy ISA RAN*, 2007, vol. 31, pp. 126–207 (In Russian).
7. Kotenko I. V., Stepashkin M. V. Systems Imitators: the Appointment, Functions, Architecture and Implementation Approach. *Izvestiia vuzov. Priborostroenie*, 2006, vol. 49, no. 3, pp. 3–8 (In Russian).
8. Kotenko I. V., Iusupov R. M. Perspective Directions in the Field of Computer Security Research. *Zashchita informatsii. In said*, 2006, no. 2, p. 46 (In Russian).
9. Dorokhov V. E. Reputation Risks Through Information Security Incidents. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii*, 2014, no. 2, pp. 80–82 (In Russian).
10. *Chelovecheskii faktor i ego rol' v obespechenii informatsionnoi bezopasnosti* [The Human Factor and its Role in Ensuring Information Security]. Available at: <http://www.interface.ru/home.asp?artId=17137> (accessed 05 March 2015).
11. *Informatsionnaia bezopasnost' biznesa. Issledovaniia tekushchikh tendentsii v oblasti informatsionnoi bezopasnosti biznesa* [Business Information Security. Studies of Current Trends in Business Information Security]. Available at: http://media.kaspersky.com/pdf/IT_risk_report_Russia_2014.pdf (accessed 30 April 2015).
12. Sergievskii M. Networks — what is it. *Komp'iuterPress*, 1999, no. 10, pp. 3–9 (In Russian).
13. Suvorova A. V., Tulup'ev A. L., Pashchenko A. E., Tulup'eva T. V., Krasnosel'skikh T. V. Analysis of Granular Data and Knowledge in Research Problems Socially Significant Behaviors. *Komp'iuternye instrumenty v obrazovanii*, 2010, no. 4, pp. 30–38 (In Russian).
14. Vedenev V. S., Bychkov I. V. Tool for Insider Threat Detection in Corporate Information Systems. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii*, 2014, no. 1, pp. 9–13 (In Russian).
15. Bychek V., Ershova E. Social Engineering in the Intellectual Battle of “good” and “evil”. *Zashchita informatsii. In said*, 2006, no. 6. Available at: <http://www.aladdin-rd.ru/company/pressroom/articles/11475/> (accessed 28 June 2016).
16. Azarov A. A. *Veroiatnostno-reliatsionnye modeli i algoritmy obrabotki profilia uiazvymostei pol'zovatelei pri analize zashchishchennosti personala informatsionnykh sistem ot sotsioinzhenernykh atak*. Dis. kand. tehn. nauk [Probabilistic Relational Models and Algorithms for Processing User Profiles Vulnerabilities in the Analysis of Security of Information Systems Personnel from Socio-Engineering Attacks. PhD tech. sci. diss.]. Saint-Petersburg, SPIIRAN Publ., 2013. 232 p.
17. Tulup'ev A. L., Pashchenko A. E., Azarov A. A. Information Model of the Use, who may be under the threat of Socio-engineering Attack. *Trudy SPIIRAN*, 2010, iss. 2(13), pp. 143–155 (In Russian).
18. Tulup'eva T. V., Tulup'ev A. L., Azarov A. A., Pashchenko A. E. Psychological Defence as a Factor of User's Vulnerability in a Socio-Engineering Attacks Context. *Trudy SPIIRAN*, 2011, iss. 3(18), pp. 74–92 (In Russian).
19. Cialdini R. B. *Influence: Science and practice*. 5th ed. Boston, Allyn & Bacon, 2009.
20. Vaniushicheva O. Iu., Tulup'eva T. V., Pashchenko A. E., Tulup'ev A. L., Azarov A. A. Quantitative Measurements of Behavioral Displays of User's Vulnerabilities Associated with Socio-Engineering Attacks. *Trudy SPIIRAN*, 2011, iss. 4(19), pp. 34–47 (In Russian).
21. Tulup'ev A. L., Tulup'eva T. V., Azarov A. A., Grigor'eva O. Iu. Psychological Features of Personnel, Predisposes to the Successful Implementation of Socio-Engineering Attacks. *Nauchnye trudy Severo-Zapadnogo instituta upravleniia RANKhiGS*, 2012, vol. 3, iss. 3(7), pp. 256–266 (In Russian).

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

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

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

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

ДИАГРАММЫ РАССЕЯНИЯ В АНАЛИЗЕ СЛУЧАЙНЫХ ПОТОКОВ СОБЫТИЙ

В. И. Хименко^а, доктор техн. наук, профессор
^аОАО «НИО ЦИТ «Петрокомета», Санкт-Петербург, РФ

Цель: вероятностный анализ случайных потоков событий на основе двумерных диаграмм рассеяния и исследование общей структуры диаграмм для нескольких наиболее распространенных моделей случайных потоков. **Результаты:** показаны особенности построения диаграмм рассеяния, которые заключаются в отображении двумерной информации в задачах вероятностного анализа случайных потоков событий. Введены простые числовые характеристики, отражающие информационную структуру случайных данных на фазовой плоскости. Выполнен вероятностный анализ диаграмм рассеяния для класса простых пуассоновских потоков, случайных потоков с неоднородной вероятностной структурой, потоков с двойной стохастичностью и класса случайных альтернирующих потоков событий. **Практическая значимость:** потенциальная полезность полученных результатов и практического использования диаграмм рассеяния состоит в наглядности и высокой информативности представления двумерной информации на фазовой плоскости. Диаграммы рассеяния позволяют накапливать, усреднять и систематизировать выборочные данные, оперативно оценивать однородность потоков событий, рассматривать эффекты коррелированности, группировки, эффекты случайных «загрязнений» и эффекты случайного пропуска данных.

Ключевые слова — обработка информации, случайные процессы, потоки событий, точечные процессы, диаграммы рассеяния, вероятностный анализ, неоднородные данные.

Введение

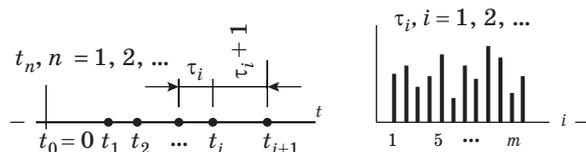
Наиболее часто модели случайных потоков используются при описании различных последовательностей однородных событий. Необходимость исследования таких потоков возникает во многих задачах физики, биологии, техники, теории надежности и теории рисков, теории транспортных потоков, разнообразных задачах логистики и задачах теории массового обслуживания. Типовыми примерами случайных потоков событий могут быть последовательности телефонных вызовов, потоки заявок при многостанционном доступе в спутниковых системах связи, моменты отказов вычислительных систем, потоки импульсов в нейронных сетях, случайные потоки электронов, фотонов или каких-либо элементарных частиц при ядерно-физических экспериментах. Это могут быть и потоки переходов какой-либо сложной системы из одного состояния в другое.

Если рассматривается некоторая последовательность однородных событий, каждое из которых может происходить в случайный момент времени t_i , то поток таких событий условно можно представить (рис. 1) на оси времени $0t$ в виде последовательности точек $\{t_n\}$ — случайного точечного процесса. Каждая точка $t_i, i = 1, 2, \dots$ соответствует при этом моменту появления i -го события, а значения $\tau_i = t_i - t_{i-1}$ — длительностям интервалов между последовательными событиями.

Учитывая, что случайный поток состоит из однородных событий, анализ точечных процессов $\{t_n, n = 1, 2, \dots\}$ во многих практических за-

дачах основан на исследованиях вероятностных характеристик временных интервалов $\{\tau_i\}$. При таком исследовании важное значение имеет не только описание длительностей τ_i , но и рассмотрение совместных свойств случайных величин τ_i и τ_j при $j \neq i$. Одним из возможных (и наиболее простых) подходов к выявлению особенностей совместного поведения длительностей τ_i и τ_j является анализ диаграмм рассеяния для τ_i, τ_j на фазовой плоскости (τ_i, τ_j) . Подобные представления используются в анализе вероятностной структуры временных рядов, например, при корреляционном, регрессионном и факторном анализе [1–4], в задачах распознавания образов [5], задачах обработки данных радиофизических экспериментов [6] и данных аэрокосмического мониторинга [7], задачах анализа информации в эконометрике [8], кардиологии [9] и нейрофизиологии [10].

Характерными свойствами диаграмм рассеяния, с одной стороны, являются простота и наглядность отображения двумерной информации, возможность накопления и усреднения выборочных данных при возрастании общей длительности



■ **Рис. 1.** Отдельная реализация точечного процесса $t_n, n = 1, 2, \dots$ и случайная последовательность интервалов τ_i между отдельными событиями

сти наблюдений. С другой стороны, исследования самих диаграмм рассеяния [1–10], как правило, носят лишь описательный характер, выполняются на уровне визуального анализа и не используют значительную часть информации, содержащейся в вероятностной структуре получаемых данных.

Цель данной работы — анализ особенностей представления случайных величин τ_i и τ_j на фазовой плоскости (τ_i, τ_j) и вероятностное исследование диаграмм рассеяния для нескольких практически важных моделей случайных потоков событий $\{t_n\}$.

Диаграммы рассеяния для процессов Пуассона

Общая структура и основные свойства процессов Пуассона достаточно хорошо изучены; такие процессы рассматриваются во многих работах (например, [1, 11, 12]) и используются в качестве базовой модели при построении большинства других, более сложных моделей случайных потоков событий [13, 14]. Именно поэтому с модели пуассоновского процесса полезно начать вероятностный анализ диаграмм рассеяния.

Предположим, что $\{t_n, n=1, 2, \dots\}$ — простой пуассоновский поток событий, и рассмотрим случайную последовательность $\{\tau_i, i=1, 2, \dots\}$ временных интервалов $\tau_i = t_i - t_{i-1}$ между соседними событиями. Характерной особенностью данной модели является то, что величины $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n$ относятся здесь к классу независимых одинаково распределенных случайных величин. Они описываются экспоненциальным распределением [11–14], и если через λ обозначить интенсивность потока (т. е. среднее число событий в единицу времени), то плотность вероятностей $p_\tau(\tau)$ и функция распределения $F_\tau(\tau)$ для τ_i будут иметь вид

$$p_\tau(\tau) = \lambda \exp(-\lambda\tau), \quad F_\tau(\tau) = 1 - \exp(-\lambda\tau), \quad \tau \geq 0. \quad (1)$$

Условие взаимной независимости интервалов τ_i и τ_j при $i \neq j$ позволяет по выражениям (1) определить совместную плотность вероятностей

$$p_2(\tau_i, \tau_j) = p_\tau(\tau_i)p_\tau(\tau_j) = \lambda^2 \exp[-\lambda(\tau_i + \tau_j)], \quad \tau_{i,j} \geq 0. \quad (2)$$

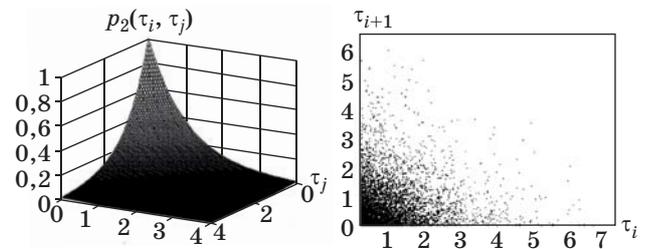
Формально функция (2) содержит всю информацию о совместном поведении временных интервалов τ_i и τ_j , и является основой для исследования двумерных вероятностных характеристик случайных последовательностей $\{\tau_j\}$. Однако в задачах статистического анализа построение по экспериментальным данным двумерных распределений требует больших объемов выборки и существенных вычислительных затрат. Кроме того, подобная информация в функции (2) содер-

жится в неявном виде, и для ее выделения нужны дополнительные операции.

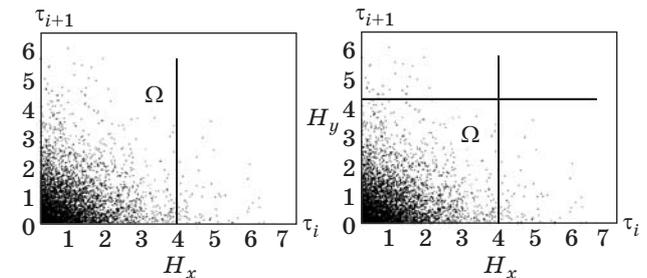
Рассмотрим здесь более простой способ отображения информации о совместном поведении длительностей τ_i и τ_j . Выберем для определенности значение $j=i+1$ и будем интерпретировать случайные величины τ_i и τ_{i+1} как координаты точки на плоскости (τ_i, τ_{i+1}) . Тогда поведение последовательности $\{\tau_i, i=1, 2, \dots\}$ можно представить геометрически в виде некоторой диаграммы рассеяния. В качестве простой иллюстрации на рис. 2 приведена типовая диаграмма для длительностей интервалов τ_i и $\tau_j = \tau_{i+1}$ пуассоновского потока событий. Ее общий вид непосредственно связан с особенностями поведения совместной плотности вероятностей $p_2(\tau_i, \tau_j)$.

Действительно, характер функции (2) подтверждает (см. рис. 2), что для рассматриваемой модели процесса $\{t_n, n=1, 2, \dots\}$ диаграмма рассеяния должна обладать относительно высокой концентрацией (или «плотностью») точек в окрестностях малых значений τ и не должна иметь каких-либо явно выраженных областей группировки событий на плоскости (τ_i, τ_{i+1}) при возрастании длительностей τ . С увеличением значений τ плотность точек (или плотность событий потока) уменьшается по экспоненциальному закону.

Для определения вероятностных характеристик диаграмм рассеяния зададим на фазовой плоскости (τ_i, τ_j) некоторую область «допустимых» значений Ω . Границы этой области (рис. 3)



■ Рис. 2. Характер представления двумерной информации в виде совместной плотности вероятностей и в виде диаграммы рассеяния



■ Рис. 3. Типовая структура диаграммы рассеяния для пуассоновского потока событий и заданные области Ω допустимых значений

определим из условия $\tau_i \in (0, H_x)$, где H_x может рассматриваться как некоторый пороговый уровень в диапазоне изменений длительностей τ_i .

Предположим, что исследуется случайный поток событий $\{t_n, n=1, 2, \dots\}$ и наблюдению доступно m временных интервалов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$. При отображении этих наблюдений на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) диаграмма рассеяния будет содержать $(m-1)$ точек, каждая из которых характеризуется координатами τ_i, τ_j , где $j=i+1$, а $i=1, 2, \dots, m-1$. Некоторое число этих точек $n(\Omega, m)$ может находиться в заданной области Ω допустимых значений $\tau_i \in (0, H_x)$, а часть точек, обозначим их число через $n^+(\Omega, m)$, — за границами выбранной области Ω . Если какая-либо произвольная точка ξ_i описывается координатами τ_i, τ_{i+1} и при этом выполняется условие $\tau_i < H_x$, то данная точка находится в области допустимых значений Ω . Вероятность такого события $P\{\xi \in \Omega\}$ можно выразить через функции (1) как

$$P\{\xi \in \Omega\} = P\{\tau_i \leq H_x\} = \int_0^{H_x} p_\tau(\tau) d\tau = F_\tau(H_x), \quad H_x \geq 0. \quad (3)$$

С другой стороны, если значение $\tau_i > H_x$, то рассматриваемая точка ξ_i выходит за границу заданной области Ω , и вероятность этого события

$$P\{\xi \notin \Omega\} = P\{\tau_i > H_x\} = \int_{H_x}^{\infty} p_\tau(\tau) d\tau = 1 - F_\tau(H_x). \quad (4)$$

Таким образом, если наблюдению доступно m случайных величин $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$, то при анализе диаграмм рассеяния, с учетом вероятностей (3) и (4), можно определить математическое ожидание (среднее значение) числа точек $N(\Omega, m) = M\{n(\Omega, m)\}$, попадающих на фазовой плоскости в область Ω , и среднее число точек $N^+(\Omega, m) = M\{n^+(\Omega, m)\}$, выходящих за границы области допустимых значений Ω :

$$\begin{aligned} N(\Omega, m) &= (m-1)P\{\xi \in \Omega\}; \\ N^+(\Omega, m) &= (m-1) - N(\Omega, m) = \\ &= (m-1)[1 - P\{\xi \in \Omega\}]. \end{aligned} \quad (5)$$

Более полное вероятностное описание случайных величин $n(\Omega, m)$ и $n^+(\Omega, m)$ в подобных задачах может быть выполнено на основе классической для теории вероятностей схемы Бернулли [14–16]. Так, будем считать, что результаты наблюдений $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ относятся к классу независимых случайных величин и отображаются на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) в виде совокупности случайно расположенных точек $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{m-1}$. Каждая точка ξ_i с вероятностью $p = P\{\xi \in \Omega\} = F_\tau(H_x)$ попадает в область допусти-

мых значений Ω и с вероятностью $p^+ = 1 - p = 1 - F_\tau(H_x)$ выходит за пределы заданной области Ω . Тогда, по аналогии с результатами работы [15], вероятность выхода за пределы области ровно k точек из рассматриваемой совокупности $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_{m-1}$ определится выражением

$$\begin{aligned} p_k(n^+) &= P\{n^+(\Omega, m) = k\} = \\ &= C_{m-1}^k (p^+)^k (1 - p^+)^{m-1-k}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $k=0, 1, 2, \dots, m-1$, а $C_{m-1}^k = (m-1)!/k!(m-1-k)!$ — число сочетаний из $(m-1)$ элементов по k .

По своему виду результат (6) соответствует одному из наиболее распространенных в теории вероятностей [14, 16] биномиальному закону распределения. Форма и параметры этого закона в данном случае зависят лишь от общего числа наблюдений m и вероятности p^+ . В частности, для математического ожидания и дисперсии числа точек, выходящих на фазовой плоскости за границы заданной области Ω , на основе распределения (6) получим

$$\begin{aligned} N^+(\Omega, m) &= M\{n^+(\Omega, m)\} = (m-1)(p^+) = \\ &= (m-1)[1 - F_\tau(H_x)]; \\ D[n^+(\Omega, m)] &= M\left\{\left[n^+(\Omega, m) - N^+(\Omega, m)\right]^2\right\} = \\ &= (m-1)(p^+)(1 - p^+). \end{aligned} \quad (7)$$

Эти формулы просты и удобны для численных расчетов. Полезно, кроме того, заметить, что среднее число точек $N^+(\Omega, m) = M\{n^+(\Omega, m)\}$, попадающих за пределы области Ω , как и следовало ожидать, совпадает с выражением (5) и с учетом функции распределения (1) может быть представлено в форме

$$N^+(\Omega, m) = (m-1)\exp(-\lambda H_x), \quad H_x \geq 0. \quad (8)$$

Если учесть здесь дисперсию σ_τ^2 экспоненциального распределения (1): $\sigma_\tau^2 = 1/\lambda^2$, и для удобства задания области Ω ввести нормированное значение порогового уровня $H_x / \sigma_\tau = \lambda H_x = h_x$, то формулу (8) можно переписать еще в более наглядном виде

$$N^+(\Omega, m) = (m-1)\exp(-h_x), \quad h_x = \lambda H_x \geq 0. \quad (9)$$

Это выражение показывает, что при фиксированном объеме выборки $m = \text{const}$ изменение порогового уровня h_x на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) приводит к экспоненциальному изменению среднего числа отображающих точек (или событий), выходящих за границы заданной области Ω .

Выделим теперь еще одну важную особенность вероятностного анализа. Очевидно, что в зависимости от решаемых задач область допустимых

значений Ω может иметь различную форму. Так, например, в качестве простого обобщения определим область Ω двумя условиями: $\tau_i \in (0, H_x)$, $\tau_{i+1} \in (0, H_y)$, где значения H_x и H_y рассматриваются как некоторые пороговые уровни в диапазоне изменений τ (см. рис. 3).

Вероятность $P\{\xi \in \Omega\}$ нахождения произвольной точки ξ с координатами τ_i, τ_j в заданной области Ω запишется при этом в виде

$$P\{\xi \in \Omega\} = P\{\tau_i < H_x, \tau_j < H_y\} = \int_0^{H_x} \int_0^{H_y} p_2(\tau_i, \tau_j) d\tau_i d\tau_j, \quad (10)$$

а при независимости интервалов τ_i и τ_j значение вероятности (10) будет определяться как

$$P\{\xi \in \Omega\} = P\{\tau_i < H_x\} P\{\tau_j < H_y\} = \int_0^{H_x} p_\tau(\tau_i) d\tau_i \int_0^{H_y} p_\tau(\tau_j) d\tau_j. \quad (11)$$

Таким образом, если наблюдению доступно m временных интервалов $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ между последовательными событиями точечного процесса $\{t_n, n=1, 2, \dots\}$, то с учетом вероятностей (10), (11) для диаграммы рассеяния на плоскости (τ_i, τ_j) при $j=i+1$ можно определить среднее число точек $N(\Omega, m)$, попадающих в область Ω , и среднее число точек $N^+(\Omega, m)$, выходящих за границы заданной области допустимых значений Ω :

$$N(\Omega, m) = (m-1)P\{\xi \in \Omega\};$$

$$N^+(\Omega, m) = (m-1)[1 - P\{\xi \in \Omega\}]. \quad (12)$$

Формально этот результат совпадает с выражением (5), однако значение вероятности $P\{\xi \in \Omega\}$ в формулах (12) определяется выражениями (10) или (11) с учетом иной области допустимых значений Ω .

Так, в частности, применительно к моделям пуассоновских процессов $\{t_n, n=1, 2, \dots\}$ на основе распределений (1) и (2) записанная в формулах (12) вероятность будет определяться значением

$$P\{\xi \in \Omega\} = \left(1 - e^{-\lambda H_x}\right) \left(1 - e^{-\lambda H_y}\right),$$

$$H_x, H_y \in (0, \infty). \quad (13)$$

Для удобства практических расчетов в этом выражении можно выполнить переход от пороговых уровней H_x и H_y к их нормированным значениям:

$$H_x/\sigma_\tau = \lambda H_x = h_x, \quad H_y/\sigma_\tau = \lambda H_y = h_y.$$

В целом полезно здесь подчеркнуть, что рассмотренные результаты (3)–(13) позволяют выполнять вероятностный анализ общей структуры

диаграмм рассеяния, определять вероятностные характеристики и исследовать количественные соотношения в расположении точек (событий) на фазовой плоскости (τ_i, τ_j) при различном задании границ H_x и H_y области допустимых значений Ω .

Случайные потоки с неоднородной структурой

В задачах обработки информации и задачах исследования случайных потоков событий достаточно часто возникают ситуации, когда интервалы τ_i между отдельными событиями $\{t_n, n=1, 2, \dots\}$ имеют неоднородную вероятностную структуру. Подобные неоднородности могут быть связаны с физической природой изучаемых процессов, могут появляться при анализе наблюдений со случайными пропусками данных, при анализе случайных потоков с «загрязнениями» или появлением аномальных значений.

Рассмотрим простую и распространенную для подобных задач вероятностную модель

$$p_\tau(\tau) = \alpha_1 p_1(\tau|\lambda_1) + \alpha_2 p_2(\tau|\lambda_2),$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1, \quad \alpha_{1,2} \in [0, 1], \quad (14)$$

в которой плотность вероятностей $p_\tau(\tau)$ для временных интервалов $\{\tau_j\}$ представляется в виде смеси двух различных распределений $p_1(\tau|\lambda_1)$ и $p_2(\tau|\lambda_2)$ с параметрами λ_1 и λ_2 . Весовые коэффициенты α_1 и α_2 играют в этой модели роль вероятностей, а их соотношение определяет степень неоднородности случайной последовательности $\{\tau_j\}$.

Для анализа совместного поведения случайных величин τ_i и τ_j рассмотрим применительно к модели (14) особенности поведения диаграмм рассеяния для длительностей интервалов τ_i и τ_j при $j=i+1, i=1, 2, \dots, m-1$ на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) .

Зададим на плоскости (τ_i, τ_{i+1}) в области изменения значений $\tau_i \in (0, \infty)$ некоторый пороговый уровень $H_x > 0$ и будем считать область $\Omega: \tau_i \in (0, H_x)$ областью допустимых значений. Произвольная точка $\xi_i = \xi_i(\tau_i, \tau_{i+1})$ с координатами (τ_i, τ_{i+1}) на фазовой плоскости может находиться в заданной области $\xi_i \in \Omega$ и может выходить за границу H_x этой области, т. е. $\xi_i \notin \Omega$. Вероятности этих событий в соответствии с формулами (3) и (4) определяются выражениями

$$P\{\xi \in \Omega\} = \int_0^{H_x} p_\tau(\tau) d\tau =$$

$$= \alpha_1 \int_0^{H_x} p_1(\tau|\lambda_1) d\tau + \alpha_2 \int_0^{H_x} p_2(\tau|\lambda_2) d\tau;$$

$$P\{\xi \notin \Omega\} = \alpha_1 \int_{H_x}^{\infty} p_1(\tau|\lambda_1) d\tau + \alpha_2 \int_{H_x}^{\infty} p_2(\tau|\lambda_2) d\tau. \quad (15)$$

Следовательно, если наблюдению доступно m случайных величин $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$, то на основе общих результатов (5) и вероятностей (15) можно определить для диаграммы рассеяния на плоскости (τ_i, τ_{i+1}) среднее число точек $N(\Omega, m)$, находящихся в области допустимых значений Ω , и среднее число точек $N^+(\Omega, m)$, выходящих за границу H_x заданной области Ω :

$$N(\Omega, m) = (m - 1) - N^+(\Omega, m);$$

$$N^+(\Omega, m) = \alpha_1 N_1^+(H_x, m) + \alpha_2 N_2^+(H_x, m), \quad (16)$$

где

$$N_k^+(H_x, m) = (m - 1) \int_{H_x}^{\infty} p_k(\tau | \lambda_k) d\tau, \quad k = 1, 2. \quad (17)$$

Такой результат показывает, что представление неоднородных данных $\{\tau_i\}$ моделью распределения $p_\tau(\tau)$ в виде вероятностной смеси (14) позволяет представить и характеристики расположения точек ξ_i на диаграмме рассеяния в виде взвешенной суммы слагаемых $N_k^+(H_x, m)$, соответствующих отдельным компонентам $k = 1, 2$ случайной последовательности $\{\tau_i\}$.

Рассмотрим теперь на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) два пороговых уровня H_x и H_y и определим область допустимых значений условием

$$\Omega: \tau_i \in (0, H_x), \tau_{i+1} \in (0, H_y). \quad (18)$$

Для упрощения анализа будем считать, что случайная последовательность $\{\tau_i\}$ является последовательностью независимых и одинаково распределенных случайных величин с общей плотностью вероятностей (14). Допущение о независимости случайных интервалов $\{\tau_i\}$ характерно для большинства моделей точечных процессов $\{t_n\}$. При этом без потери общности можно также в определении пороговых уровней (18) положить $H_x = H_y = H$.

Перечисленные условия позволяют воспользоваться формулой (11) и для диаграммы рассеяния процессов $\{t_n\}$ с неоднородной структурой (14) определить вероятность нахождения произвольной точки $\xi_i = \xi_i(\tau_i, \tau_{i+1})$ с координатами (τ_i, τ_{i+1}) в заданной области Ω :

$$\begin{aligned} P\{\xi \in \Omega\} &= P\{\tau_i < H, \tau_j < H\} = \left(\int_0^H p_\tau(\tau) d\tau \right)^2 = \\ &= \left(\alpha_1 \int_0^H p_1(\tau | \lambda_1) d\tau + \alpha_2 \int_0^H p_2(\tau | \lambda_2) d\tau \right)^2. \end{aligned} \quad (19)$$

В свою очередь, этот результат позволяет на основе общих выражений (12) непосредственно определить среднее число точек $N(\Omega, m)$ и $N^+(\Omega, m)$, находящихся в области Ω допустимых значений (18) и выходящих за границы $H_x = H_y = H$ заданной области Ω .

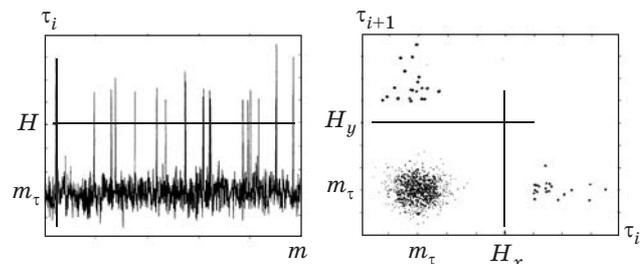
Рассмотренная вероятностная модель (14) наиболее часто используется при описании «загрязненных» наблюдений, анализе экспериментальных данных с «грубыми» ошибками или исследовании потоков событий $\{t_n\}$ с аномальными отклонениями параметров. Функции $p_1(\tau | \lambda_1)$ и $p_2(\tau | \lambda_2)$ или параметры интенсивности λ_1 и λ_2 в подобных ситуациях существенно различаются между собой.

Для наглядности на рис. 4 показан характерный вид отдельной реализации $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m$ неоднородной случайной последовательности $\{\tau_i\}$ и приведена построенная для этой реализации диаграмма рассеяния на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) . В качестве примера за основу здесь был выбран случайный точечный процесс $\{t_n\}$, порожденный регулярным потоком однородных событий со случайными возмущениями длительностей интервалов τ_i между событиями. По структуре эти возмущения представляют собой последовательность независимых случайных величин, описание которых в модели (14) выполняется на основе плотности вероятностей $p_1(\tau | \lambda_1)$. Вторая компонента $p_2(\tau | \lambda_2)$ в вероятностной модели (14) описывает эффекты резких отклонений длительностей τ_i от их средних значений и, по существу, отражает структуру случайных «загрязнений» последовательности $\{\tau_i\}$.

Неоднородность общей вероятностной структуры точечного процесса $\{t_n\}$ достаточно наглядно проявляется на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) . При весовых коэффициентах $\alpha_1 \gg \alpha_2$ на диаграмме рассеяния (см. рис. 4) отчетливо формируются область основных значений τ , определяемых функцией $p_1(\tau | \lambda_1)$, и области «загрязнений» — скопления редких, но выделяющихся по своей величине значений τ , описываемых плотностью вероятностей $p_2(\tau | \lambda_2)$.

При обработке и анализе подобных наблюдений за счет соответствующего выбора пороговых уровней H_x и H_y на фазовой плоскости (τ_i, τ_{i+1}) могут быть разделены основная и «загрязняющая» компоненты.

Рассмотренный здесь подход к анализу и полученные результаты (14)–(19) позволяют во многих



■ Рис. 4. Реализация случайной последовательности $\{\tau_i\}$ с неоднородной вероятностной структурой и ее отображение на фазовой плоскости

практических задачах выполнять совместное и раздельное исследование вероятностных свойств отдельных составляющих в неоднородной структуре случайных потоков событий.

Случайные потоки с двойной стохастичностью

Подавляющее большинство моделей случайных потоков событий $\{t_n\}$ строится в предположении постоянства вероятностных характеристик потока на интервале наблюдения. Это относится, в частности, и к моделям процессов с неоднородной структурой вида (14). Реальные ситуации нередко оказываются более сложными, исследуемые потоки меняют свои параметры случайным образом, и для их описания необходимы более универсальные вероятностные модели.

Рассмотрим особенности поведения диаграмм рассеяния в задачах исследования случайных потоков событий с двойной стохастичностью. Для этого предварительно отметим, что при фиксированных границах области допустимых значений Ω и постоянных на интервале наблюдения вероятностных характеристиках случайного потока событий $\{t_n\}$ для произвольной точки $\xi_i = \xi_i(\tau_i, \tau_{i+1})$ с координатами (τ_i, τ_{i+1}) на диаграмме рассеяния может быть определена вероятность $p = P\{\xi \in \Omega\}$ события $\xi \in \Omega$ и вероятность $p^+ = P\{\xi \notin \Omega\} = 1 - p$ того, что точка ξ_i выходит за границы заданной области Ω .

Условие постоянства вероятностных характеристик случайного потока $\{t_n\}$ позволяет в данной ситуации считать постоянными и значения вероятностей $p = \text{const}$ и $p^+ = 1 - p = \text{const}$. Эти особенности, в свою очередь, приводят к возможности использования модели биномиального распределения (6) для описания числа точек $n^+(\Omega, m)$, выходящих на фазовой плоскости (τ_i, τ_j) за пределы заданной области Ω .

Перейдем теперь к более сложной ситуации и рассмотрим вероятностную модель (6) при условии случайных изменений значения вероятности $p^+ = P\{\xi \notin \Omega\}$. Такие изменения могут происходить из-за меняющейся помеховой обстановки при обработке информационных процессов, за счет появления нестационарностей, эффектов случайной группировки событий в потоке, флуктуаций границ заданной области, случайных изменений интенсивности потоков и многих других причин.

Будем считать, что в распределении (6) вероятность p^+ является непрерывной случайной величиной и описывается некоторой плотностью вероятностей $w(p^+)$, $p^+ \in [0, 1]$. В этих условиях для описания числа точек $n^+(\Omega, m)$ необходимо выполнить вероятностное усреднение функ-

ции (6) по возможным значениям вероятности $p^+ \in [0, 1]$:

$$p_k(n^+) = P\{n^+(\Omega, m) = k\} = C_{m-1}^k \int_0^1 (p^+)^k (1-p^+)^{m-1-k} w(p^+) dp^+. \quad (20)$$

Выражение (20) по своей сути является обобщением биномиального распределения (6) и может рассматриваться как вероятностная модель случайного потока с двойной стохастичностью. Функция $w(p^+)$ играет при этом роль управляющего закона для случайных изменений вероятности p^+ . Модель (20) справедлива при различных распределениях $w(p^+)$ и независимо от конкретного вида функции $w(p^+)$ дает возможность найти два полезных общих соотношения для основных параметров:

$$N^+(\Omega, m) = M\{n^+(\Omega, m)\} = (m-1)M\{p^+\} = (m-1)\bar{p}^+;$$

$$D[n^+(\Omega, m)] = (m-1)\bar{p}^+(1-\bar{p}^+) + (m-1)(m-2)D[p^+]. \quad (21)$$

Эти соотношения показывают связь математического ожидания $N^+(\Omega, m)$ и дисперсии $D[n^+(\Omega, m)]$ случайной величины $n^+(\Omega, m)$ с соответствующими параметрами $\bar{p}^+ = M\{p^+\}$ и $D[p^+]$ управляющего закона распределения $w(p^+)$.

Результаты (20) и (21) для многих практических задач дают исчерпывающее описание вероятностных характеристик числа точек $n^+(\Omega, m)$, выходящих на фазовой плоскости за границы заданной области Ω . Сравнивая формулы (20), (21) и (6), (7), необходимо здесь заметить, что случайные изменения вероятности p^+ и переход к исследованиям случайных потоков с двойной стохастичностью (20) всегда приводят к возрастанию дисперсии $D[n^+(\Omega, m)]$ случайной величины $n^+(\Omega, m)$. Как и следовало ожидать, это возрастание непосредственно связано с дисперсией $D[p^+]$ управляющего закона распределения $w(p^+)$. Если случайные изменения параметра p^+ уменьшаются, то $D[p^+] \rightarrow 0$, и формулы (20), (21) переходят в соответствующие выражения (6), (7) для типовых задач с фиксированным значением вероятности $p^+ = 1 - p = \text{const}$.

Очевидно, что вероятностная модель (20) с двойной стохастичностью является более общей для исследования случайных потоков событий. Полученные при этом результаты (20), (21) позволяют выполнять анализ вероятностной структуры диаграмм рассеяния в условиях случайных изменений заданной области Ω и случайных изменений вероятностных характеристик рассматриваемых потоков событий.

**Структура
альтернирующих потоков событий**

Остановимся теперь кратко на рассмотрении вероятностной структуры диаграмм рассеяния для класса альтернирующих процессов. Характерной особенностью таких процессов является существование двух типов интервалов $\{\tau_i\}$ и $\{\tau_i^*\}$ между последовательными событиями. При этом сама структура случайного потока $\{t_n\}$ формируется таким образом, что временные интервалы τ_i и τ_i^* , $i = 1, 2, \dots$ следуют один за другим, поочередно заменяя друг друга и формируя двухкомпонентную случайную последовательность вида $\tau_1, \tau_1^*, \tau_2, \tau_2^*, \dots, \tau_n, \tau_n^*$.

На практике обычно предполагается, что все случайные величины τ_i и τ_i^* являются взаимно независимыми, и их вероятностные характеристики описываются некоторыми плотностями вероятностей $p(\tau)$ и $p(\tau^*)$. Такие особенности характерны для многих задач теории массового обслуживания, теории надежности и теории восстановления, задач логистики и задач теории запасов.

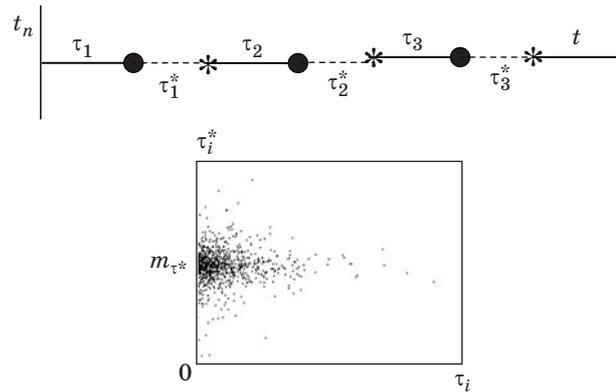
Для анализа вероятностной структуры альтернирующего потока событий $\{t_n\}$ предположим, что наблюдению доступна случайная последовательность

$$\tau_1, \tau_1^*, \tau_2, \tau_2^*, \dots, \tau_m, \tau_m^*, \quad (22)$$

состоящая из m пар временных интервалов τ_i и τ_i^* , $i = 1, 2, \dots$. Такая последовательность (22) может рассматриваться как отдельная реализация τ_i, τ_i^* , $i = 1, \dots, m$ двумерной векторной непрерывной случайной последовательности $\{\tau_i, \tau_i^*\}$ с независимыми компонентами $\{\tau_i\}$ и $\{\tau_i^*\}$. Если при этом значения τ_i и τ_i^* интерпретировать как координаты точки $\xi_i = \xi_i(\tau_i, \tau_i^*)$ на фазовой плоскости (τ_i, τ_i^*) , то реализация (22) может быть представлена на этой плоскости в виде некоторой диаграммы рассеяния. По своей структуре такая диаграмма отличается от рассмотренных ранее диаграмм (см. рис. 3 и 4). Она формируется на фазовой плоскости (τ_i, τ_i^*) из двух классов случайных величин $\{\tau_i\}$ и $\{\tau_i^*\}$ и, по существу, может рассматриваться как диаграмма рассеяния для двумерной векторной случайной последовательности $\{\tau_i, \tau_i^*; i = 1, 2, \dots\}$.

Характерный вид такой диаграммы показан на рис. 5. Для наглядности здесь приведен типовой пример, когда длительности интервалов $\{\tau_i\}$ описываются экспоненциальным распределением $p(\tau)$, а интервалы $\{\tau_i^*\}$ характеризуются гауссовой моделью $p(\tau^*)$.

Различия этих распределений наглядно проявляются в вероятностной структуре расположения точек $\xi_i = \xi_i(\tau_i, \tau_i^*)$. Так, в частности, концентрация отображающих точек на фазовой



■ **Рис. 5.** Особенности общей структуры альтернирующих потоков событий

плоскости (τ_i, τ_i^*) вдоль горизонтальной оси отражает экспоненциальный характер убывания их количества по мере возрастания длительности τ_i . Расположение и характер рассеяния точек ξ_i вдоль вертикальной оси $0\tau_i^*$ отражает особенности гауссова распределения $p(\tau^*)$ интервалов τ_i^* . Здесь наглядно проявляются эффекты группировки точек в окрестностях среднего значения $m_{\tau^*} = M\{\tau_i^*\}$ и эффекты характерного для гауссовой модели убывания количества отображающих точек $\xi_i = \xi_i(\tau_i, \tau_i^*)$ при возрастании отклонений $|\tau_i^* - m_{\tau^*}|$ переменной τ_i^* от значения $M\{\tau_i^*\}$.

Если применительно к подобным диаграммам рассеяния (см. рис. 5) воспользоваться результатами (3)–(9) и (11), (12), то появляется возможность исследовать вероятностную структуру альтернирующих потоков событий. Так, в частности, задавая различные пороговые уровни для значений $\{\tau_i\}$, можно исследовать вероятностные характеристики распределений $p(\tau)$. Если рассматривать длительности интервалов $\{\tau_i^*\}$, то при различных пороговых уровнях для τ_i^* можно исследовать вероятностные характеристики распределений $p(\tau^*)$.

Заключение

Результаты данной работы показывают возможность вероятностного анализа диаграмм рассеяния и особенности их использования в задачах исследования общей структуры случайных потоков событий. Диаграммы рассеяния обладают достаточно высокой информативностью и позволяют отображать, накапливать и систематизировать на фазовой плоскости двумерную информацию о совместном поведении случайных величин. На их основе удастся оценивать однородность выборки, рассматривать эффекты коррелированности, группировки, эффекты «загрязнения» и случайного пропуска данных, выполнять приближенную оценку простых вероятностных

характеристик — математического ожидания, степени разброса выборочных данных, вероятностей нахождения случайных величин в заданной области допустимых значений. Подобные операции представляют особый интерес в задачах оперативной обработки данных и экспресс-анализе вероятностной структуры различных по своей физической природе случайных потоков событий.

Следует также отметить, что полученные в данной работе результаты допускают различные обобщения. В частности, это может быть связано с выбором вероятностных моделей рассматриваемых случайных потоков, принципами выбора областей допустимых значений, исследованиями нестационарных и неоднородных вероятностных структур.

Литература

1. Вентцель Е. С. Теория вероятностей. — М.: Академия, 2005. — 573 с.
2. Forster E., Ronz B. Methoden der Korrelations und Regressionsanalyse. — Berlin: Verlag die Wirtschaft, 1979.
3. Боровиков В. П. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. — СПб.: Питер, 2001. — 656 с.
4. Uberla K. Faktorenanalyse. — Berlin: Springer-Verlag, 1971.
5. Tou J. T., Gonzalez R. C. Pattern Recognition Principles. — London: Addison — Wesley Publishing Company, 1974.
6. Яковлев О. И. Космическая радиофизика. — М.: Научная книга, 1998. — 432 с.
7. Schowengerdt R. A. Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing. — Amsterdam: Elsevier, 2007.
8. Носко В. П. Эконометрика. — М.: Дело, 2011. — 672 с.
9. Новые методы электрокардиографии / под ред. С. В. Грачева, Г. Г. Иванова, А. Л. Сыркина. — М.: Техносфера, 2007. — 552 с.
10. Naatanen R. Attention and Brain Function. — Hillsdale, New Jersey: Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1998. — 560 p.
11. Snyder D. L. Random Point Processes. — N. Y.: John Wiley, 1975. — 486 p.
12. Kingman J. Poisson Processes. — Oxford: Clarendon Press, 2007. — 136 p.
13. Коваленко И. Н., Кузнецов Н. Ю., Шуренков В. М. Случайные процессы: справочник. — Киев: Наук. думка, 1983. — 368 с.
14. Вероятность и математическая статистика: энциклопедия/ под ред. Ю. В. Прохорова. — М.: БРЭ, 2003. — 910 с.
15. Хименко В. И. Характеристики типа превышений уровней для случайных точечных процессов // Радиотехника и электроника. 2000. Т. 45. № 4. С. 436–443.
16. Гнеденко Б. В. Курс теории вероятностей. — М.: УРСС, 2007. — 400 с.

UDC 519.21:537.86

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.85

Scatterplots to Analysis of Random Streams of Events

Khimenko V. I.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, vih.13@yandex.ru

^aJSC “The Scientific Research and Experimental Centre of Intelligent Technologies “Petrokometa”, 67, B. Morskaja St., 190000, Saint-Petersburg, Russian Federation

Purpose: Our goals are probabilistic analysis of random streams of events on the base of two-dimensional scatterplots, and studying a common structure of charts for several most common models of random streams. **Results:** We have shown the specific features of building scatterplots which are displaying two-dimensional information in the problems of probability analysis of random streams of events. We introduced simple numerical characteristics reflecting the information structure of random data on the phase plane. We performed probabilistic analysis of scatterplots for a class of simple Poisson streams, for random streams with inhomogeneous probabilistic structure, for streams with double stochasticity and for a class of random alternating streams of events. **Practical relevance:** Presenting two-dimensional information on a phase plane is highly informative, therefore scatterplots are potentially useful. They allow you to store, average out and systematize sampled data, quickly assess the homogeneity of the event streams, consider correlation effects, grouping, random “contamination” effects and randomly missed data.

Keywords — Information Processing, Random Processes, Event Streams, Point Processes, Scatterplots, Probabilistic Analysis, Inhomogeneous Data.

References

1. Vencel E. S. *Teoriia veroiatnosti* [Probability Theory]. Moscow, Akademiia Publ., 2005. 576 p. (In Russian).
2. Forster E., Ronz B. *Methoden der Korrelations und Regressionsanalyse*. Berlin, Verlag die Wirtschaft, 1979. (In German).
3. Borovikov V. P. *STATISTICA: iskusstvo analiza dannykh na komp'iutere* [STATISTICA: Data Analysis a Computer Oriented Approach]. Saint-Petersburg, Piter Publ., 2001. 656 p. (In Russian).
4. Uberla K. *Faktorenanalyse*. Berlin, Springer-Verlag, 1971.

5. Tou J. T., Gonzalez R. C. *Pattern Recognition Principles*. London, Addison — Wesley Publishing Company, 1974.
6. Iakovlev O. I. *Kosmicheskaja radiofizika* [Space Radio-Physics]. Moscow, Nauchnaia kniga Publ., 1998. 432 p. (In Russian).
7. Schowengerdt R. A. *Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing*. Amsterdam, Elsevier, 2007.
8. Nosko V. P. *Ekonometrika* [Econometrics]. Moscow, Delo Publ., 2011. 672 p. (In Russian).
9. *Novye metody elektrokardiografii* [Modern Methods in Electrocardiography]. Ed. by S. V. Grachev, G. G. Ivanov, A. L. Syrkin. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2007. 552 p. (In Russian).
10. Naatanen R. *Attention and Brain Function*. Hillsdale, New Jersey, Lawrence Erlbaum Associates Publishers, 1998. 560 p.
11. Snyder D. L. *Random Point Processes*. N. Y., John Wiley, 1975. 486 p.
12. Kingman J. *Poisson Processes*. Oxford, Clarendon Press, 2007. 136 p.
13. Kovalenko I. N., Kuznetsov N. Iu., Shurenkov V. M. *Sluchainye protsessy* [Random Processes]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1983. 368 p. (In Russian).
14. *Veroiatnost' i matematicheskaja statistika* [Probability and Mathematical Statistics]. Ed. by Iu. V. Prokhorov. Moscow, BRE Publ., 2003. 910 p. (In Russian).
15. Khimenko V. I. Level Crossing Type Characteristics for Random Point Processes. *Radiotekhnika i elektronika* [Journal of Communications Technology and Electronics], 2000, vol. 45, no. 5, pp. 436–443 (In Russian).
16. Gnedenko B. V. *Kurs teorii veroiatnoستي* [Probability Theory]. Moscow, URSS Publ., 2007. 400 p. (In Russian).

Уважаемые авторы!

При подготовке рукописей статей необходимо руководствоваться следующими рекомендациями.

Статьи должны содержать изложение новых научных результатов. Название статьи должно быть кратким, но информативным. В названии недопустимо использование сокращений, кроме самых общепринятых (РАН, РФ, САПР и т. п.).

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля не менее двух сантиметров.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание (при отсутствии — должность), полное название организации, аннотация и ключевые слова на русском и английском языках, электронные адреса авторов, которые по требованию ВАК должны быть опубликованы на страницах журнала. При написании аннотации не используйте аббревиатур и не делайте ссылок на источники в списке литературы.

Статьи авторов, не имеющих ученой степени, рекомендуется публиковать в соавторстве с научным руководителем, наличие подписи научного руководителя на рукописи обязательно; в случае самостоятельной публикации обязательно предоставляйте заверенную по месту работы рекомендацию научного руководителя с указанием его фамилии, имени, отчества, места работы, должности, ученого звания, ученой степени — эта информация будет опубликована в ссылке на первой странице.

Формулы набирайте в Word, не используя формульный редактор (MathType или Equation), при необходимости можно использовать формульный редактор; для набора одной формулы не используйте два редактора; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте заводские установки редактора, не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = -.

Для набора формул в Word никогда не используйте Конструктор (на верхней панели: «Работа с формулами» — «Конструктор»), так как этот ресурс предназначен только для внутреннего использования в Word и не поддерживается программами, предназначенными для изготовления оригинал-макета журнала.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации в текст не заверстаются и предоставляются отдельными исходными файлами, поддающимися редактированию:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляются в виде отдельных исходных файлов, поддающихся редактированию, используя векторные программы: Visio 4, 5, 2002-2003 (*.vsd); Coreldraw (*.cdr); Excel (*.xls); Word (*.doc); AdobeIllustrator (*.ai); AutoCad (*.dxf); Matlab (*.ps, *.pdf или экспорт в формат *.ai);

— если редактор, в котором Вы изготавливаете рисунок, не позволяет сохранить в векторном формате, используйте функцию экспорта (только по отношению к исходному рисунку), например, в формат *.ai, *.esp, *.wmf, *.emf, *.svg;

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

Наличие подписанных подписей обязательно (желательно не повторяющих дословно комментарии к рисункам в тексте статьи).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, e-mail), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40×55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Список литературы оформляйте двумя отдельными блоками по образцам lit.dot на сайте журнала (<http://i-us.ru/paperrules>) по разным стандартам: Литература — СИБИБД РФ, References — один из мировых стандартов.

Более подробно правила подготовки текста с образцами изложены на нашем сайте в разделе «Оформление статей».

Контакты

Куда: 190000, Санкт-Петербург,
Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Кому: Редакция журнала «Информационно-управляющие системы»

Тел.: (812) 494-70-02

Эл. почта: ius.spb@gmail.com

Сайт: www.i-us.ru

ПРОСТРАНСТВЕННО-ЧАСТОТНЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ УГЛОВЫХ КООРДИНАТ ЛОКАЦИОННОГО ОБЪЕКТА

В. С. Павлов^а, доктор техн. наук, профессор

^аСанкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения, Санкт-Петербург, РФ

Постановка проблемы: в настоящее время интерес к задаче определения угловых координат локационного объекта на основе сочетания моноимпульсного фазового метода со сканированием (вращением) фазовых центров приема связан с перспективным применением радиолокационных координаторов на вращающихся платформах/носителях, что ставит ряд вопросов, требующих научно-технической проработки. **Цель исследования:** раскрытие специфики реализации моноимпульсного фазового метода в условиях вращения фазовых центров приема, включая обоснование двухплоскостной процедуры определения угловых координат локационного объекта, и выявление технического результата, который потенциально может быть достигнут в данных условиях. **Результаты:** предложен пространственно-частотный метод определения угловых координат локационного объекта, оперирующий преобразованием данных координат в параметры частотной модуляции принимаемого локационного сигнала. Показано, что технический результат предложенного метода состоит в значительном расширении угловой рабочей области однозначного определения каждой из двух угловых координат локационного объекта относительно аналогичных известных методов, в частности, «классического» метода фазовой интерферометрии. При этом растров данной области можно задавать, вводя ограничение по ширине спектра обрабатываемых сигналов. **Практическая значимость:** изложенный пространственно-частотный метод определения угловых координат локационного объекта представляет интерес для практического применения как с позиции снижения вероятности срыва слеящего измерения, так и при внешних возмущениях опорного направления в бортовых радиолокационных координаторах.

Ключевые слова — интерферометрия, моноимпульсный, пространственно-частотный, сканирование, угловые координаты, частотная модуляция.

Введение

Задача определения угловых координат локационного объекта (ЛО) является одной из наиболее важных для радиолокационных систем различного назначения, а внедрение новых методов и технических средств решения данной задачи сопровождает весь исторический путь развития радиолокации [1].

В настоящее время для определения угловых координат ЛО широкое распространение имеют как последовательные методы, реализуемые на основе изменения во времени пространственных характеристик антенны (ориентации антенного луча) [1–3], так и параллельные или моноимпульсные методы [1–4], использующие два и более пространственно рассовмещенных приемных или передающих [3] каналов. Известны также и сочетания последовательных и параллельных методов, например, на основе дополнения моноимпульсных методов линейным [2] или коническим [4] сканированием (моноимпульсные методы [1]). В литературных источниках эти сочетания представлены отдельными инженерными разработками, направленными на достижение того или иного частного технического результата.

Сочетание моноимпульсного фазового метода с непрерывным по времени круговым перемеще-

нием используемых в данном методе антенн — сканированием фазовых центров приема [5], считается весьма сложным для практической реализации [2, 4], что, наряду с неочевидностью принципиально достижимого технического результата от такого сочетания, ограничивает распространение соответствующих технических решений в задачах определения угловых координат ЛО.

Однако совершенствование технологической базы антенн с электронным управлением и многообразие способов применения радиолокационных систем в современных условиях [3], например на вращающихся платформах или носителях (что обуславливает круговое сканирование фазовых центров приема), позволяют обойти отмеченные сложности практической реализации, оставляя, тем не менее, нерешенным главный методический вопрос о техническом результате, который потенциально может быть достигнут при сочетании моноимпульсного фазового метода с круговым перемещением фазовых центров приема.

Пространственно-частотное преобразование угловых координат локационного объекта

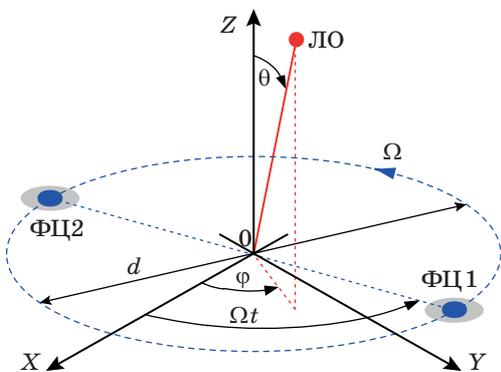
Проведем анализ факторов, участвующих в определении двух угловых координат ЛО в условиях кругового перемещения двух фазовых цен-

тров приема «классического» одноплоскостного интерферометра, являющегося базисом моноимпульсных фазовых радиолокационных устройств [4]. Будем считать, что при таком перемещении оба фазовых центра приема вращаются вокруг точки, которая равноотстоит от каждого из них, с круговой частотой Ω и в плоскости, ортогональной опорному или равносигнальному [1–5] направлению на ЛО.

Геометрическую модель описанных условий пространственно-временного приема иллюстрирует рис. 1, где угловое положение ЛО относительно опорного направления, совпадающего с осью OZ , характеризуется двумя сферическими координатами — широтой θ и долготой φ , а положение двух фазовых центров приема $\PhiЦ1$ и $\PhiЦ2$ в плоскости приемного раскрыва — двумя полярными углами Ωt , $\Omega t + \pi$ и диаметром окружности сканирования d , равной базе пеленгации исходного моноимпульсного фазового метода.

Каждый из двух фазовых центров приема будем рассматривать как эквивалентную точку приема, к которой приведена половина эффективной площади одной общей антенны [6] или эффективная площадь одной из двух разнесенных антенн [3], а также подключен собственный канал приема. При этом сигналы от первой $x_1(t)$ и второй $x_2(t)$ эквивалентных точек приема на выходе двухканального моноимпульсного приемного тракта [4] различаются только по фазе, в которой содержится информация об угловых координатах ЛО.

В представленной на рис. 1 геометрической модели можно увидеть схожесть с аналогичной моделью вращения эквивалентных точек приема, используемой для иллюстрации доплеровского и дифференциально-фазового методов радиопеленгации [7]. Однако в радиопеленгации плоскость вращения эквивалентных точек приема является горизонтальной плоскостью пеленгования [8], тогда как в рассматриваемом радиолокационном приложении эта плоскость ортогональна опорно-



■ Рис. 1. Геометрическая модель пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО

му направлению (оси OZ на рис. 1), относительно которого осуществляется определение угловых координат ЛО. Таким образом, отличие рассматриваемой радиолокационной координатной задачи от задач радиопеленгации имеет место уже на уровне исходных геометрических моделей.

С учетом кругового перемещения двух эквивалентных точек приема взаимный (межканальный) комплексный корреляционный момент сигналов $x_1(t)$ и $x_2(t)$ в фиксированный момент времени t равен

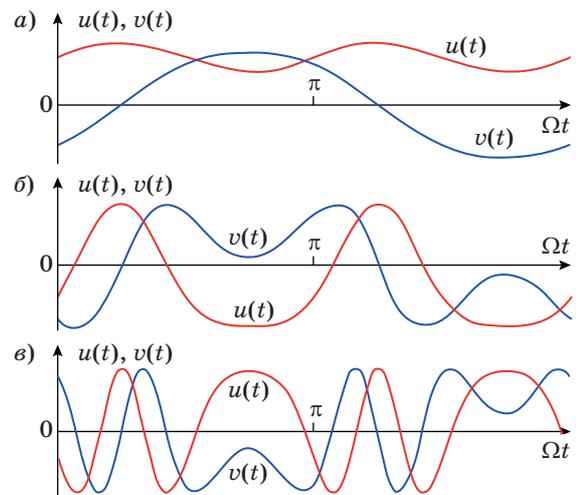
$$z(t) = \mathbf{M}\{x_1(t)x_2^*(t)\} = A(t)\exp(j\Theta \cos(\Omega t - \varphi)), \quad (1)$$

где $\mathbf{M}\{\cdot\}$ — оператор математического ожидания по ансамблю реализаций [9]; «*» — знак комплексного сопряжения; $A(t)$ — амплитудный множитель; $\Theta = 2\pi(d/\lambda)\sin\theta$ — нормированная широта ЛО (λ — длина волны).

Из (1) видно, что результат вычисления взаимного корреляционного момента имеет действительную $u(t)$ и мнимую $v(t)$ составляющие: $z(t) = u(t) + jv(t)$. Временные процессы этих составляющих иллюстрируют рис. 2, а–в на периоде $T = 2\pi/\Omega$ при значениях Θ , равных 1, 3 и 6, что соответствует малым, средним и большим значениям широты ЛО (при $\varphi = 0$).

Наиболее важное обстоятельство, которое прослеживается по рис. 2 при увеличении Θ , состоит в усилении изменчивости процессов $u(t)$ и $v(t)$, что можно рассматривать через изменение их спектральных характеристик.

Данное обстоятельство, наряду с (1), позволяет провести аналогию между рассматриваемым преобразованием угловых координат ЛО и гармонической частотной модуляцией [10], в которой Θ играет роль индекса модуляции. Раскрывая эту анало-



■ Рис. 2. Действительная $u(t)$ и мнимая $v(t)$ составляющие межканального взаимного корреляционного момента при $\Theta = 1$ (а); $\Theta = 3$ (б); $\Theta = 6$ (в)

гию, определим на основе (1) мгновенную частоту $\omega(t)$ процесса $z(t)$ как производную его фазы:

$$\omega(t) = \frac{v'(t)u(t) - u'(t)v(t)}{u^2(t) + v^2(t)} = -\Theta\Omega\sin(\Omega t - \varphi) = \Theta_Y\Omega\cos\Omega t - \Theta_X\Omega\sin\Omega t, \quad (2)$$

где $\Theta_X = \Theta\cos\varphi$ и $\Theta_Y = \Theta\sin\varphi$ — нормированные угловые координаты ЛО, соответствующие углам между осью OZ и проекциями направления на ЛО на плоскости XOZ и YOZ (см. рис. 1).

Прямая пропорциональная связь между нормированной шириной ЛО и частотой $\omega(t)$ в (2) указывает на то, что эта частота выступает в качестве информационного неэнергетического параметра [5, 11], в который преобразуются угловые координаты ЛО. В силу такого преобразования описанное сочетание моноимпульсного фазового метода с вращением двух фазовых центров приема можно рассматривать в качестве базиса пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО.

Следует сказать, что преобразование угловых координат ЛО в параметры амплитудной модуляции принимаемого локационного сигнала хорошо известно и является основой метода конического сканирования [1, 2, 5], тогда как описанное преобразование в параметры частотной модуляции представляет интерес для дальнейшего исследования.

Анализ (2) говорит об отсутствии факторов, которые вносили бы неоднозначность в определение координат Θ_X и Θ_Y , а также ограничивали бы диапазоны их значений. Этот результат важен прежде всего тем, что неоднозначность определения угловых координат ЛО фазовым методом является существенной методической проблемой данного метода [12] (особенно при больших отношениях d/λ), разрешение которой часто требует принятия дополнительных мер, в частности, многоскальных технических реализаций [11]. В этой связи представленная в (2) линейная однозначная связь ширины ЛО с неэнергетическим информационным параметром $\omega(t)$ позволяет дифференцировать исходный моноимпульсный фазовый метод, наделяя его возможностью расширять угловую рабочую область однозначного определения каждой из двух угловых координат ЛО по ортогональным плоскостям XOZ и YOZ .

Уточним тот факт, что возможность неограниченного расширения указанной рабочей области получена лишь теоретически на основе упрощенной модели обработки принимаемых локационных сигналов в бесконечно широкой полосе частот. В практических приложениях следует ожидать наличия ограничивающего фактора для такого расширения, исходя из спектральных характеристик обрабатываемых сигналов. При рас-

крытии этого вопроса желательно опираться на конкретную процедуру пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО.

Вычислительная процедура определения угловых координат локационного объекта

При записи данной процедуры учтем обоснованный в работе [11] и устоявшийся на практике способ нормировки в дискриминаторах радиолокационных измерительных систем, реализуемый за счет автоматической регулировки усиления. Считая, что время корреляции процесса $A(t)$ в (1) (флюктуаций мощности принимаемого локационного сигнала) существенно превышает период сканирования T , процесс $A(t)$ можно заменить на его среднюю на интервале T величину $A = E\{A(t)\}$, а нормирующую компоненту в (2) — на среднюю величину $E\{u^2(t) + v^2(t)\}$, где $E\{\cdot\} = (1/T) \int_{-T/2}^{T/2} (\cdot) dt$ — оператор временного усреднения на интервале T .

Обращаясь к (2), отметим, что процесс $\omega(t)$ является действительным, а его разложение в комплексный ряд Фурье [10] содержит только два члена с комплексно-сопряженными спектральными коэффициентами на частотах Ω и $-\Omega$. Свойство комплексной сопряженности спектральных коэффициентов распространяется и на возможное мешающее воздействие, являющееся действительным в силу того, что формируется по аналогии с (2) из действительных мешающих процессов. Данные факты позволяют оперировать только одной гармоникой спектрального разложения с частотой Ω и представить искомую процедуру формирования оценок ε_X и ε_Y , соответствующих координатам Θ_X и Θ_Y , следующим образом:

$$\varepsilon_X = K \operatorname{Im} \varpi, \quad \varepsilon_Y = K \operatorname{Re} \varpi, \quad (3)$$

где

$$\varpi = E\{(v'(t)u(t) - u'(t)v(t))\exp(-j\Omega t)\} \quad (4)$$

— коэффициент при первой гармонике разложения ненормированной мгновенной частоты в комплексный ряд Фурье; $K = 2/\left[\Omega E\{u^2(t) + v^2(t)\}\right]$ — нормирующий сомножитель, обеспечивающий единичную крутизну преобразования координаты $\Theta_{X(Y)}$ в ее оценку $\varepsilon_{X(Y)}$.

Процедура (3) пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО не вызывает затруднений по техническому исполнению и может быть рекомендована для практического использования.

Тем не менее выражения (3) и (4) не отражают в явном виде влияние спектральных характеристик процессов $u(t)$ и $v(t)$ на оценки ε_X и ε_Y . С этой целью трансформируем процедуру (3) в частотную область, используя разложения каж-

дого из процессов $u(t)$ и $v(t)$ в ограниченный комплексный ряд Фурье, содержащий $2N + 1$ членов. Номер n для члена этого ряда принимает значения от $-N$ до N , а n -е коэффициенты разложения процессов $u(t)$ и $v(t)$ соответственно равны: $U_n = \mathbf{E}\{u(t)\exp(-jn\Omega t)\}$ и $V_n = \mathbf{E}\{v(t)\exp(-jn\Omega t)\}$.

Отметим важные свойства введенных спектральных коэффициентов: а) $U_{-n} = U_n^*$ и $V_{-n} = V_n^*$, так как оба процесса $u(t)$ и $v(t)$ являются действительными; б) все коэффициенты U_n с нечетными индексами и все коэффициенты V_n с четными индексами равны нулю, поскольку процесс $u(t) = A\cos(\Theta\cos(\Omega t - \varphi))$ содержит только четные гармоники разложения и постоянную составляющую, а процесс $v(t) = A\sin(\Theta\cos(\Omega t - \varphi))$ — только нечетные гармоники. Последнее свойство следует из известных формул разложения аналогичных функций в тригонометрические ряды [13].

Учитывая отмеченные свойства и преобразуя (4) на основе принятых спектральных разложений, в результате последовательности аналитических действий получим

$$\varpi = j\Omega \sum_{m=-L}^L (4m+1)U_{2m}^*V_{2m+1}, \quad (5)$$

где L — предел суммирования, задаваемый числом N . Из (5) видно, что наибольшее значение индекса при спектральном коэффициенте равно $2L + 1$, что соответствует нечетному $N = 2L + 1$. Следовательно, для охвата полного набора гармоник процессов $u(t)$ и $v(t)$ желательно полагать число N нечетным.

Определяемый в (5) способ вычисления величины ϖ вводит ограничение на спектральный состав составляющих, участвующих в формировании оценок ε_X и ε_Y , через число L . Данный способ может быть интересен для практики при цифровой реализации, поскольку он описывает также и фильтрацию процессов $u(t)$ и $v(t)$ в частотной области (что применяется достаточно часто благодаря развитию методов и техники быстрого преобразования Фурье [14]). При этом основная вычислительная операция состоит в вычислении спектральной свертки для одного значения ее аргумента, равного Ω .

Анализ технического результата пространственно-частотного метода

Функциональные зависимости от угловых координат ЛО в (5) нетрудно найти, раскрывая связи коэффициентов U_{2m} и V_{2m+1} с координатами Θ и φ . Применяя для этого известные [13] формулы разложения на основе функций Бесселя, имеем

$$\begin{aligned} U_{2m}(\Theta, \varphi) &= A(-1)^m f_{2m}(\Theta, \varphi); \\ V_{2m+1}(\Theta, \varphi) &= A(-1)^m f_{2m+1}(\Theta, \varphi), \end{aligned} \quad (6)$$

где $f_n(\Theta, \varphi) = J_n(\Theta)\exp(-jn\varphi)$ — вспомогательная функция, $J_n(\cdot)$ — функция Бесселя n -го порядка.

Формулы (6) можно использовать и для спектрального описания нормирующего множителя в (3), руководствуясь равенством Парсеваля [10]. При этом $\mathbf{E}\{u^2(t) + v^2(t)\} = A^2 \sum_{n=-N}^N J_n^2(\Theta)$.

Подставляя последовательно (6) в (5), а (5) — в (3), представим в конечном виде зависимости оценок ε_X и ε_Y от угловых координат ЛО:

$$\varepsilon_X(\Theta, \varphi) = \Pi(\Theta)\cos\varphi; \quad \varepsilon_Y(\Theta, \varphi) = \Pi(\Theta)\sin\varphi, \quad (7)$$

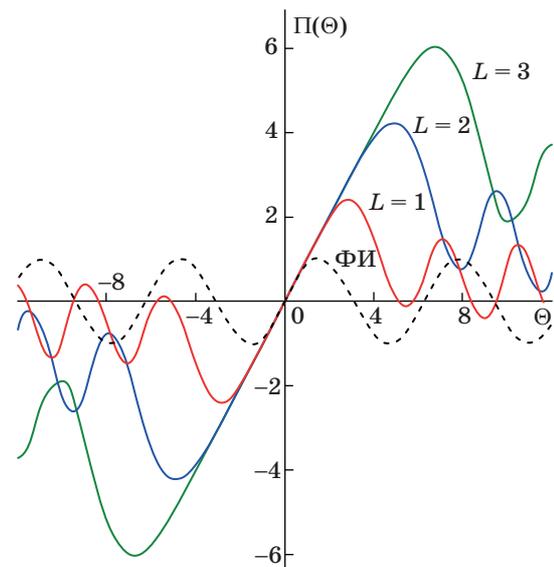
где

$$\Pi(\Theta) = \frac{2 \sum_{m=-L}^L (4m+1)J_{2m}(\Theta)J_{2m+1}(\Theta)}{\sum_{n=-2L-1}^{2L+1} J_n^2(\Theta)} \quad (8)$$

— пеленгационная характеристика, соответствующая пространственно-частотному методу определения угловых координат ЛО.

Из (7) следует, что зависимости оценок $\varepsilon_X(\Theta, \varphi)$ и $\varepsilon_Y(\Theta, \varphi)$ от долготы ЛО повторяют соответствующие зависимости его координат Θ_X и Θ_Y , тогда как связь данных оценок с нормированной широтой ЛО, отражаемая характеристикой $\Pi(\Theta)$, требует отдельного рассмотрения.

Представленное на рис. 3 семейство характеристик $\Pi(\Theta)$ рассчитано по (8) при $L = 1, 2, 3$. Для сравнения на данном рисунке пунктиром изображена аналогичная пеленгационная характеристика для «классического» фазового интерфе-



■ Рис. 3. Пеленгационные характеристики при пространственно-частотном методе определения угловых координат ЛО и базовая пеленгационная характеристика ФИ

рометра $\Phi И$ [1–4, 12] в ненормированном виде, которую примем в качестве базовой.

Главный технический результат рассматриваемого пространственно-частотного метода состоит в обеспечении широкого раствора угловой рабочей области, в которой возможно однозначное определение каждой из двух угловых координат ЛО (см. рис. 3). Видно, что ширина рабочего участка отдельной характеристики $\Pi(\Theta)$, равная расстоянию между ее минимумом и максимумом, значительно превышает аналогичную ширину базовой пеленгационной характеристики $\Phi И$. Более того, данную ширину можно задавать посредством соответствующего ограничения набора гармоник процессов $u(t)$ и $v(t)$ через число $N = 2L + 1$. Дополнительной важной положительной особенностью каждой из характеристик $\Pi(\Theta)$ на рис. 3 является строгая линейность в пределах практически всего ее рабочего участка.

В целях количественного выражения описанного технического результата определим нормированную полуширину $\Delta\Theta$ характеристики $\Pi(\Theta)$, равную координате ее максимального значения. В результате численных расчетов по (8) получим $\Delta\Theta \approx 0,97(2L + 1) = 0,97N$ при $L \geq 2$, а в двух частных случаях $\Delta\Theta \approx 3$ при $L = 1$ и $\Delta\Theta \approx 1,161$ при $L = 0$. Таким образом, можно приближенно полагать, что $\Delta\Theta \approx 2L + 1$ при $L \geq 1$. Соотнося величину $\Delta\Theta$ с нормированной полушириной базовой пеленгационной характеристики $\Phi И$ (см. рис. 3), равной $\pi/2$, имеем увеличение данной полуширины приближенно в $2(2L + 1)/\pi = 2N/\pi$ раз при $L \geq 1$ (исключая отдельный случай $L = 0$, где имеет место уменьшение полуширины в 1,35 раза).

Отметим, что раствор рабочей области определения каждой из двух угловых координат ЛО наиболее часто задается исходно, например, на стадии внешнего проектирования радиолокационной системы, при этом предельные значения полуширины пеленгационной характеристики, превышающие 20 градусов, маловероятны. Учитывая эти возможные значения и раскрывая величину $\Delta\Theta$, нетрудно приближенно выразить полуширину пеленгационной характеристики в градусах: $\Delta\theta \approx 9N\lambda/d$.

Полученное значительное (относительно широко распространенного случая $\Phi И$) расширение пеленгационной характеристики важно для практики как с позиции увеличения углового рабочего диапазона по каждой из двух угловых координат ЛО как при несledящем измерении [5], так и с позиции снижения вероятности срыва автосопровождения ЛО по направлению [5] (в случае использования рассмотренного пространственно-частотного метода в дискриминаторах систем углового автосопровождения). Кроме того, это расширение играет важную роль в обеспечении надежности радиоконтакта с ЛО в услови-

ях внешних возмущений опорного направления [15], когда приемный раскрыв и связанная с ним измерительная система координат (см. рис. 1) жестко зафиксированы на маневрирующем подвижном носителе, например беспилотном летательном аппарате [16].

При расчетах полуширины $\Delta\theta$ для конкретных практических приложений следует учитывать диаграммы направленности двух используемых антенн, которые изначально были сведены к двум эквивалентным точкам приема, не имеющим свойств пространственной избирательности. Анализ этого фактора представляет собой самостоятельную перспективную задачу исследования пространственно-частотного метода определения угловых координат ЛО. Тем не менее упрощенное рассмотрение этой задачи позволяет заключить, что в случае формирования двух эквивалентных точек приема на одном приемном раскрыве [6] эффект от увеличения числа N (более пяти) будет скорректирован диаграммами направленности, тогда как при разнесении двух антенн [3] на расстояние d , превышающее их линейный размер, число N может быть принято весьма большим. Уточнение этого числа связано с практической реализацией приемного раскрыва конкретной радиолокационной системы, использующей изложенный метод определения угловых координат ЛО.

Заключение

Сочетание моноимпульсного фазового метода определения угловых координат ЛО с круговым перемещением (вращением) двух его фазовых центров приема обуславливает преобразование направления на ЛО в частоту детектируемого сигнала, которая изменяется по гармоническому закону синхронно с данным вращением, а ее амплитуда и начальная фаза пропорциональны сферическим координатам соответственно широты и долготы ЛО. Такое преобразование вместе с обработкой частотного информационного параметра можно трактовать как отдельный пространственно-частотный метод определения угловых координат ЛО.

Техническим результатом данного пространственно-частотного метода является значительное расширение телесного угла, в котором обеспечивается однозначность определения каждой из двух угловых координат ЛО относительно аналогичных известных методов. Это имеет весомое практическое значение в условиях внешних возмущений опорного направления, вызванных, например, непостоянством углов рыскания и тангажа беспилотного летательного аппарата [16] (которые не всегда могут быть полностью ском-

пенсированы [15]), а также с позиции снижения вероятности срыва следящего измерения [5] или потери радиоконтакта с ЛО. При этом ширина раствора линейного рабочего участка пеленгацион-

ной характеристики может задаваться через параметры спектральной обработки принимаемого локационного сигнала в соответствии с конкретными условиями практической реализации.

Литература

1. Radar Handbook/Editor in Chief Skolnik Merrill I. (Merrill Ivan). Third Edition. — The McGraw-Hill Companies, 2008.
2. Зуфрин А. М. Методы построения судовых автоматических угломерных систем. — Л.: Судостроение, 1970. — 408 с.
3. Holder J. E. Angle-of-Arrival Estimation Using Radar Interferometry. Methods and Applications. — Edison, NJ: SciTech Publishing, 2014. — 358 p.
4. Леонов А. И., Фомичев К. И. Моноимпульсная радиолокация. — М.: Радио и связь, 1984. — 312 с.
5. Вопросы статистической теории радиолокации: в 2 т. / под ред. Г. П. Тартаковского. — М.: Сов. радио, 1964. Т. 2. — 1080 с.
6. Павлов В. С., Турецкий Л. С., Французов А. Д. Амплитудно-фазовые распределения поля в апертуре многоканальной пеленгационной системы // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2008. Вып. 5. С. 9–14.
7. Беляевский Л. С., Новиков В. С., Олянюк П. В. Основы радионавигации. — М.: Транспорт, 1982. — 288 с.
8. ГОСТ 23288-78. Радиопеленгаторы. Термины и определения: сб. стандартов. Ч. 3. — М.: Стандартинформ, 2005. — С. 173–176.
9. Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов. — М.: Радио и связь, 1986. — 296 с.
10. Гоноровский И. С. Радиотехнические цепи и сигналы. — М.: Дрофа, 2006. — 720 с.
11. Теоретические основы радиолокации / под ред. В. Е. Дулевича. — М.: Сов. радио, 1978. — 608 с.
12. Wohlleben R., Mattes H., Krichbaum Th. Interferometry in Radioastronomy and Radar Techniques. — N. Y.: Springer Publishing, 1991. — 210 p.
13. Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables/ed. by Milton Abramowitz, Irene Ann Stegun. — Washington D.C., USA; N. Y., USA: United States Department of Commerce, National Bureau of Standards; Dover Publications, 1983.
14. Oppenheim A. V., Shafer R. W. Discrete-Time Signal Processing. 2nd ed. — Prentice-Hall, 1999. — 870 p.
15. Шаров С. Н. Основы проектирования координаторов систем управления движущимися объектами. — Л.: Гособразование СССР, 1990. — 96 с.
16. Авиационные системы радиоуправления: в 3 т. / под ред. А. И. Канащенкова и В. И. Меркулова. — М.: Радиотехника, 2003. Т. 2. — 392 с.

UDC 621.396.96

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.94

Spatial-Frequency Method for Angular Coordinates Estimation of Radar Object

Pavlov V. S.^a, Dr. Sc., Tech., Professor, w14z@yandex.ru

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

Purpose: Nowadays an interest to the problem of radar object angular coordinates estimation based on a combination of monopulse phase method with the receiving phase centers scanning (rotating) is stipulated by the radar coordinators perspective application upon rotating platforms/carriers, thus sets a number of questions that require theoretical and practical elaboration. The paper has as its goal the realization specifics consideration for monopulse phase method under conditions of receiving phase centers rotation, so comprising a substantiation of biplanar procedure for radar object angular coordinates estimation and a technical result revelation, that can be achieved potentially in the stated conditions. **Results:** Spatial-frequency method of radar object angular coordinates estimation is proposed, which operates with these coordinates conversion into frequency modulation parameters of the receiving radar signal. It is shown that a technical result the proposed method is consisted in considerable expansion of the angular operating area for single-valued estimation of each of two angular coordinates of radar object comparatively to the similar methods, particularly the “classical” method of phase interferometry. Along with it the aperture of this area can be assigned by a spectrum width restriction of the processing signals. **Practical relevance:** The described spatial-frequency method of radar object angular coordinates estimation possesses an interest for practical application as form a position of probability reduction for the follow-up measurement breakdown as well as under the exterior disturbances of the reference direction in on-board radar coordinators.

Keywords — Angular Coordinates, Frequency Modulation, Interferometry, Monopulse, Scanning, Spatial-Frequency.

References

1. Radar Handbook / Editor in Chief Skolnik Merrill I. (Merrill Ivan). Third Edition. The McGraw-Hill Companies, 2008.
2. Zufirin A. M. *Metody postroeniia sudovykh avtomaticheskikh uglomernykh sistem* [Construction Methods of the Ship's Automatic Angular Gage Systems].

- Leningrad, Sudostroenie Publ., 1970. 408 p. (In Russian).
3. Holder J. E. *Angle-of-Arrival Estimation Using Radar Interferometry, Methods and Applications*. Edison, NJ, SciTech Publ., 2014. 358 p.
 4. Leonov A. I., Fomichjov K. I. *Monoimpul'snaia radiolokatsiia* [Monopulse Radiolocation]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1984. 312 p. (In Russian).
 5. *Voprosy statisticheskoi teorii radiolokatsii* [Questions of Statistical Theory of Radiolocation]. Ed. by G. P. Tartakovskij. Moscow, Sovetskoe radio Publ., 1964. Vol. 2. 1080 p. (In Russian).
 6. Pavlov V. S., Turnetskij L. S., Frantsuzov A. D. Amplitude-Phase Field Distributions in the Multichannel Direction Finding System's Aperture. *Izvestiia vuzov Rossii. Radioelektronika*, 2008, no. 5, pp. 9–14 (In Russian).
 7. Beliaevskij L. S., Novikov V. S., Olianiuk P. V. *Osnovy radionavigatsii* [Fundamentals of Radionavigation]. Moscow, Transport Publ., 1982. 288 p. (In Russian).
 8. State Standard 23288-78. Radio Direction Finders. Terms and Definitions. In: *Sbornik standartov* [Collection of Standards]. Moscow, Standartinform Publ., 2005, pp. 173–176 (In Russian).
 9. Tikhonov V. I. *Nelineinye preobrazovaniia sluchainykh protsessov* [Nonlinear Transformations of Random Processes]. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1986. 296 p. (In Russian).
 10. Gonorovskij I. S. *Radiotekhnicheskie tsepi i signaly* [Radio-technical Circuits and Signals]. Moscow, Drofa Publ., 2006. 720 p. (In Russian).
 11. *Teoreticheskie osnovy radiolokatsii* [Theoretical Fundamentals of Radiolocation]. Ed. by V. E. Dulevich. Moscow, Radio i sviaz' Publ., 1978. 608 p. (In Russian).
 12. Wohlleben R., Mattes H., Krichbaum Th. *Interferometry in Radioastronomy and Radar Techniques*. New York, Springer Publ., 1991. 210 p.
 13. *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*. Ed. by Milton Abramowitz, Irene Ann Stegun. Washington D.C., USA; New York, USA, United States Department of Commerce, National Bureau of Standards; Dover Publications, 1983.
 14. Oppenheim A. V., Shafer R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. 2nd ed. Prentice-Hall, 1999. 870 p.
 15. Sharov S. N. *Osnovy proektirovaniia koordinatov sistem upravleniia dvizhushchimisja ob'ektami* [Engineering Fundamentals for Coordinators of Moving Objects Control Systems]. Leningrad, Gosobrazovanie SSSR Publ., 1990. 96 p. (In Russian).
 16. *Aviatsionnye sistemy radioupravleniia* [Aviation Radio Control Systems]. Ed. by A. I. Kanashhenkov and V. I. Merkulov. Moscow, Radiotekhnica Publ., 2003. Vol. 2. 392 p. (In Russian).

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

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

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

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

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

УДК 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.101

ТЕОРИЯ ЭПИДЕМИЙ КАК ИНСТРУМЕНТ АНАЛИЗА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ШИРОКОВЕЩАТЕЛЬНОГО ТРАФИКА В СЕТЯХ VANET

Е. А. Кучерявый^а, PhD, профессор

С. В. Ярцев^б, старший преподаватель

^аНациональный исследовательский университет «Высшая школа экономики», Москва, РФ

^бСанкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Санкт-Петербург, РФ

Введение: механизм оповещения о нештатных ситуациях в сетях VANET предусматривает передачу информационных сообщений в широковещательном режиме от узла к узлу. В целях ограничения потока дублирующих сообщений, возникающего при таком способе передачи, необходимо применять специализированные алгоритмы, позволяющие организовать в общей массе узлов сети режим избирательности к ретрансляции. **Цель:** оценка возможности применения теории эпидемий как инструмента для построения аналитической модели процесса распространения широковещательных сообщений. **Результаты:** в процессе анализа переходных процессов состояний узлов, связанных с распространением информационных сообщений по сети, была произведена грация состояний узлов сети в соответствии с классификацией, предлагаемой теорией эпидемий. На базе суждений о физических основах и особенностях процесса ретрансляции сообщений в сетях VANET получены аналитические выражения, описывающие изменение относительной численности каждой из выделенных групп узлов. Дальнейшие исследования с применением среды имитационного моделирования NS-2 позволили получить статистические данные об относительной численности каждой из групп узлов во временном разрезе для модельного участка автомобильной сети. Сравнительный анализ полученных аналитических и модельных результатов с применением критерия согласия Пирсона показал, что полученные аналитические выражения применимы для описания переходных процессов состояния узлов для случая в сетях VANET. Как следствие, это доказывает, что теория эпидемий может быть использована в качестве инструмента для сравнительного анализа разрабатываемых алгоритмов ретрансляции информационных сообщений.

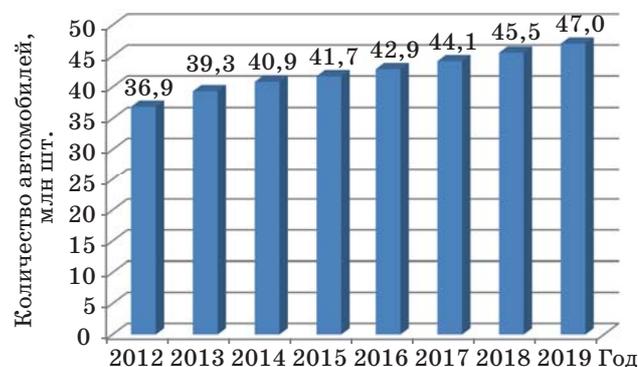
Ключевые слова — автомобильные ad hoc сети (VANETs), широковещательный трафик, теория эпидемий, интеллектуальные транспортные системы, WAVE.

Введение

Рост городов, вызванный урбанизацией населения, ведет не только к увеличению площадей и высотности застроек, но и к сопутствующему расширению дорожной сети. В совокупности с повышением ценовой доступности автомобилей данная тенденция непременно приводит к обострению проблем, связанных с увеличением интенсивности транспортных потоков. Так, в последнее десятилетие не только за рубежом, но и в России наблюдается бурный рост автомобильного парка (рис. 1) [1, 2]. Это в свою очередь приводит к снижению уровня безопасности дорожного движения и, как следствие, к росту дорожно-транспортных происшествий, все чаще заканчивающихся массовыми столкновениями по причине невозможности своевременного информирования водителей об опасности.

Исследование и разработка инфокоммуникационной структуры, которая позволила бы обеспечить участников дорожного движения не только информацией, связанной с безопасностью, но и дополнительными видами информационных услуг, осуществляются в рамках концепции интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [3, 4]. Решение задачи комплексного предоставления

информационных услуг достигается конвергенцией таких современных технологий беспроводной связи, как WAVE (Wireless Access in Vehicular Environment) [5, 6], DSRC (Dedicated Short-Range Communication) [7, 8], LTE (Long Term Evolution), а также Bluetooth и ZigBee. Одним из важнейших компонентов ИТС является автомобильная самоорганизующаяся сеть VANET (Vehicular Ad Hoc Network) [9, 10], узлы которой размещаются на транспортных средствах. Первостепенной целью данных сетей является оповещение участников



■ Рис. 1. Прогноз формирования парка легковых автомобилей в России до 2019 г.

дорожного движения о возникновении нештатных ситуаций путем широковещательной рассылки специальных информационных сообщений [11, 12].

Задача передачи сообщений безопасности через сеть VANET с учетом требований к высокой вероятности успешной доставки сообщений всем близлежащим узлам связана с необходимостью учета огромного количества влияющих факторов. В их числе не только характеристики физического канала передачи, такие как замирание, затухание и т. д., но и проблемы, связанные с перегрузкой канала, вызванные несовершенством алгоритмов, управляющих эффективностью использования сетевых ресурсов.

Поскольку для доступа к среде передачи все узлы используют технологию CSMA/CA, организуя разделением ресурсов общей среды передачи, то плотность узлов в зоне трансляции сообщений безопасности является ключевым фактором, оказывающим влияние на загрузку канала и, как следствие, на вероятность успешной передачи сообщений. Данную особенность необходимо учитывать при исследовании характеристик алгоритмов ретрансляции сообщения.

Теория эпидемий

Одним из подходов к исследованию процесса передачи сообщений через ad hoc сеть является теория эпидемий [13, 14]. Изначально данная теория была нацелена на изучение характеристик распространения инфекционного заболевания в группе лиц, восприимчивых к заражению. Впоследствии, проводя аналогии с составом и реакцией ad hoc сетей на передаваемое сообщение, данную теорию стали применять для анализа их поведения. Согласно данной теории, вирус распространяется от инфицированного узла к восприимчивым при непосредственном контакте между узлами. После этого восприимчивые узлы становятся инфицированными и могут осуществлять дальнейшее распространение вируса. По прошествии определенного промежутка времени инфицированные узлы могут восстановиться, получив иммунитет к дальнейшему заражению (данное поведение свойственно для модели SIR (Susceptible-Infective-Recovered) [15]), либо стать вновь восприимчивыми к инфекции (что характерно для модели SIS (Susceptible-Infective-Susceptible) [16–19]).

В случае сетей VANET мы имеем дело с широковещательным способом распространения критичных к времени доставки и вероятности потери сообщений от приложений, связанных с безопасностью. Принимая во внимание тот факт, что каждому из узлов достаточно одного экземпляра принятого сообщения, для анализа больше подходит модель SIR теории эпидемий.

Для сопоставления с моделью SIR определим в составе сетей VANET три состояния узлов:

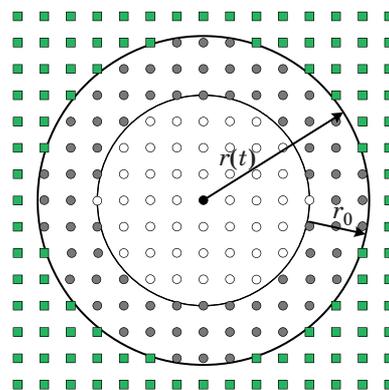
1) инфицированные — узлы, содержащие требование на отправку сообщения безопасности. В нашем случае это узлы, которые являются инициаторами отсылки критичного сообщения либо принявшие сообщение и потенциально готовые произвести его ретрансляцию при условии, что у принятого пакета время жизни (Time To Live) $TTL < TTL_{max}$;

2) восприимчивые — те, которые находятся в зоне уверенного приема радиосигнала и не имеют иммунитета к приему сообщения безопасности, т. е. узлы, не находящиеся в состоянии «восстановившийся»;

3) восстановившиеся — узлы, по тем или иным причинам получившие иммунитет к дальнейшей ретрансляции принимаемых сообщений.

Рассмотрим процесс распространения критичного сообщения через сеть VANET на примере единичной рассылки. В данном случае инициатор отсылки критичного сообщения является инфицированным узлом, который заражает все узлы, находящиеся в радиусе распространения радиосигнала. Поскольку узлы оборудуются все направленными антеннами, то зона заражения первичной трансляцией будет представлять собой окружность с радиусом r_0 . Величина r_0 будет зависеть от установленного уровня мощности передатчика. При допущении, что распространение сообщения происходит на плоскости с равномерно распределенными узлами, становится очевидно, что с каждой новой ретрансляцией зона заражения будет расширяться пропорционально радиусу r_0 (рис. 2). Все узлы, находящиеся внутри зоны с радиусом $(r(t) - r_0)$, считаются восстановившимися и получившими иммунитет к заражению от инфицированных соседей.

В ходе исследования динамики распространения широковещательных сообщений в сетях VANET необходимо учитывать, что радиус рас-



■ Рис. 2. Модель распространения критичного сообщения в сети VANET

пространения радиосигнала может достигать 200 м. Как следствие, при достаточно высокой плотности транспортных средств каждая ретрансляция сообщения приводит к скачкообразному нарастанию числа инфицированных узлов, потенциально готовых к ретрансляции. Данный факт свидетельствует о необходимости применения специализированных алгоритмов, позволяющих сократить объем ретранслирующих узлов из числа инфицированных.

Базовая аналитическая модель

Запишем уравнение баланса масс для переходного процесса состояний узлов. Для этого обозначим относительную долю восприимчивых, инфицированных и восстановившихся узлов как \tilde{S} , \tilde{I} и \tilde{R} соответственно. Причем, поскольку переходной процесс протекает внутри закрытой популяции, очевидно, что

$$\tilde{S} + \tilde{I} + \tilde{R} = 1. \quad (1)$$

Тогда базовая система дифференциальных уравнений, описывающая баланс масс для модели SIR, известная из теории эпидемий [20, 21], выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{S}}{dt} = -\beta\tilde{I}\tilde{S}; \\ \frac{d\tilde{I}}{dt} = \beta\tilde{I}\tilde{S} - \gamma\tilde{I}; \\ \frac{d\tilde{R}}{dt} = \gamma\tilde{I}, \end{cases} \quad (2)$$

где β — вероятностный коэффициент, характеризующий объем инфицирования восприимчивых узлов при контакте с инфицированным; γ — вероятностный коэффициент, характеризующий объем восстановления узлов после инфицирования.

Рассмотрим возможность применения данной системы уравнений к случаю передачи сообщений безопасности через сеть VANET. Для этого введем количественную оценку в существующую систему (2). Учитывая введенные ранее ограничения на число ретрансляций в три шага и тот факт, что скорость распространения сигнала многократно выше скорости перемещения автомобилей, можно считать, что за время распространения сообщения по сети относительное положение транспортных средств практически не меняется. Данное допущение позволяет считать общую численность транспортных средств, требующих информирования, неизменной и равной

$$N = S(t) + I(t) + R(t). \quad (3)$$

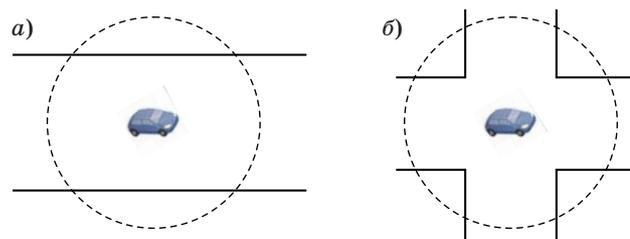
В результате трансляции сообщения инфицируется только часть из общей численности узлов N .

В разрезе времени t эта часть может быть определена как $S(t)/N$. Далее для оценки абсолютного значения численности восприимчивых узлов необходимо ввести несколько допущений. Так, будем считать, что узлы сети распределены равномерно с некоторой плотностью ρ . Тогда с учетом использования ненаправленных антенн число узлов, с которыми может контактировать инфицированный узел при передаче сообщения, может быть найдено как $\rho\pi r_0^2$. В реальных условиях расположение узлов сети ограничено пределами границ проезжей части. Данные ограничения можно представить в виде усеченной окружности (рис. 3, а, б), что должно быть отражено при анализе посредством ввода специального коэффициента формы α , зависящего от геометрической формы дорожного полотна.

Таким образом, базовую систему дифференциальных уравнений (2) для случая передачи критичных сообщений по сети VANET можно записать как

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta\gamma I(t) \frac{\alpha\rho\pi r_0^2}{N} S(t); \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta I(t) \frac{\alpha\rho\pi r_0^2}{N} S(t) - \gamma I(t); \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t). \end{cases} \quad (4)$$

Как было отмечено ранее, с целью ограничить непроизводительное занятие ресурсов канала дублирующими сообщениями, возникающее в случае широковещательной рассылки в многошаговом режиме, необходимо использовать специализированные ограничивающие алгоритмы. Также необходимо учитывать, что основной задачей рассылки сообщений безопасности в сетях VANET является обеспечение надежного информационного покрытия всех соседних узлов, находящихся на достаточной для принятия необходимых мер безопасности дистанции. Такого эффекта можно достигнуть только за счет минимизации числа ретранслирующих узлов при сохранении объемов инфицирования. Очевидно, что применение специализированных алгоритмов должно



■ **Рис. 3.** Примеры зон покрытия для различных форм проезжей части: а — прямолинейный участок дороги; б — перекресток

обеспечивать переход большей части узлов из состояния I в состояние R без ретрансляции сообщения. Именно для этих целей был разработан алгоритм распространения сигнала на основе значения соотношения сигнал/шум [22], результат работы которого предполагается описать при помощи теории эпидемий.

Основным отличием работы сети в случае применения упомянутого алгоритма является ограничение численности ретранслирующих узлов из общего числа инфицированных. Таким образом, $I(t)$ можно представить в виде суммы узлов, с высокой вероятностью выполняющих ретрансляцию, и узлов, с высокой вероятностью переходящих в восстановившееся состояние без ретрансляции: $I^a(t) + I^p(t)$. Соответственно, радиус r_0 можно разделить на два отрезка r_0^a и r_0^p , причем $r_0^a \ll r_0^p$ (рис. 4).

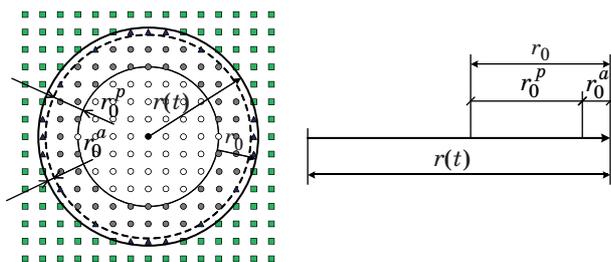
С учетом вышеизложенных уточнений систему дифференциальных уравнений (4) следует привести к виду

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\beta I(t) \frac{\alpha \rho \pi r_0^2}{N} S(t); \\ \frac{dI(t)}{dt} = \beta \left(I^a(t) (r_0^a)^2 + I^p(t) (r_0^p)^2 \right) \frac{\alpha \rho \pi}{N} S(t) - \gamma I(t); \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t). \end{cases} \quad (5)$$

Принимая во внимание, что каждая передача сообщения является независимым событием, в рамках которого на первичном этапе существует только один инфицированный узел, можно записать начальные значения численности каждого из типов узлов как

$$\begin{cases} S(t) = N - 1, \\ I(t) = 1, \\ R(t) = 0 \end{cases} \quad \text{при } t = 0. \quad (6)$$

Для оценки численности каждого из типов узлов при $t > 0$ следует обратиться к рис. 4. Из рисунка видно, что с учетом особенностей работы алгоритма движущей силой внешнего фронта



■ Рис. 4. Модель распространения критичного сообщения в сети VANET с использованием предложенного алгоритма

заражения является величина активных инфицированных узлов $I^a(t)$. Таким образом, в первую очередь следует определить зависимость между объемами восприимчивых узлов и активных инфицированных:

$$\begin{cases} S(t) = N - \alpha \rho \pi r(t)^2; \\ I^a(t) = \alpha \rho \pi r(t)^2 - \alpha \rho \pi (r(t) - r_0^a)^2 - \gamma I^a(t). \end{cases} \quad (7)$$

Из уравнений (6) с учетом того, что $r_0^a \ll r(t)$, получаем

$$I^a(t) = \frac{2\alpha \rho \pi r_0^a r(t)}{1 + \gamma}. \quad (8)$$

Выразив $r(t)$ через $S(t)$ и подставив в (7), получим

$$I^a(t) = \frac{2r_0^a \sqrt{\alpha \rho \pi}}{1 + \gamma} \sqrt{N - S(t)}. \quad (9)$$

Далее подставим выражение (9) в дифференциальное уравнение для $S(t)$ из системы уравнений (5). Для полученного уравнения можно найти решение общего вида

$$S(t) = N - N \left(\frac{2}{1 + e^{-At + C}} - 1 \right)^2, \quad (10)$$

где $A = \frac{2\beta \left(r_0^a \sqrt{\alpha \rho \pi} \right)^3}{\sqrt{N(1 + \gamma)}}.$

С учетом начальных значений (6) находим частное решение

$$S(t) = N - N \left(\frac{2}{1 + B e^{-At}} - 1 \right)^2, \quad (11)$$

где $B = \frac{\sqrt{N} - 1}{\sqrt{N} + 1}.$

Снова обратимся к системе дифференциальных уравнений (5). Из нее видно, что переход из состояния S в состояние R происходит последовательно через состояние I . Таким образом, прямая зависимость между этими двумя состояниями на первый взгляд не наблюдается. Однако если обратиться к рис. 4, становится очевидно, что численность восстановившихся узлов на момент времени t зависит от численности восприимчивых узлов на момент предыдущей ретрансляции. Данное наблюдение можно записать как $R(t) = (N - S(t - \tau))$, где τ — интервал времени, затрачиваемый на одну ретрансляцию. Отсюда мы можем записать систему уравнений, описывающую переходные процессы между состояниями I и R , как

$$\begin{cases} R(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t = 0; \\ N - S(t - \tau) & \text{при } t > 0; \end{cases} \\ I(t) = S(t) - R(t). \end{cases} \quad (12)$$

Воспользовавшись полученным ранее выражением (11) для $S(t)$, мы можем определить $R(t)$ для $t > 0$ как

$$R(t) = N - S(t - \tau) = N \left(\frac{2}{1 + Be^{-A(t-\tau)}} - 1 \right)^2. \quad (13)$$

Далее, на основе (12) и (13), получаем уравнение для $I(t)$:

$$I(t) = N - N \left(\frac{2}{1 + Be^{-At}} - 1 \right)^2 - N \left(\frac{2}{1 + Be^{-A(t-\tau)}} - 1 \right)^2. \quad (14)$$

Таким образом, на основе суждений из теории эпидемий мы получили аналитические выражения, дающие возможность оценить скорость протекания процесса распространения информационных сообщений в пределах требуемой дистанции информирования.

Анализ результатов моделирования

Проверка аналитических суждений, изложенных в предыдущем разделе, выполнялась при помощи среды имитационного моделирования NS-2 (Network Simulator версия 2) релиз 2.35 [23]. Начиная с релиза 2.28, в данной среде появились модули, позволяющие моделировать сети стандарта IEEE 802.11p.

Для проведения моделирования разработанного сценария применялись следующие параметры:

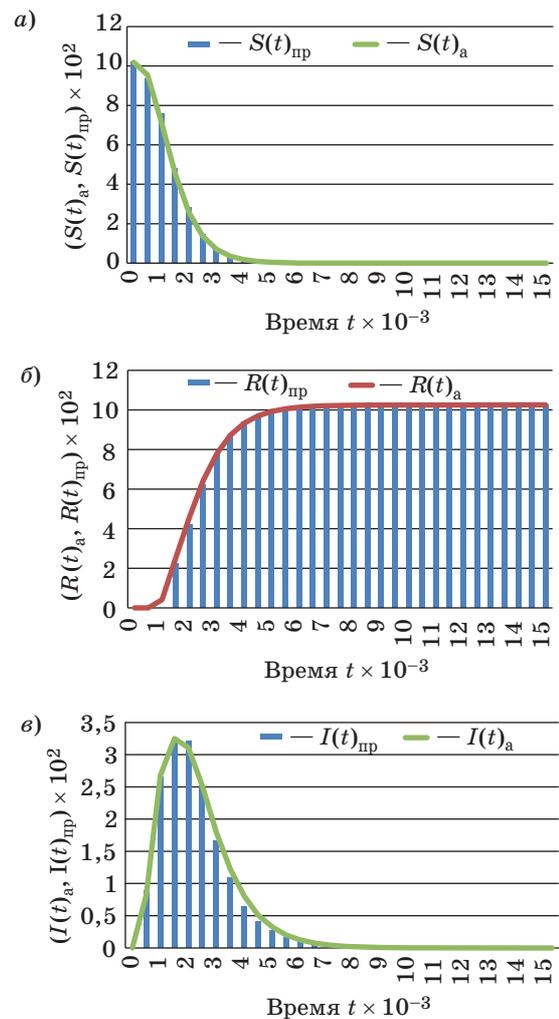
- полоса пропускания — 6 Мбит/с;
- модель радиоканала — Nakagami-m ($m = 7$);
- мощность передатчика — 7,24 дБм;
- тип антенны — ненаправленная;
- тип трафика — с постоянной битовой скоростью (CBR);
- размер пакета — 500 байт.

В качестве топологии для сценария моделирования был выбран прямолинейный участок дороги протяженностью 1600 м, с тремя полосами в каждом направлении. Дистанция между узлами одного направления была установлена 5 м.

Обработка результатов моделирования рассылки 10 000 сообщений производилась скриптами, написанными на языке программирования Perl. В разработанных скриптах модельное время разбивалось на интервалы по 0,5 мс, и на каждом интервале подсчитывалась численность узлов в каждом из трех состояний. Поскольку в рамках исследования оценка загрузки канала не производилась, то размер пакетов в расчетах не учитывался. При этом ключевым показателем, подлежащим оценке, было выбрано количество узлов, задействованных в процессе ретран-

сляции пакетов. Данный показатель является одним из наиболее важных, поскольку оказывает непосредственное влияние и на загрузку канала, и на задержки при распространении пакетов по сети.

На основе результатов обработки статистики были построены диаграммы переходных процессов для всех трех состояний узлов. Так, на рис. 5, а приведена столбчатая диаграмма, отображающая распределенную по времени среднюю численность восприимчивых узлов, полученную эмпирически на основе анализа результатов моделирования. Непрерывная огибающая является аналитическим результатом (11). На рис. 5, б и в приведены результаты моделирования для восстановившихся и инфицированных узлов совместно с полученными ранее аналитическими результатами (13) и (14). Поскольку в сценарии моделирования использовался прямолинейный участок дороги общей шириной 30 м, то при



■ Рис. 5. Диаграмма изменения средней численности восприимчивых (а), восстановившихся (б) и инфицированных (в) узлов

выбранных параметрах моделирования площадь дорожного полотна составляет приблизительно 0,053 от общей площади покрытия радиосигналом. Именно это значение и было выбрано для получения аналитических результатов.

Проверка на согласие полученных аналитических результатов с результатами моделирования по критерию Пирсона для уровня значимости 0,05 подтвердила гипотезу о принадлежности эмпирических результатов аналитическим. Аналогичный подход к анализу процесса распространения широкополосных сообщений на основе теории эпидемий может быть применен также в случае использования других алгоритмов ретрансляции сообщений. Впоследствии полученные аналитические выражения могут

быть использованы как удобный инструмент оценки эффективности разрабатываемых алгоритмов.

Заключение

В данной статье рассмотрен подход к исследованию процесса распространения широкополосного трафика в сетях VANET на основе применения теории эпидемий. Основанное на моделировании исследование показало справедливость примененных аналитических суждений. На базе полученных формул могут быть произведены дальнейшие исследования в целях оценки таких важнейших характеристик, как задержка доставки критических сообщений и загрузка канала [24].

Литература

1. Аналитическое агентство «Автостат». <https://www.autostat.ru/articles/21090/> (дата обращения: 25.05.2016).
2. Wallace R. Technology Trends and Drivers in the Global Automotive Industry // German Machinery Business Conf., Berlin, Germany, Oct. 6, 2015. P. 53–59.
3. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 302 665. Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. — European Telecommunications Standards Institute, 2010. — 44 p.
4. ETSI Guide ETSI EG 202 798. Intelligent Transport Systems (ITS); Testing; Framework for Conformance and Interoperability Testing. — European Telecommunications Standards Institute, 2011. — 48 p.
5. IEEE Std 1609.0-2013. IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Architecture. — 78 p. doi:10.1109/IEEESTD.2014.6755433
6. Miao M., Zheng Q., Zheng K., Zeng Z. Implementation and Demonstration of WAVE Networking Services for Intelligent Transportation Systems // Internet of Vehicles — Technologies and Services: First Intern. Conf., IOV 2014, Beijing, China, Sept. 1–3, 2014. P. 130–139.
7. DSRC Implementation Guide. A Guide to Users of SAE J2735 Message Sets over DSRC. SAE International, 2010. — 210 p.
8. Wilkie D. Review of the Status of the Dedicated Short-Range Communications Technology and Applications: [Draft] Report to Congress, April 28, 2015. <http://www.trb.org/Main/Blurbs/172448.aspx>. (дата обращения: 25.05.2016).
9. Кучерявый А. Е., Прокопьев А. В., Кучерявый Е. А. Самоорганизующиеся сети. — СПб.: Любавич, 2011. — 312 с.
10. Jakubiak J., Koucheryavy Y. State of the Art and Research Challenges for VANETs // Proc. of IEEE CCNC 2008, Las Vegas, USA, Jan. 10–12, 2008. P. 912–916.
11. Dressler F., Hartenstein H., Altintas O., Tonguz O. K. Inter-Vehicle Communication — Quo Vadis // IEEE Communications Magazine. 2014. Vol. 52. N 6. P. 170–177.
12. Samara G., Alhmiedat T. Intelligent Emergency Message Broadcasting in VANET Using PSO // WCSIT. 2014. Vol. 4. N 7. P. 90–100.
13. Mishra B. K., Keshri N. Mathematical Model on the Transmission of Worms in Wireless Sensor Network // Applied Mathematical Modelling. 2013. Vol. 37. N 6. P. 4103–4111.
14. Newman M. E. J., Ferrario C. R. Interacting Epidemics and Coinfection on Contact Networks // PLOS One. 2013. Vol. 8. e71321. doi:10.1371/journal.pone.0071321
15. De P., Liu Y., Das S. K. Modeling Node Compromise Spread in Wireless Sensor Networks Using Epidemic Theory in World of Wireless // Mobile and Multimedia Networks, WoWMoM 2006: Intern. Symp., Buffalo-Niagara Falls, NY, 2006. P. 243–250.
16. Khelil A., Becker C., Tian J., Rothermel K. An Epidemic Model for Information Diffusion in MANETs // 5th ACM Intern. Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM, USA, Atlanta, Georgia, Sept. 28, 2002. P. 54–60.
17. Mark B. L. Analysis of Virus Spread in Wireless Sensor Networks: An Epidemic Model // Design of Reliable Communication Networks, DRCN 2009: 7th Intern. Workshop on, Washington, DC, 2009. P. 86–91.
18. Newman M. E. J. The Spread of Epidemic Disease on Networks // Phys. Rev. E. 2002. Vol. 66. Iss. 1. doi:10.1103/PhysRevE.66.016128
19. Zhang X., Neglia G., Kurose J., Towsley D. Performance Modeling of Epidemic Routing // Computer Networks. 2007. Vol. 51. Iss. 10. P. 2867–2891.
20. Hethcote H. W. Mathematics of Infectious Diseases // SIAM Review. 2000. Vol. 42(4). P. 599–653.
21. Keeling M. J., Rohani P. Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals. — Princeton University Press, 2007. — 408 p.

22. Ярцев С. В. Механизмы управления широкополосным трафиком в сетях VANET // Электросвязь. 2015. № 3. С. 27–31.
23. Chen Q., et al. Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in NS-2 (802.11Ext) / Q. Chen, F. Schmidt-Eisenlohr, D. Jiang, M. Torrent-Moreno,

- L. Delgrossi, H. Hartenstein // MSWiM. 2008. P. 159–168.
24. Groenevelt R., Nain P., Koole G. The Message Delay in Mobile Ad Hoc Networks // Performance Evaluation. 2005. Vol. 62. P. 210–228.

UDC 621.396

doi:10.15217/issn1684-8853.2016.4.101

Epidemic Theory as a Tool for Analysis of Broadcasting Process in VANETKoucheryavy Y. A.^a, PhD, Professor, ykoucheryavy@hse.ruYartsev S. V.^b, Senior Lecturer, s.yartsev@gmail.com^aNational Research University «Higher School of Economics», 33, Kirpichnaya St., 101000, Moscow, Russian Federation^bThe Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications, 22-1, Bolshhevikov Pr., 193232, Saint-Petersburg, Russian Federation

Introduction: Emergency alert mechanism in VANET assumes that information messages are broadcast in ad hoc mode. In order to limit the flow of duplicate messages inevitable in this transmission method, specialized algorithms are provided which allow you to organize a selective retransmission mode among the total number of nodes. **Purpose:** We assess the possibility to apply epidemic theory as a tool of constructing an analytical model which would describe how the broadcast messages are spread. **Results:** We have analyzed the transient processes in the nodes associated with the spread of information messages through the network, and graduated the states of the nodes in accordance with the classification proposed by epidemic theory. Relying on some ideas about physical fundamentals and VANET message retransmission features, we obtained analytical expressions describing the change in the relative abundance for each of the selected groups of nodes. Further studies in NS-2 simulation environment allowed us to obtain statistics about the temporal proportion of each group of nodes for a model section of a road network. Comparative analysis of the analytical and modeling results using Pearson criterion showed that the obtained analytical expressions can be used to describe the transient processes in VANET nodes. Consequently, it proves that epidemic theory can be used as a tool for comparative analysis of algorithms developed for information message retransmission.

Keywords — Vehicular Ad Hoc Networks (VANETs), Broadcasting, Epidemic Theory, Intelligent Transport Systems, WAVE.

References

1. *Analiticheskoe agentstvo "Autostat"* [Analytical Agency "Autostat"]. Available at: <https://www.autostat.ru/articles/21090/> (accessed 25 May 2016).
2. Wallace R. Technology Trends and Drivers in the Global Automotive Industry. *German Machinery Business Conf.*, Berlin, Germany, October 6, 2015, pp. 53–59.
3. European Standard (Telecommunications series) ETSI EN 302 665. Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. European Telecommunications Standards Institute, 2010. 44 p.
4. ETSI Guide ETSI EG 202 798. Intelligent Transport Systems (ITS); Testing; Framework for Conformance and Interoperability Testing. European Telecommunications Standards Institute, 2011. 48 p.
5. IEEE Std 1609.0-2013. IEEE Guide for Wireless Access in Vehicular Environments (WAVE) — Architecture. 78 p. doi:10.1109/IEEESTD.2014.6755433
6. Miao M., Zheng Q., Zheng K., Zeng Z. Implementation and Demonstration of WAVE Networking Services for Intelligent Transportation Systems. *Internet of Vehicles — Technologies and Services*, First Intern. Conf., IOV 2014, Beijing, China, Sept. 1–3, 2014, pp. 130–139.
7. *DSRC Implementation Guide. A guide to users of SAE J2735 Message Sets over DSRC*. SAE International, 2010. 210 p.
8. Wilkie D. Review of the Status of the Dedicated Short-Range Communications Technology and Applications. [Draft] *Report to Congress*, April 28, 2015. Available at: <http://www.trb.org/Main/Blurbs/172448.aspx>. (accessed 25 May 2016).
9. Koucheryavy A., Prokopiev A., Koucheryavy Y. *Samoorganizuiushchiesia seti* [Self-Organizing Networks]. Saint-Petersburg, Liubavich Publ., 2011. 312 p. (In Russian).
10. Jakubiak J., Koucheryavy Y. State of the Art and Research Challenges for VANETs. *Proc. of IEEE CCNC 2008*, Las Vegas, USA, January 10–12, 2008, pp. 912–916.
11. Dressler F., Hartenstein H., Altintas O., Tonguz O. K. Inter-Vehicle Communication — Quo Vadis. *IEEE Communications Magazine*, June 2014, vol. 52, no. 6, pp. 170–177.
12. Samara G., Alhmiedat T. Intelligent Emergency Message Broadcasting in VANET Using PSO. *WCST*, 2014, vol. 4, no. 7, pp. 90–100.
13. Mishra B. K., Keshri N. Mathematical Model on the Transmission of Worms in Wireless Sensor Network. *Applied Mathematical Modelling*, 2013, vol. 37, no. 6, pp. 4103–4111.
14. Newman M. E. J., Ferrario C. R. Interacting Epidemics and Coinfection on Contact Networks. *PLOS One*, 2013, vol. 8, e71321. doi:10.1371/journal.pone.0071321
15. De P., Liu Y., Das S. K. Modeling Node Compromise Spread in Wireless Sensor Networks Using Epidemic Theory in World of Wireless. *Mobile and Multimedia Networks, WoW-MoM 2006*, Intern. Symp., Buffalo-Niagara Falls, NY, 2006, pp. 243–250.
16. Khelil A., Becker C., Tian J., Rothermel K. An Epidemic Model for Information Diffusion in MANETs. *5th ACM Intern. Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, MSWiM*, USA, Atlanta, Georgia, September 28, 2002, pp. 54–60.
17. Mark B. L. Analysis of Virus Spread in Wireless Sensor Networks: An Epidemic Model. *Design of Reliable Communication Networks, DRCN 2009*, 7th Intern. Workshop on, Washington, DC, 2009, pp. 86–91.
18. Newman M. E. J. The Spread of Epidemic Disease on Networks. *Phys. Rev. E*, 2002, vol. 66, iss. 1. doi:10.1103/PhysRevE.66.016128
19. Zhang X., Neglia G., Kurose J., Towsley D. Performance Modeling of Epidemic Routing. *Computer Networks*, 2007, vol. 51, iss. 10, pp. 2867–2891.
20. Hethcote H. W. Mathematics of Infectious Diseases. *SIAM Review*, 2000, vol. 42(4), pp. 599–653.
21. Keeling M. J., Rohani P. *Modeling Infectious Diseases in Humans and Animals*. Princeton University Press, 2007. 408 p.
22. Yartsev S. Managed Broadcasting Mechanisms in Vehicular Ad Hoc Networks VANET. *Elektrosviaz'*, 2015, no. 3, pp. 27–31 (In Russian).
23. Chen Q., Schmidt-Eisenlohr F., Jiang D., Torrent-Moreno M., Delgrossi L., Hartenstein H. Overhaul of IEEE 802.11 Modeling and Simulation in NS-2 (802.11Ext). *MSWiM*, 2008, pp. 159–168.
24. Groenevelt R., Nain P., Koole G. The Message Delay in Mobile Ad Hoc Networks. *Performance Evaluation*, 2005, vol. 62, pp. 210–228.

АБРАМОВ
Максим
Викторович



Аспирант математико-механического факультета Санкт-Петербургского государственного университета, младший научный сотрудник лаборатории теоретических и междисциплинарных проблем информатики СПИИРАН, младший научный сотрудник лаборатории социального компьютинга Института перспективных исследований Московского педагогического государственного университета. В 2013 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Прикладная информатика в сфере международных отношений». Является автором 37 научных публикаций. Область научных интересов — социоинженерные атаки, информационная безопасность, защита пользователей. Эл. адрес: mva16@list.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 90 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

ГОРДЕЕВ
Борис
Романович



Студент факультета информационных технологий и программирования Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. Является автором одной научной публикации. Область научных интересов — профилирование, управление компетенциями, разработка программного обеспечения. Эл. адрес: gordeevbr@gmail.com

АЗАРОВ
Артур
Александрович



Консультант проректора по научной работе Санкт-Петербургского государственного университета. В 2011 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальностям «Прикладная информатика в сфере международных отношений» и «Экономика». В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 100 научных публикаций и 12 свидетельств о регистрации программ для ЭВМ и БД. Область научных интересов — информационная безопасность, анализ защищенности пользователей, социоинженерные атаки и др. Эл. адрес: artur-azarov@yandex.ru

БАРАНИЮК
Олеся
Александровна



Аспирант кафедры информационных систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики. В 2005 году окончила Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Международные отношения». Является автором трех научных публикаций. Область научных интересов — профилирование, управление компетенциями. Эл. адрес: ob@itc.vuztc.ru

ИВАКИН
Ян
Альбертович



Профессор кафедры инноватики и интегрированных систем качества Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, ведущий научный сотрудник Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1989 году окончил Высшее военно-морское училище радиоэлектроники им. А. С. Попова по специальности «Автоматизированные системы управления». В 2009 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 105 научных публикаций и девяти авторских программных разработок. Область научных интересов — оценка качества сложных программных систем, интеллектуальные системы и др. Эл. адрес: ivakin@oogis.ru

**КАШЕВНИК
Алексей
Михайлович**



Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

В 2008 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 150 научных публикаций.

Область научных интересов — управление знаниями, управление компетенциями, профилирование, онтологии, интеллектуальные пространства, робототехника.

Эл. адрес: alexey@ias.spb.su

**КУЧЕРЯВЫЙ
Евгений
Андреевич**



Профессор кафедры инноваций и бизнеса в сфере информационных технологий Национального исследовательского университета «Высшая школа экономики», Москва.

В 1997 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Программное обеспечение телекоммуникационных сетей».

В 2004 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук (PhD) в Технологическом университете Тампере (Финляндия).

Является автором более 200 научных публикаций.

Область научных интересов — телекоммуникационные технологии, интернет вещей, большие данные.

Эл. адрес: ykoucheryavyy@hse.ru

**МАЛЬЦЕВ
Георгий
Николаевич**



Профессор кафедры космических радиотехнических систем Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, действительный член Академии космонавтики им. К. Э. Циолковского.

В 1980 году окончил Военный инженерный Краснознаменный институт им. А. Ф. Можайского. В 1994 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 300 научных публикаций и 27 патентов на изобретения.

Область научных интересов — обработка сигналов в радиотехнических и оптико-электронных информационных системах и др.

Эл. адрес: georgy_maltsev@mail.ru

**МИЧУРИН
Сергей
Владимирович**



Доцент, директор института непрерывного и дистанционного образования, ответственный секретарь приемной комиссии Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1985 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиоэлектронные устройства».

В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 41 научной публикации и трех патентов на изобретения.

Область научных интересов — радиоэлектроника, вычислительная техника, системы управления.

Эл. адрес: michurin@aanet.ru

**НАЗАРОВ
Андрей
Вячеславович**



Начальник кафедры космической радиолокации и радионавигации Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 1994 году окончил Военный инженерно-космический институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы».

В 2014 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных публикаций и пяти монографий.

Область научных интересов — моделирование сложных систем, нейросетевые технологии, техническая диагностика, методы обработки изображений, оптико-электронные информационные системы.

Эл. адрес: naz-av@mail.ru

**ОРЕШИН
Андрей
Николаевич**



Доцент, сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел.

В 1999 году окончил Военный институт правительственной связи по специальности «Сети связи и системы коммутации».

В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 70 научных публикаций и пяти патентов на изобретения и полезные модели.

Область научных интересов — методы анализа и синтеза инфокоммуникационных систем и сетей, теория информации, механизмы обработки изображений, фильтрация видеопотока, содержание кадры с информационным шумом.

Эл. адрес: strongnuts@mail.ru

ПАВЛОВ
Владислав
Станиславович



Профессор кафедры проблемно-ориентированных вычислительных комплексов Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1987 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиоэлектронные устройства».

В 2013 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 160 научных публикаций, в том числе 14 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Область научных интересов — пространственно-временная обработка информационных сигналов, синтез, анализ и моделирование помехоустойчивых систем управления.

Эл. адрес: w14z@yandex.ru

ПЯТАЕВА
Анна
Владимировна



Аспирант Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск.

В 2003 году окончила магистратуру Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва по специальности «Информатика и вычислительная техника».

Является автором одной научной публикации.

Область научных интересов — анализ изображений, интеллектуальные информационные системы.

Эл. адрес: anna4u@list.ru

СЕРГЕЕВ
Михаил
Борисович



Профессор, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, директор НИИ информационно-управляющих систем Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

В 1980 году окончил ЛЭТИ.

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

ПЕРЕВАРЮХА
Андрей
Юрьевич



Старший научный сотрудник лаборатории прикладной информатики Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2002 году окончил Астраханский государственный технический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 49 научных публикаций.

Область научных интересов — моделирование нелинейных явлений в биологических процессах, гибридные системы, сценарное моделирование в теории управления.

Эл. адрес: temp_elf@mail.ru

СЕБЕРРИ
Дженифер
Рома



Гражданка Австралии.

Профессор, директор Центра компьютерных исследований безопасности Австралийского государственного университета Воллонгонг (Wollongong), основатель школы криптографии Австралии.

В 1966 году получила степень бакалавра в университете Нового Южного Уэльса, в 1969 году — магистра естественных наук в университете Ла Троб, Австралия.

В 1971 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора наук (PhD).

Является автором более 450 научных публикаций и шести монографий.

Область научных интересов — дискретная математика, комбинаторика, матрицы Адамара, безопасные криптоалгоритмы, передача информации.

Эл. адрес: jennie@uow.edu.au

СОЛОВЬЕВА
Татьяна
Николаевна



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

В 2010 году окончила Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Информатика и вычислительная техника».

В 2013 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 24 научных публикаций.

Область научных интересов — техническая диагностика, теория динамических систем, теория автоматического управления, компьютерное моделирование.

Эл. адрес: al2tn@yandex.ru

**СУЗДАЛЬ
Виктор
Семенович**

Гражданин Украины. Старший научный сотрудник, заведующий лабораторией систем управления Института сцинтилляционных материалов НАН Украины, Харьков, Украина. В 1964 году окончил Харьковский политехнический институт им. В. И. Ленина по специальности «Инженер-электрик». В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 140 научных публикаций и 50 патентов на изобретения. Область научных интересов — теория автоматического управления, методы проектирования систем контроля и управления для выращивания монокристаллов, информационно-вычислительные системы. Эл. адрес: suzdal@isma.kharkov.ua

**ТУЛУПЬЕВ
Александр
Львович**

Заведующий лабораторией теоретических и междисциплинарных проблем информатики Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1992 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Прикладная математика», в 1997 году — по специальности «Социология», в 2003 году — Йельский университет, США. В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Является автором 300 научных публикаций. Область научных интересов — представление и обработка данных и знаний с неопределенностью и др. Эл. адрес: alexander.tulupyev@gmail.com

**ФАВОРСКАЯ
Маргарита
Николаевна**

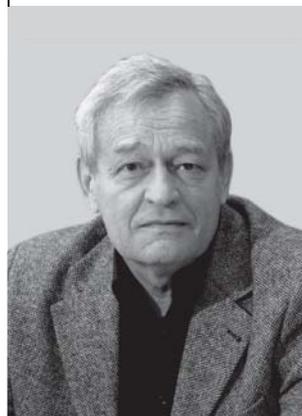
Профессор, заведующая кафедрой информатики и вычислительной техники Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М. Ф. Решетнёва, Красноярск. Почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1980 году окончила Рыбинский авиационный технологический институт по специальности «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры». В 2011 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором около 160 научных публикаций. Область научных интересов — распознавание образов, цифровая обработка изображений, кластерный анализ, интеллектуальные технологии обработки данных и др. Эл. адрес: favorskaya@sibsau.ru

**ТРЕГУБОВ
Роман
Борисович**

Сотрудник Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орел. В 1998 году окончил Военный институт правительственной связи по специальности «Сети связи и системы коммутации». В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 40 научных публикаций и пяти патентов на изобретения. Область научных интересов — теория массового обслуживания, теория вероятностей, применение методов математического моделирования в телекоммуникациях. Эл. адрес: treba@list.ru

**ТУЛУПЬЕВА
Татьяна
Валентиновна**

Старший научный сотрудник лаборатории теоретических и междисциплинарных проблем информатики Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН. В 1992 году окончила Псковский государственный педагогический университет им. С. М. Кирова по специальности «Математика и физика», в 1997 году — Санкт-Петербургский государственный университет по специальности «Психология», в 2006 году — Йельский университет, США. В 2001 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата психологических наук. Является автором 130 научных публикаций. Область научных интересов — применение методов математики и информатики в гуманитарных исследованиях и др. Эл. адрес: tvt100a@mail.ru

**ХИМЕНКО
Виталий
Иванович**

Профессор, директор департамента развития НИО ЦИТ «Петрокомета», Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки РФ, лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники. В 1969 году окончил Куйбышевский политехнический институт по специальности «Приборные устройства». В 1992 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 150 научных публикаций. Область научных интересов — статистическая радиофизика, обработка информации в системах живой и неживой природы. Эл. адрес: vih.13@yandex.ru

ШПАКОВ
Владимир
Михайлович



Старший научный сотрудник лаборатории интегрированных систем автоматизации Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1962 году окончил Ленинградский институт точной механики и оптики по специальности «Автоматика и телемеханика».

В 1970 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 67 научных публикаций и восьми авторских свидетельств на изобретения.

Область научных интересов — компьютерное моделирование и автоматическое управление дискретно-непрерывными процессами.

Эл. адрес: vlad@iias.spb.su

ЯКИМОВ
Виктор
Леонидович



Заместитель начальника кафедры приемных устройств и радиоавтоматики Военно-космической академии им. А. Ф. Можайского, Санкт-Петербург.

В 2000 году окончил Военный инженерно-космический институт им. А. Ф. Можайского по специальности «Радиоэлектронные системы космических аппаратов».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 40 научных публикаций.

Область научных интересов — моделирование сложных систем, методы обработки телеметрической информации, техническая диагностика, методы обработки изображений.

Эл. адрес: yakim78@yandex.ru

ЯРЦЕВ
Сергей
Викторович



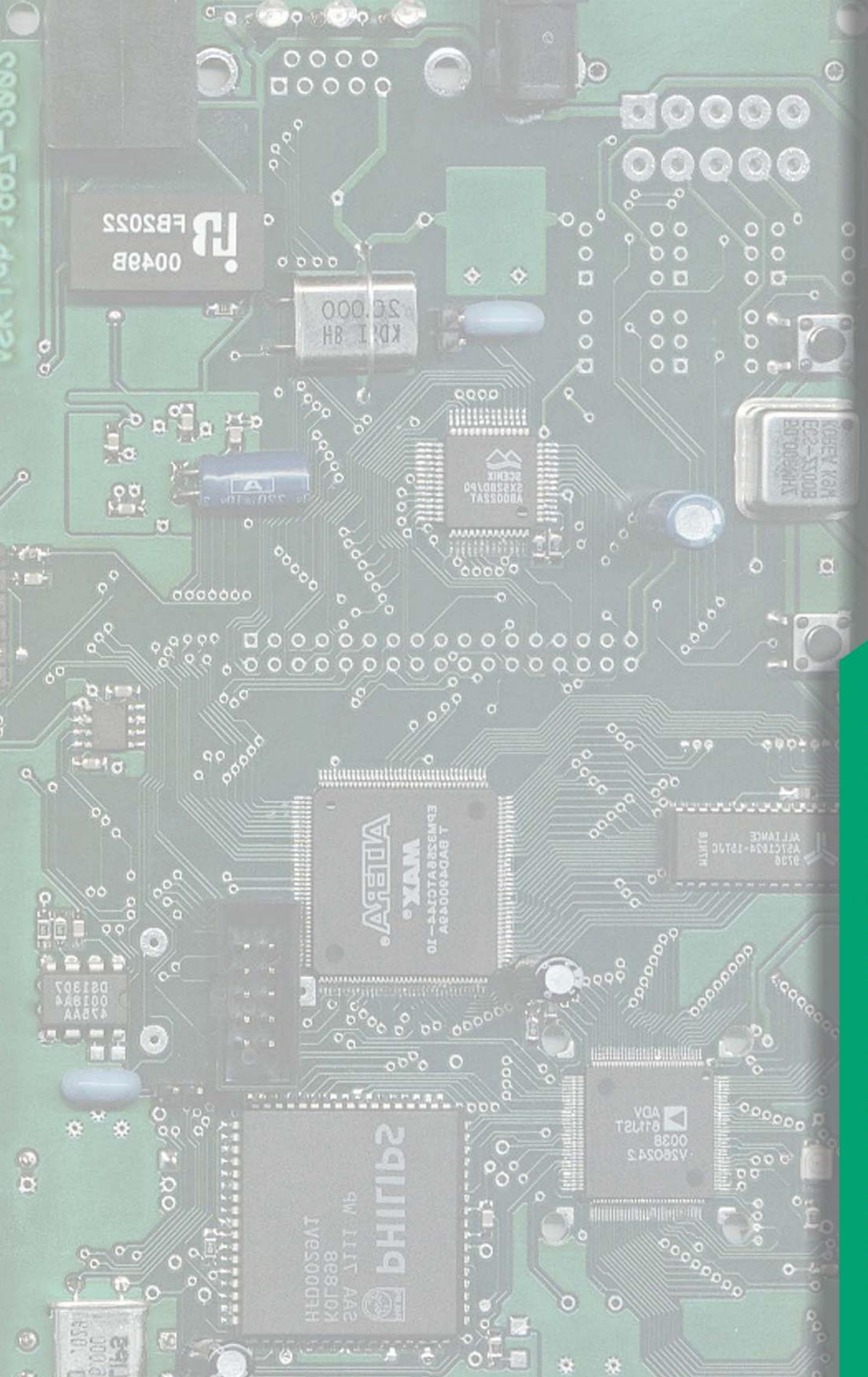
Срашний преподаватель кафедры сетей связи и передачи данных Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, главный инженер проекта ООО «Би.Си.Си.».

В 2007 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Сети связи, системы коммутации и вычислительная техника».

Является автором шести научных публикаций.

Область научных интересов — интеллектуальные транспортные системы, автомобильные сети.

Эл. адрес: s.yartsev@gmail.com



ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

ISSN 1684-8853



9 771684 885009